

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARINDA ZEKİ  
YÖNLENDİRME TEKNİKLERİ**

**Tezi Hazırlayan  
Selçuk ÖKDEM**

**Tezi Yöneten  
Prof. Dr. Derviş KARABOĞA**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doktora Tezi**

**Şubat 2011  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARINDA ZEKİ  
YÖNLENDİRME TEKNİKLERİ**

**Tezi Hazırlayan  
Selçuk ÖKDEM**

**Tezi Yöneten  
Prof. Dr. Derviş KARABOĞA**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doktora Tezi**

**Bu tez çalışması FBT-06-86 nolu proje ile Erciyes Üniversitesi Bilimsel  
Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir.**

**Şubat 2011  
KAYSERİ**

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA danışmanlığında Selçuk ÖKDEM tarafından hazırlanan “Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Zeki Yönlendirme Teknikleri” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

01/02/2011

**JÜRİ:**

Başkan: Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Üye : Prof. Dr. Derviş KARABOĞA

Üye : Prof. Dr. Kerim GÜNEY

Üye : Doç. Dr. Veysel ASLANTAŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mete ÇELİK

**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 08/02/2011 tarih ve 2011/07-22 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

08/02/2011



**Enstitü Müdürü**

Prof Dr. Necmettin MARAŞLI

## TEŞEKKÜR

Doktora tezimin gerçekleşmesinde bilgi ve yardımlarını esirgemeyerek uyarıları ile yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Derviş KARABOĞA'ya, tezin yönlendirilmesinde katkılarda bulunan hocalarım Prof. Dr. Kerim GÜNEY, ve Doç. Dr. Veysel ASLANTAŞ'a, çalışmama doğrudan ya da dolaylı olarak katkılarda bulunmuş olan tüm arkadaşlarıma ve değerli hocalarıma, ve özellikle de benim her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

## **KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARINDA ZEKİ YÖNLENDİRME TEKNİKLERİ**

**Selçuk ÖKDEM**  
**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Doktora Tezi, Şubat 2011**  
**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Derviş KARABOĞA**

### **ÖZET**

Gelişen teknolojiyle birlikte küçük boyutlarda, az güç tüketen, çok fonksiyonlu algılayıcı elemanlar tasarlanabilmektedir. Bu elemanlar bir araya gelerek Kablosuz Algılayıcı Ağları (KAA'ları) oluştururlar. KAA'lar algılama, hesaplama ve iletişim yapabilen çok sayıda (örneğin binlerce) algılayıcı noktaları içerirler. Her bir nokta civarındaki sıcaklık, nem, basınç gibi nicelikleri ölçebilme, basit hesaplama işlemleri yapabilme ve etrafındaki diğer noktalarla veya baz istasyonu ile haberleşme yapabilme özelliklerine sahiptir. Belirli bir coğrafyada daha doğru ölçümler yapabilmek için daha çok sayıda algılayıcı kullanılması gerekir.

KAA'ların enerji kaynakları sınırlıdır ve algılayıcı noktaların konumlandırılmaları genelde önceden belirlenmemekte ve zor coğrafya bölgelerine veya afet bölgelerine rasgele yerleştirilmektedirler. Bu özelliklerinden dolayı algılayıcı noktaların herhangi bir bakım veya düzenleme yapılmaksızın, uzun süre algılama ve iletişim yapabilmeleri önemlidir. Dolayısıyla, yüksek kalitede algılama ve hatasız çalışma için algılayıcı noktalar arasında önemli ölçüde dayanışma ve işbirliğinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Klasik yönlendirme protokolleri KAA'lar için kullanılamamaktadır. Kendilerine özgü karakteristiklerinden dolayı KAA'lara özel ağ protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir. KAA'ların en önemli problemlerinden birisi yönlendirme problemidir. Yönlendirmenin temel amacı ağ ömrünü artırmak ve yoğun enerji yönetimi tekniklerinin kullanımıyla ortaya çıkan bağlantı hatalarını önlemektir.

Bu çalışmada, sürü zekasına dayalı yeni yönlendirme yaklaşımları tanıtılmakta ve bu yaklaşımlar olay ve zaman bazlı KAA yapılarında kullanılmaktadır. Önerilen yaklaşımlar, KAA'ların yapısında yer alan sınırlamaları dikkate alarak, enerji

tasarrufunu sağlayan yönlendirme yöntemlerinin gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Olay tabanlı KAA yapıları için önerilen yaklaşımların oluşturulmasında Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) algoritması kullanılmıştır. Periyodik veri transferi gerçekleştiren zaman bazlı KAA yapıları için önerilen yaklaşımların oluşturulmasında da Yapay Arı Koloni (ABC) algoritmasından faydalanılmıştır. Performans sonuçlarının yaygın olarak kullanılan diğer metotlarla karşılaştırılması için bir benzetim programı geliştirilmiştir. Protokollerin başarısını ölçmek için farklı ağ senaryolarında farklı ölçütler kullanılarak test sonuçları alınmıştır. Alınan performans sonuçları, geliştirilen protokollerin daha tasarruflu enerji kullanarak ağ ömrünü artırdığını göstermiştir. Enerji tasarrufunun sağlanması için g tüketimi ve transfer zamanı dikkate alınarak uygun veri yolları belirlenmiştir. Sonuç olarak, tezde önerilen yönlendirme metotlarını kullanan KAA yapıları hatalara karşı dirençli ve daha uzun ömürlü olabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz algılayıcı ağlar, yönlendirme protokolleri, kablosuz ağ benzetimleri, karınca koloni optimizasyonu, yapay arı kolonisi algoritması.

# **INTELLIGENT ROUTING TECHNIQUES FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS**

**Selçuk ÖKDEM**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Ph. D. Thesis, February 2011**

**Thesis Supervisor: Prof. Dr. Derviş KARABOĞA**

## **ABSTRACT**

Due to technological advances in recent years, it has become possible to design multifunctioning low power sensor nodes in small scale. These components form Wireless Sensor Networks (WSNs) by cooperating together. WSNs consist of large numbers of sensor nodes (eg. by thousands) equipped with sensing, computing and communication abilities. Each node can sense the parameters such as temperature, humidity, pressure of its environment and perform simple computations, and communicate with its neighbors or base station. A greater number of sensors are needed for a certain geographical region for greater accuracy.

Power supplies of WSNs are limited and the positions of the sensor nodes are usually not predetermined and deployed randomly in inaccessible geographic areas and disaster locations. This implies that the sensor nodes are expected to perform sensing and communicating for long time with no maintenance or reorganization. Therefore, extensive collaboration between sensors nodes is required to perform high quality sensing and to work with no fault. Traditional routing protocols can not be used for WSNs. Due to their own characteristic, it is required to design specific network protocols for them. One of the main problems in WSNs is the routing problem. The main goal of WSN routing is to prolong the lifetime of the network and prevent connectivity errors by employing aggressive energy management techniques.

In this study, new routing approaches based on swarm intelligence are introduced and used on event-based and time-based WSN structures. The proposed approaches aim to realize the energy efficient routing methods by considering the constraints specific to WSNs. The approach employing Ant Colony Optimization (ACO) algorithm is used for

the event based WSNs. ABC algorithm is utilized to develop the routing methods for time based WSNs transferring data periodically. A simulation program is developed to compare the performance of the proposed approaches with widely-used other methods. Test results are obtained by using various metrics for different network scenarios to evaluate the performance of the protocols. The results produced show that the proposed protocols provide longer network life time by saving more energy. To save energy, suitable data paths are determined by considering power consumption and transfer time. Hence, the WSNs employing the routing methods proposed in thesis can be more resistant to faults and have longer lifetime.

**Keywords:** Wireless sensor networks, routing protocols, wireless network simulations, ant colony optimization, artificial bee colony algorithm.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                       |      |
|-----------------------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY                                                         | i    |
| TEŞEKKÜR                                                              | ii   |
| ÖZET                                                                  | iii  |
| ABSTRACT                                                              | v    |
| KISALTMALAR LİSTESİ                                                   | xi   |
| TABLOLAR LİSTESİ                                                      | xiii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ                                                      | xiv  |
| <br>1. BÖLÜM                                                          |      |
| GİRİŞ                                                                 | 1    |
| 1.1. Tezin Literatürdeki Yeri                                         | 1    |
| 1.2. Çalışmanın Amacı                                                 | 4    |
| <br>2. BÖLÜM                                                          |      |
| KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN GELİŞTİRİLEN<br>YÖNLENDİRME TEKNİKLERİ | 6    |
| 2.1. KAA Yönlendirmede Amaçlanan Konular                              | 8    |
| 2.2. KAA' ları Yönlendirmede Dikkate Alınması Gereken Faktörler       | 10   |
| 2.3. KAA' lar İçin Geliştirilen Yönlendirme Protokollerinin Türleri   | 13   |
| 2.3.1. Düz Yönlendirme                                                | 14   |
| 2.3.2. Kümeleme Tabanlı Yönlendirme                                   | 15   |
| 2.3.3. Adaptif Yönlendirme                                            | 16   |
| 2.3.4. Çok Yollu Yönlendirme                                          | 17   |
| 2.3.5. Sorgulama Tabanlı Yönlendirme                                  | 18   |
| 2.3.6. Görüşme Tabanlı Protokoller                                    | 18   |
| 2.3.7. Sezgisel Tabanlı Yönlendirme Teknikleri                        | 18   |
| 2.4. KAA Yönlendirme İşleminde Hedeflenen Çalışma Konuları            | 20   |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.KAA’larda Güvenlik Problemleri ve Önerilen Çözümler                                                  | 20 |
| <br>3. BÖLÜM                                                                                             |    |
| YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİNİN TEST EDİLMESİNE YÖNELİK<br>GELİŞTİRİLEN YAZILIM                              | 25 |
| 3.1. OSI Referans Modeli                                                                                 | 27 |
| 3.2. KAA Benzetim Yazılımları                                                                            | 29 |
| 3.3. Kullanılan KAA Enerji Modeli                                                                        | 32 |
| 3.4. KAA Yönlendirme Protokollerinin Performans Analizlerinin<br>Yapılabilmesi için Geliştirilen Yazılım | 42 |
| 3.4.1. Programda Kullanılan Fiziksel ve Veri Bağlantı Katmanları Özellikleri                             | 42 |
| 3.4.2. Paralel Yapıda Ayrık Olay Çalıştırma Mimarisi                                                     | 42 |
| 3.4.3. Zamanlayıcı Nesnesi Yapılandırması                                                                | 45 |
| 3.4.3.1. Zamanlayıcı Nesnesinin Çalışma Modları                                                          | 45 |
| 3.4.3.2. Zamanlayıcı Fonksiyonunun Bir Defa Çalıştırılması                                               | 45 |
| 3.4.3.3. Çoklu Zamanda Zamanlayıcı Fonksiyonunun Çalışması                                               | 46 |
| 3.4.3.4. Program Parçalarının Kuyruğa Alınmasının İncelenmesi                                            | 47 |
| 3.4.3.5. Zamanlayıcı Nesnesi Çağırma Fonksiyonunun Oluşturulması                                         | 47 |
| 3.4.4. KAA Senaryosunun Başlatılması                                                                     | 48 |
| 3.4.5. Ağ Üzerinde Haberleşme Bağlantılarının Elde Edilmesi                                              | 49 |
| 3.4.6. Farklı Protokoller için Alınan Performans Sonuçları                                               | 53 |
| <br>4. BÖLÜM                                                                                             |    |
| OPTİMUM YÖNLENDİRME TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİNDE<br>REFERANS ALINAN SEZGİSEL TABANLI PROTOKOLLER      | 56 |
| 4.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları                                     | 57 |
| 4.1.1. Genetik Algoritmalar (GA)                                                                         | 57 |
| 4.1.2. Karınca Koloni Optimizasyonu                                                                      | 58 |
| 4.1.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması                                                     | 61 |
| 4.1.4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması                                                                    | 63 |
| 4.1.5. Diferansiyel Gelişime Dayalı (DE) Algoritma                                                       | 65 |
| 4.2. Referans Alınan KAA Yönlendirme Protokolleri                                                        | 67 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.1. LEACH Protokolü                                                                                                               | 67  |
| 4.2.2. GA ve PSO Kullanılarak Gerçekleştirilen Yönlendirme Protokolleri                                                              | 70  |
| 4.2.3. Diferansiyel Gelişime Dayalı Algoritma Kullanılarak Gerçekleştirilen Kablosuz Algılayıcı Ağ Yönlendirmesi                     | 74  |
| 4.2.4. KKO Tabanlı Olarak Geliştirilen Enerji Tasarruflu KAA Yönlendirme Algoritmaları                                               | 76  |
| 4.3. Sonuç ve Değerlendirme                                                                                                          | 79  |
| 5. BÖLÜM                                                                                                                             |     |
| KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KARINCA KOLONİ OPTİMİZASYONU KULLANARAK YAPILAN OPTİMUM YÖNLENDİRME İŞLEMİ                               | 80  |
| 5.1. EARACO Yönlendirme Protokolü                                                                                                    | 81  |
| 5.1.1. KAA Yapıları için KKO Yaklaşımının Uyarlanması                                                                                | 83  |
| 5.1.2. Protokol İşlevi                                                                                                               | 85  |
| 5.1.2.1. Veri Yayınlanması                                                                                                           | 85  |
| 5.1.2.2. Onaylama Metodu                                                                                                             | 88  |
| 5.1.2.3. Enerji Seviyelerinin Bildirilmesi                                                                                           | 89  |
| 5.2. Benzetim Sonuçları                                                                                                              | 89  |
| 5.3. EARACO Üzerinde Yapılan İyileştirme                                                                                             | 94  |
| 5.4. EARACO Protokolünün Yönlendirme Yongası Uygulaması                                                                              | 96  |
| 5.5. Sonuç ve Değerlendirme                                                                                                          | 98  |
| 6. BÖLÜM                                                                                                                             |     |
| KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KÜMELEME TABANLI YÖNLENDİRME İŞLEMLERİNDE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI KULLANILARAK GELİŞTİRİLEN MODEL | 100 |
| 6.1. Yapay Arı Koloni Algoritması Kullanılarak Geliştirilen KAA Yönlendirme Protokolleri                                             | 101 |
| 6.1.1. Önerilen Kümeleme Yöntemi                                                                                                     | 101 |
| 6.1.2. Geliştirilen Modelin İşleyiş Aşamaları                                                                                        | 103 |
| 6.1.3. ABC Algoritması için Önerilen Uygunluk Fonksiyonu                                                                             | 110 |

|                                                                    |         |
|--------------------------------------------------------------------|---------|
| 6.1.4. CWA Algoritmasının Performans Sonuçları                     | 113     |
| 6.1.5. Uygunluk Fonksiyonu Üzerinde Yapılan İyileştirmeler         | 115     |
| 6.1.6. Uygunluk Fonksiyonunda Enerji Kriterinin Kullanımı          | 116     |
| 6.1.7. ICWA Algoritmasının Performans Sonuçları                    | 118     |
| 6.1.8. Uygunluk Fonksiyonunda Servis Kalitesi Kriterinin Kullanımı | 122     |
| 6.1.9. Uygunluk Fonksiyonlarının Birleştirilmesi                   | 123     |
| 6.1.10. ICWAQ Algoritmasının Performans Sonuçları                  | 125     |
| 6.2. Yönlendirme Protokollerinin Karmaşıklık Analizi               | 132     |
| 6.3. Sonuç ve Değerlendirme                                        | 137     |
| <br>7. BÖLÜM                                                       | <br>138 |
| SONUÇ VE DEĞERLENDİRME                                             |         |
| <br>KAYNAKLAR                                                      | <br>141 |
| <br>ÖZGEÇMİŞ                                                       | <br>151 |

## KISALTMALAR LİSTESİ

|         |                                                                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KAA     | Kablosuz Algılayıcı Ağlar (Wireless Sensor Networks)                                                  |
| MANET   | Hareketli Yama Ağlar (Mobile Ad-hoc Networks)                                                         |
| QoS     | Servis Kalitesi (Quality of Service)                                                                  |
| ID      | Kimlik (Identity)                                                                                     |
| GPS     | Yer Belirleme Sistemi (Global Positioning System)                                                     |
| MAC     | Ortam Erişim Kontrolü (Medium Access Control)                                                         |
| CSMA    | Taşıyıcı Algılama Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access)                                        |
| TDMA    | Zaman Paylaşımli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)                                         |
| PDA     | Kişisel Sayısal Yardımcı (Personal Digital Assistant)                                                 |
| OSI     | Açık Sistemler Arabağlantıları (Open Systems Interconnection)                                         |
| ISO     | Uluslararası Standartlar Organizasyonu (International Standards Organization)                         |
| LLC     | Mantıksal Bağlantı Kontrolü (Logical Link Control)                                                    |
| SAP     | Servis Erişim Noktaları (Service Access Points)                                                       |
| TCP/IP  | İletim Kontrol Protokolü/İnternet Protokolü (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)         |
| IEEE    | Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) |
| WLAN    | Kablosuz Yerel Ağ (Wireless Local Area Network)                                                       |
| UDP     | Kullanıcı Veri bloğu Protokolü (User Datagram Protocol)                                               |
| SPX     | Sıralı Paket Değişimi (Sequenced Packet Exchange)                                                     |
| NetBIOS | Ağ Temel Giriş/Çıkış Sistemi (Network Basic Input/Output System)                                      |
| FTP     | Dosya Transfer Protokolü (File Transfer Protocol)                                                     |
| SMTP    | Basit Posta Transfer Protokolü (Simple Mail Transfer Protocol)                                        |
| DNS     | Alan İsim Servisi (Domain Name Service)                                                               |
| PC      | Kişisel Bilgisayar (Personal Computer)                                                                |
| FSM     | Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine)                                                           |
| dB      | Desibel (Decibel)                                                                                     |
| FDMA    | Frekans Paylaşımli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)                                  |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LEACH   | Düşük Enerjili Adaptif Kümeleme Hiyerarşisi (Adaptive Clustering Hierarchy)                                                                                                                                                                                                                                  |
| ACO     | Karınca Koloni Optimizasyonu (Ant Colony Optimization)                                                                                                                                                                                                                                                       |
| PSO     | Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)                                                                                                                                                                                                                                                    |
| KKO     | Karınca Kolonisi Optimizasyonu                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| ABC     | Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu (Artificial Bee Colony Optimization)                                                                                                                                                                                                                                        |
| GSP     | Gezgin Satıcı Problemi                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| EARACO  | KAA'lar için Enerji Durumlarını Değerlendiren Yönlendirme Algoritması (Energy Aware Routing using Ant Colony Algorithm for WSNs)                                                                                                                                                                             |
| IEARACO | KAA'lar için Enerji Durumlarını Değerlendiren Yönlendirme Algoritmasının Geliştirilmiş Versiyonu (An Improved version of Energy Aware Routing using Ant Colony Algorithm for WSNs)                                                                                                                           |
| EEABR   | Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Karınca Tabanlı Yönlendirme Algoritması (Efficient Ant Based Routing Algorithm for WSNs)                                                                                                                                                                                      |
| SC      | Algılayıcı Tabanlı Maliyeti Dikkate Alan Karınca Yönlendirmesi (Sensor Driven Cost Aware Ant Routing)                                                                                                                                                                                                        |
| SOIC    | Küçük Ölçekli Entegre Devre (Small Outlined Integrated Circuit)                                                                                                                                                                                                                                              |
| RX      | Alıcı Hat (Receive Line)                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| TX      | Verici Hat (Transmit Line)                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| CWA     | Yapay Arı Koloni Algoritmasına Dayalı Kümeleme Tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağ Yönlendirmesi (Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm)                                                                                                                           |
| ICWA    | Yapay Arı Kolonisi Algoritmasına Dayalı Kümeleme Tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağ Algoritmasının İyileştirilmiş Versiyonu (an Improved version of Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm)                                                                        |
| ICWAQ   | Servis Kalitesini Dikkate Alarak Yapay Arı Kolonisi Algoritmasıyla Geliştirilen Kümeleme Tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağ Algoritmasının İyileştirilmiş Versiyonu (An Improved version of Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm considering Quality of service) |

## TABLOLAR LİSTESİ

|           |                                                                           | Sayfa No |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| Tablo 3.1 | Örnek I hesaplaması için radyo özellikleri                                | 37       |
| Tablo 3.2 | Örnek II hesaplaması için radyo özellikleri                               | 38       |
| Tablo 3.3 | Örnek III hesaplaması için radyo özellikleri                              | 38       |
| Tablo 3.4 | Farklı özellikteki radyolar için iletişim mesafesi değerleri              | 39       |
| Tablo 3.5 | Kullanılan radyo verici ve alıcısının fiziksel katman parametre değerleri | 40       |
| Tablo 3.6 | Zamanlayıcı çalışma modları                                               | 47       |
| Tablo 3.7 | Başlatma argüman parametreleri                                            | 49       |
| Tablo 3.8 | Parametre değerleri                                                       | 51       |
| Tablo 4.1 | Farklı enerjili ağlarda ilk ve son elemanların ölüm zamanları             | 70       |
| Tablo 4.2 | PSO ve GA parametre değerleri                                             | 71       |
| Tablo 5.1 | MICAz modülünün parametre değerleri                                       | 90       |
| Tablo 5.2 | Ağırlıklandırma parametrelerinin değerleri                                | 95       |
| Tablo 5.3 | Yönlendirme yongasının özellikleri                                        | 96       |
| Tablo 5.4 | Yönlendirme yongasının yanıt zamanları                                    | 98       |
| Tablo 5.5 | Yönlendirme yongasının haberleşmesinde kullanılan sinyaller               | 98       |
| Tablo 6.1 | Algılayıcı elemanların karşılıklı uzaklıklarını içeren tablo              | 105      |
| Tablo 6.2 | ABC algoritmasında kullanılan parametre değerleri                         | 110      |
| Tablo 6.3 | CWA Benzetim koşturmalarında kullanılan parametre değerleri               | 113      |
| Tablo 6.4 | ICWA/ICWAQ Benzetim koşturmalarında kullanılan parametre değerleri        | 119      |
| Tablo 6.5 | Algoritmaların kullandığı uygunluk fonksiyonları                          | 125      |
| Tablo 6.6 | En iyi $\beta$ ve $\delta$ değerleri                                      | 127      |
| Tablo 6.7 | En İyi ve En Kötü durum Analizi                                           | 136      |
| Tablo 7.1 | KAA yapılarına özgü geliştirilen protokoller                              | 139      |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|            |                                                                                                             | Sayfa No |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Şekil 1.1  | Kablosuz algılayıcı elemanı                                                                                 | 2        |
| Şekil 1.2  | Askeri bir uygulamada kullanılan kablosuz algılayıcı ağı                                                    | 3        |
| Şekil 2.1  | Yönlendirme tekniklerinin gruplandırılması                                                                  | 19       |
| Şekil 2.2  | Farklı frekanslardan iletilen frekans sıçrama bilgisi                                                       | 22       |
| Şekil 3.1  | KAA’larda veri transferi                                                                                    | 27       |
| Şekil 3.2  | OSI Modeli – Uygulama protokol karşılıkları                                                                 | 29       |
| Şekil 3.3  | Kısa mesafeli açık ve doğru bir görüş sahası içerisinde alıcı anten üzerine bırakılan güç                   | 34       |
| Şekil 3.4  | Uzun mesafeli muhtemel yansımaların bulunduğu bir görüş sahası içerisinde alıcı anten üzerine bırakılan güç | 34       |
| Şekil 3.5  | Yer yansımasının dikkate alındığı durumda alıcı anten üzerine bırakılan güç                                 | 35       |
| Şekil 3.6  | Kullanılan radyo modeli                                                                                     | 41       |
| Şekil 3.7  | Paralel yapıda gerçekleştirilen veri yayını                                                                 | 43       |
| Şekil 3.8  | Zamanlayıcı nesnesi çağırma fonksiyonunda yer alan işlem akışı                                              | 43       |
| Şekil 3.9  | Sekiz elemanlı örnek bir ağ yapısı için programın ürettiği komşuluk tablosu                                 | 44       |
| Şekil 3.10 | İki adım için çalıştırılan senaryoda 1. Paket için programın ürettiği alıcı/verici elemanlar                | 44       |
| Şekil 3.11 | İki adım için çalıştırılan senaryoda 2. Paket için programın ürettiği alıcı/verici elemanlar                | 44       |
| Şekil 3.12 | Zamanlayıcı işleyişi                                                                                        | 46       |
| Şekil 3.13 | Başlatma fonksiyonunun çağırılması                                                                          | 49       |
| Şekil 3.14 | Farklı verici güçlerine sahip elemanların oluşturduğu komşuluklar                                           | 50       |
| Şekil 3.15 | Kümeleme tabanlı bir KAA yapısında oluşturulan kümeler                                                      | 51       |
| Şekil 3.16 | LEACH Protokolü ile oluşturulan haberleşme bağlantıları                                                     | 52       |
| Şekil 3.17 | CWA Protokolü ile oluşturulan haberleşme bağlantıları                                                       | 52       |

|            |                                                                                                                       |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.18 | Enerji durumuna göre alınan toplam sinyal sayısı                                                                      | 53 |
| Şekil 3.19 | Tur sayısına göre alınan sinyal sayısı                                                                                | 54 |
| Şekil 3.20 | 2048 adet paket alımı için geçen süre                                                                                 | 54 |
| Şekil 3.21 | Enerji durumuna göre canlı eleman sayısı                                                                              | 55 |
| Şekil 3.22 | Farklı parametre değerleri için alınan grafik                                                                         | 55 |
| Şekil 4.1  | DE’de yeni bir çözümün elde edilmesi                                                                                  | 67 |
| Şekil 4.2  | 0.5 J/Eleman enerjili KAA yapısının ağ ömrü                                                                           | 69 |
| Şekil 4.3  | Uygunluk fonksiyonunun yakınsaması                                                                                    | 72 |
| Şekil 4.4  | Hayatta kalan eleman sayısının zamana bağlı grafiği                                                                   | 73 |
| Şekil 4.5  | Alınan sinyal sayısının zamana bağlı grafiği                                                                          | 73 |
| Şekil 4.6  | Hayatta kalan eleman sayısının zamana bağlı grafiği                                                                   | 75 |
| Şekil 4.7  | 0.5 J/Eleman enerjili KAA yapısının ağ ömrü-I                                                                         | 78 |
| Şekil 4.8  | 0.5 J/Eleman enerjili KAA yapısının ağ ömrü-II                                                                        | 79 |
| Şekil 5.1  | Algılayıcı eleman içeriği                                                                                             | 80 |
| Şekil 5.2  | KAA’larda çoklu yollu veri iletim örneği                                                                              | 83 |
| Şekil 5.3  | Ham veri parçaları                                                                                                    | 86 |
| Şekil 5.4  | Veri paketi içeriği                                                                                                   | 86 |
| Şekil 5.5  | Yönlendirme işlemi örneği                                                                                             | 87 |
| Şekil 5.6  | Onay mesajının iletimi                                                                                                | 88 |
| Şekil 5.7  | Onay mesajının içeriği                                                                                                | 88 |
| Şekil 5.8  | Farklı algılayıcı ağlar için iletim sonrası ağda kalan ortalama enerji seviyeleri                                     | 90 |
| Şekil 5.9  | EEABR algoritması kullanan farklı yoğunluktaki KAA’ların iletim sonrası kalan ortalama enerji seviyelerinin farkları  | 91 |
| Şekil 5.10 | Farklı algılayıcı ağlar için iletim sonrası ağda kalan ortalama enerji seviyeleri                                     | 91 |
| Şekil 5.11 | EARACO algoritması kullanan farklı yoğunluktaki KAA’ların iletim sonrası kalan ortalama enerji seviyelerinin farkları | 92 |
| Şekil 5.12 | Farklı Sayılarda Eleman İçeren Ağlar Üzerinde Kalan Enerji                                                            | 93 |

|            |                                                                                                      |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.13 | 256 Paketi Alımından Sonra Farklı Sayılarda Eleman İçeren Ağlar Üzerinde Kalan Enerji                | 94  |
| Şekil 5.14 | 1K Paket iletiminden sonra ağ üzerinde kalan enerji                                                  | 96  |
| Şekil 5.15 | Haberleşme protokolünün durum diyagramı                                                              | 97  |
| Şekil 6.1  | Doğrudan haberleşme kullanılarak yapılan veri toplama işlemi                                         | 102 |
| Şekil 6.2  | Kümeleme yapılarak veri toplama işlemi                                                               | 103 |
| Şekil 6.3  | Algoritma işleyişinin ana hatlarını gösteren akış diyagramı                                          | 105 |
| Şekil 6.4  | Tanıtım mesajı yapısı                                                                                | 105 |
| Şekil 6.5  | Tanıtım mesajının MAC katmanda oluşturulan çerçevesi (MAC frame)                                     | 106 |
| Şekil 6.6  | Algılayıcı elemanların birbirlerine olan karşılıklı uzaklıklarının hesaplanmasına ait akış diyagramı | 107 |
| Şekil 6.7  | Kurulum adımıda yer alan işlemleri gösteren akış diyagramı                                           | 109 |
| Şekil 6.8  | Alınan paket sayısına göre ağ üzerinde kalan enerji                                                  | 114 |
| Şekil 6.9  | Tur sayısına göre ağ üzerinde kalan enerji                                                           | 115 |
| Şekil 6.10 | Enerji tüketim grafiği                                                                               | 116 |
| Şekil 6.11 | Enerji durumunu gösteren uygunluk fonksiyonu eğrisi                                                  | 118 |
| Şekil 6.12 | Farklı $\beta$ değerleri için hayatta kalan eleman sayısı                                            | 121 |
| Şekil 6.13 | Farklı $\beta$ değerleri için ağ üzerinde kalan enerji                                               | 122 |
| Şekil 6.14 | $f^{mesafe}$ uygunluk fonksiyonunun aldığı değerler                                                  | 124 |
| Şekil 6.15 | Farklı $\delta$ değerleri için hayatta kalan eleman sayısı                                           | 128 |
| Şekil 6.16 | Farklı $\delta$ değerleri için ağ üzerinde kalan enerji                                              | 128 |
| Şekil 6.17 | Farklı $\delta$ değerleri için alınan sinyal sayısına göre geçen süre                                | 129 |
| Şekil 6.18 | Farklı protokoller için ağ üzerinde hayatta kalan eleman sayısı                                      | 130 |
| Şekil 6.19 | Farklı protokoller için ağ üzerinde kalan enerji                                                     | 130 |
| Şekil 6.20 | Farklı protokoller için alınan sinyal sayısına göre geçen süre                                       | 131 |
| Şekil 6.21 | Alınan sinyal sayısına göre hayatta kalan eleman sayısı                                              | 132 |
| Şekil 6.22 | ICWAQ ve DE-LEACH için alınan zaman grafikleri                                                       | 132 |
| Şekil 6.23 | KAA Modelinin Modülleri                                                                              | 133 |

|            |                                                                     |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 6.24 | $n$ ve $z$ komşuluğunda hesaplanan tur zamanları (saniye cinsinden) | 136 |
| Şekil 6.25 | $k$ ve $t$ komşuluğunda hesaplanan tur zamanları (saniye cinsinden) | 136 |

## 1. BÖLÜM

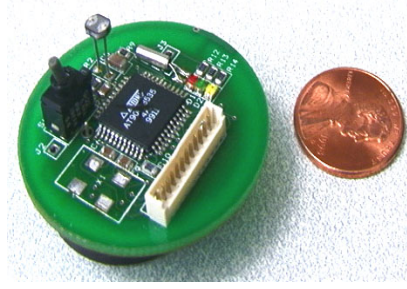
### GİRİŞ

#### 1.1. Tezin Literatürdeki Yeri

Düşük güç tüketiminde bulunan elektronik elemanların tasarımlarında ve kablosuz haberleşme teknolojisinde yapılan gelişmeler sayesinde küçük boyuttaki algılayıcı elemanların daha az maliyetle ve daha az enerji harcayacak şekilde üretilmeleri mümkün hale gelmiş ve bu konudaki çalışmalar artmıştır. Algılayıcı elemanlar, bulunduğu çevrede algılama yapabilmekte, basit hesaplamalar yapabilmekte ve yakın mesafede haberleşme yapabilmektedirler. Kapasitelerinin sınırlı olmasına rağmen, küçük boyuttaki bu elemanların çok sayıda bir araya getirilmesiyle Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA, Wireless Sensor Networks) olarak adlandırılan çok daha kapasiteli yeni bir teknolojik platform oluşturulur [1]. Bu ağlar üzerinde her bir eleman çevresindeki sıcaklık, nem, basınç gibi nicelikleri ölçebilme, basit hesaplama işlemleri yapabilme ve etrafındaki diğer noktalarla veya baz istasyonu ile haberleşme yapabilme özelliklerine sahiptir (Şekil 1.1). KAA'ların kullanıldığı uygulama alanlarına, çevresel görüntüleme, sağlık durumu takibi, taşıt izleme sistemi, askeri gözlem, orman yangını tespiti, çevre kirliliği analizi, sıcaklık, hareket, ses, ışık veya belirli nesnelerin mevcudiyetinin algılanması gibi çevresel durumların tespiti ve jeolojik uygulamalar örnek olarak verilebilmektedir [2-9].

KAA'lar birçok uygulamada kullanılmasına rağmen, sınırlı enerji kaynaklarına sahip olmaları, sınırlı hesaplama yapabilmeleri ve sınırlı haberleşme kapasiteleri bazı kısıtlamalara sahiptirler. KAA'lar üzerinde protokol tasarımında bu kısıtlamaların

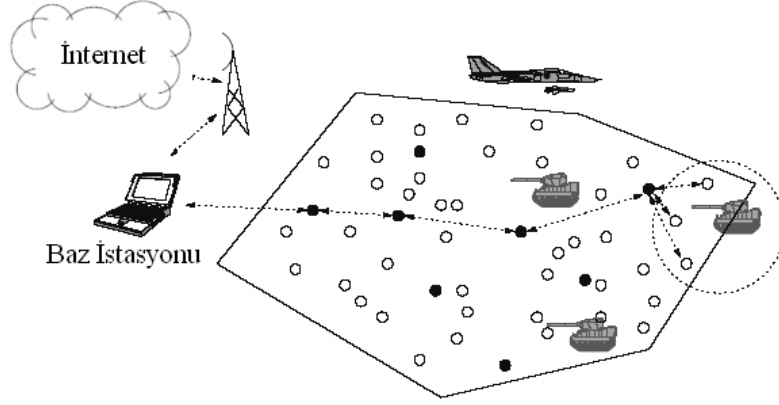
dikkate alınması zorunludur. KAA'lara özgü bu nitelikler, noktadan noktaya aygıtlar ve MANET'ler (Hareketli Plansız Ağlar - Mobile Ad-hoc Networks) için geliştirilen birçok yönlendirme tekniklerinin KAA yapılarında kullanılamamasına neden olmaktadır [10].



Şekil 1.1. Kablosuz algılayıcı elemanı [11]

Algılayıcı ağlardaki elemanların güç kaynakları değiştirilememekte ve bu durum ağın fonksiyonlarını sağlıklı bir şekilde yerine getirebileceği belirli bir “ağ ömrünün” olması anlamına gelmektedir. Enerji tüketiminin minimumda tutulması maksimum ağ ömrünü sağlanmasında dikkate alınan en önemli kriterdir. Enerji tasarrufunun sağlanmasının yanı sıra hata toleranslı haberleşmeyi gerçekleştirebilecek yönlendirme protokollerinin tasarımı da önemli bir kriter olmaktadır. Bununla birlikte küçük bant genişliğine ihtiyaç duyulması açısından protokoller, bölgesel iş birliğini gerçekleştirecek yeteneğe sahip olmalıdırlar. Bu durum kanal bant genişliğinin sınırlı olduğu düşünüldüğünde ayrı bir önem kazanmaktadır [2, 12].

Algılayıcı ağlarda, algılayıcı noktaların konumlandırılmaları rasgele şekilde (örn. bir uçaktan atılarak) veya belirli pozisyonlara (örn. bir kurumda yangın alarm algılayıcıları) yapılabilmektedir (Şekil 1.2). Bu algılayıcılar, bulundukları yere yerleştirildikten sonra herhangi bir bakım işlemi gerektirmemekte ve farklı tiplerde veri toplama işlemleri için muhtemel hatalara (algılayıcı hataları ve çevresel şartlar) karşı sistemi çalışır durumda tutabilmektedirler. Yapı itibarıyla algılayıcı noktalar küçük boyutta olup sınırlı enerji kaynaklarından (küçük bataryalardan) beslenmekte, sınırlı hesaplama işlemleri gerçekleştirebilmekte ve küçük bir bölge içerisinde haberleşme yapabilmektedirler. Bir algılayıcı noktasının küçük bir bataryayla uzun süre çalışması beklendiğinden hesaplama işlemleri ve iletişim becerilerinin optimum bir şekilde kullanması ve gereksiz enerji harcamalarının önüne geçilmesi KAA'lar için araştırma konuları olmaya devam etmektedir.



Şekil 1.2. Askeri bir uygulamada kullanılan kablosuz algılayıcı ağı

Algılayıcı ağlarda verinin algılanması ve raporlanmasının yöntemi uygulamanın kritik zamanlı (time critical) olup olmamasına göre belirlenir. Diğer bir ifadeyle, uygulama zaman bazlı (time driven) veya olay bazlı (event driven) olabilir. Periyodik veri transferi gerektiren durumlarda zaman bazlı uygulamalar kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalarda periyodik olarak algılayıcılar açılıp, ölçümler alınmakta ve veriler transfer edilmektedir. Olay bazlı uygulamalarda ise belirli bir olay karşısında (eşik sıcaklık değerine ulaşıldığında veya bir nesne algılandığında) veriler transfer edilmektedir. Bu tür uygulamalarda algılayıcı algılamaları daha az enerji çekecek ölçüde, az çözünürlükte çalıştırılmaktadır. Bir değişim algılandığında da algılayıcı çözünürlüğü artırılarak çevreden daha detaylı bilgi alınmaktadır [7].

KAA'larda haberleşme tek sekmeli (single hop) veya çok sekmeli (multiple hop) olarak yapılabilmektedir. Tek sekmeli haberleşmede, bir algılayıcı noktası bir diğer algılayıcı noktasına veya baz istasyonuna doğrudan haberleşme yapmaktadır. Çok sekmeli haberleşmede ise haberleşme bir dizi algılayıcı noktaları aracılığıyla bir noktadan diğerine gerçekleştirilmektedir. Tipik olarak, algılayıcı noktalarda haberleşme çok sekmeli olarak yapılmaktadır. Çok sekmeli olarak yapılan bir haberleşmede veri hedefe komşu elemanlar üzerinden iletilmektedir. Komşu elemanların enerjilerini dikkate alarak en iyi güzergah üzerinden verinin hedefe ulaştırılması problemi, KAA'larda yönlendirme probleminin temelini oluşturmaktadır [13].

## 1.2. Çalışmanın Amacı

Tez çalışmasının amacı, olay ve zaman bazlı KAA yapılarında mevcut yönlendirme yöntemlerine alternatif yeni yönlendirme yaklaşımlarının geliştirilmesini, KAA'ların yapısında yer alan sınırlamaları dikkate alarak klasik yönlendirme metotlarının bu ağlara uyarlanması, bu ağ yapılarında çalışacak etkin algoritmaların geliştirilmesini ve elde edilen sonuçlarla literatürdeki diğer tekniklerin performans karşılaştırmalarını içermektedir.

KAA'lar ile sayısız uygulama yapılmasına rağmen bu ağlar üzerinde herhangi bir protokol tasarımı dikkat edilmesi gereken birçok sınırlamalar mevcuttur. Tez çalışmasında geliştirilen protokollerde düşük enerji kaynakları, düşük işlemci güçleri ve kısıtlı haberleşme yetenekleri gibi KAA'lara özgü sınırlamalar göz önünde bulundurulmuştur. KAA'lar bakım gerektirmeyecek şekilde ağır çevresel şartlar içerebilen bölge (felaket bölgeleri gibi) üzerine dağıtılan sınırlı bataryalara sahip algılayıcı elemanlardan meydana geldiklerinden, ağın ömrünün olabildiğince maksimumda tutulması önemli olmaktadır. Geliştirilen protokollerle, enerji kullanımını optimize eden yönlendirme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca elemanların dağıtıldıkları bölgesel koşulların, algılayıcı elemanlar üzerinde oluşturabileceği muhtemel arızalar ve veri kayıpları durumu göz önünde bulundurulmuş ve kendini değişen şartlar dahilinde yeniden organize edebilecek yönlendirme topolojisinin oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada, ağ ömrünü maksimumda tutacak şekilde KAA yapısına özgü kriterleri dikkate alan optimum yönlendirme tekniklerinin geliştirilmesinde sezgisel optimizasyon metotlarından faydalanılması hedeflenmiştir. Bu metotlar arasında klasik bilgisayar ağ haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization, KKO) [14], ve özellikle kümeleme ve sınıflandırma çalışmaları olmak üzere birçok matematiksel test fonksiyonunda başarısı ispat edilmiş olan Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony – ABC) [15] algoritmalarından faydalanılması amaçlanmıştır.

Tezin 2. bölümünde, KAA'lar için geliştirilen yönlendirme teknikleri ve bu tekniklerin sınıflandırmaları yer almaktadır. Referans alınan sezgisel yönlendirme teknikleri ve

bunların diğer yöntemlerle olan performans kıyaslamalarına ise 3. bölümde yer verilmiştir.

Tezin 4. bölümünde, geliştirilen yönlendirme tekniklerinin performans analizi için gerçekleştirilen benzetim modeli ve programı fiziksel eşitlikler, örnekler ve sonuç şekiller üzerinde açıklanmıştır.

Tezin 5. bölümünde, olay tabanlı KAA'lar için geliştirilen yönlendirme protokollerine yer verilmiştir. EARACO (Energy Aware Routing using Ant Colony Algorithm for WSNs) ve IEARACO (An Improved version of Energy Aware Routing using Ant Colony Algorithm for WSNs) olarak adlandırılan bu protokoller dağıtık yapıda olay tabanlı olarak işletilen KAA yapıları için geliştirilen KKO tabanlı uyarlamaları içermektedir. Bu protokollerin yapısı ve işleyişi bu bölümde detaylı olarak açıklanmış, performans sonuçları alınmış ve farklı protokollerle karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasında olay tabanlı çalışan KAA'lardan farklı veri aktarımı işleyişine sahip olan kümeleme tabanlı KAA yapıları için ABC algoritmasına dayalı yeni yaklaşımlar da geliştirilmiştir. CWA (Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm), ICWA (an Improved version of Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm) ve ICWAQ (An Improved version of Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm considering Quality of service) protokolleri olarak isimlendirilen bu yaklaşımlar 6. bölümde detaylı olarak açıklanmış, performans verileri yaygın olarak kullanılan diğer protokollerle karşılaştırılmış, test sonuçları ayrıntılı olarak şekiller üzerinde gösterilmiş ve bu protokollere ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır.

Son bölümde ise tez çalışmasına ilişkin sonuç ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

## 2. BÖLÜM

### KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN GELİŞTİRİLEN YÖNLENDİRME TEKNİKLERİ

Kablosuz haberleşme yapan KAA yapıları için optimum yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi bu yapılarda ağ ömrünü belirleyen önemli bir çalışma alanı olmaktadır. Ağ katmanı çalışması olan yönlendirme işlemi mevcut bilgisayar haberleşme sistemlerinin bu yapılara uyarlanması gerektirmektedir. KAA yapılarında haberleşme hızının oldukça düşük ve enerjilerinin sınırlı olması nedeniyle bu yapılar üzerinde çalışacak algoritmaların basit (az kod, düşük hafıza gereksinimli) ve etkin (hızlı ve performanslı) olmaları gerekmektedir.

KAA'lar için herhangi bir protokol tasarımında dikkat edilmesi gereken birçok sınırlamalar mevcuttur. Bu sınırlamalardan bazıları aşağıda verilmiştir:

*Sınırlı enerji kaynağı:* KAA'lar küçük ölçekli bataryalardan beslenecek şekilde sınırlı enerji kaynaklarına sahiptir; bu yüzden enerji tasarruflu haberleşme protokolleri gereklidir.

*Sınırlı hesaplama yeteneği:* KAA'lar veri işlem hızları oldukça yavaş işlemciler kullandığı için hesaplama güçleri düşüktür, dolayısıyla karmaşık ağ protokolleri KAA'lar üzerinde kullanılamaz.

*Haberleşme:* Algılayıcı noktaları bağlayan kablosuz bağlantılar genelde sınırlıdır (düşük güçlerde ve iletişim sahası küçük olan haberleşme kullanılmaktadır) , bu yüzden algılayıcılar arası haberleşmede kısıtlamalar söz konusudur.

KAA'lar cep telefonu ağı gibi klasik kablosuz ağlardan farklılık göstermektedirler. İlk olarak, ağ üzerinde işlevlerin gerçekleştirilmesi için kullanılacak enerji kaynaklarının uzun bir süre idame etmesi, bakım gerektirmemesi ve sınırlı kullanılması gerekmektedir. İkinci olarak, klasik kablosuz ağlarda servis kalitesini (QoS) optimize edecek şekilde yönlendirme işlemi ve hareketlilik (mobility) yönetimi uygulanmaktadır. Burada enerji tüketimi ikinci planda yer almaktadır. Çünkü enerji kaynağı herhangi bir zamanda değiştirilebilmekte veya şarj edilebilmektedir. Halbuki, KAA'lar bakım yapılmayacak şekilde yerleştirilen algılayıcı noktalardan oluşurlar. Bu sebeple, ağın ömrünü uzatmayı amaçlayan yönlendirme işlemi, enerji kullanımını optimize etmektedir. Üçüncü olarak, KAA'lardaki algılayıcı noktaların, muhtemel birkaç mobil nokta dışında, yerleri genelde sabittir. Dördüncü olarak, KAA'lar üzerinde düşük veri hızlarına sahip yinelenen veri transferleri gerçekleştirilmektedir. Bu veriler, muhtemel veri kayıpları için yedek amaçlı olarak da kullanılabilirler.

Yaygın olarak kullanılan MANET (Mobile Adhoc Networks)' ler gezici olarak hareket eden (örneğin telsiz iletişim aygıtları, uçaklar, gemiler, vb.) haberleşen elemanların oluşturduğu kablosuz bir ağ yapısıdır. MANET'ler ve KAA'lar bazı ortak problemleri paylaşırlar. Bunlar arasında kablosuz bağlantıların zamanla değişim gösteren karakteristikleri; sınırlı güç kaynakları; muhtemel bağlantı hataları; sınırlı kaynakları (örn. band genişliği); çok sekmeli haberleşme ve ağ alanı içerisindeki noktaların ad hoc (yama) türünde yerleştirilmeleri yer almaktadır. Ad hoc haberleşme, altyapı gerektirmeyen ağlar için kullanılmaktadır. Bu ağlarda, kullanıcılar hareket halinde iken ağ servislerinden faydalanırlar. Bu tip ağların temel özelliği sabit ağ alt yapısının olmaması ve hareketliliğidir. Bununla birlikte ağ üzerinde her hareket, ağ topolojisini ve veri iletim yönünü etkilemektedir. Bu tip ağlar genelde diz üstü bilgisayarları ve el bilgisayarları için uygun yapıdadırlar. Ad hoc ağ yapısı oldukça eski bir teknolojidir ve 1970' lerden itibaren askeri amaçlı olarak dinamik kablosuz ağ yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. MANET'ler ise Ad hoc yapıları içerisinde yer alan hareketli elemanlar için etkin ağ trafiğinin sağlanması amacıyla geliştirilen daha yeni bir çalışma konusudur [16, 17]. KAA'lar ve ad hoc yapılar arasındaki başlıca farklılıklar özetlenecek olursa:

- KAA'larda algılayıcı nokta sayıları ad hoc yapılardaki haberleşme elemanları sayılarından fazladır.
- Algılayıcı noktaların yerleşim yoğunlukları ad hoc yapılardan daha yoğundur.

- Algılayıcı noktalardaki bozulma eğilimi ad hoc yapılardan daha fazladır.
- Algılayıcı ağlarında ağ hiyerarşisini belirleyen topoloji daha sık değişmektedir.
- Algılayıcı noktaları temelde yayın yaparak haberleşir, ad hoc yapılarda ise bu noktadan noktaya haberleşmeyle sağlanır.
- Algılayıcı noktalar enerji, hesaplama kapasitesi ve hafıza olarak sınırlıdır.
- Algılayıcı noktalar global bir kimlik içermeyebilirler.

KAA'lar ve MANET' ler çok sekmeli haberleşme yapımlarına rağmen, yönlendirme istemleri bazı bakımlardan farklılık arz etmektedir. Bu farklılıklar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- KAA'larda bilginin gittiği hedef bellidir ve haberleşme normalde, baz istasyonuna çoklu veri kaynaklarından yapılır. Halbuki, MANET'lerde haberleşme genellikle noktadan noktaya yapılmaktadır.
- KAA'larda bir olay karşısında, olaya yakın bölgelerde bulunan algılayıcı noktalar ortak/benzer davranışlar göstermekte ve veriler bu çevredeki birçok algılayıcı tarafından toplanmaktadır. Bu nedenle veride yinelenen bilgi olması kuvvetle muhtemeldir.
- MANET'ler serbest nokta hareketlerini sağlamak amacıyla yüksek derecede dinamik topolojilerle karakterize edilmişlerdir. KAA uygulamaların birçoğunda algılayıcılar hareketli değildir.
- MANET'lerdeki hareketli noktaların enerji kaynakları (örn. bataryaları) yinelenabilir veya şarj edilebilir. KAA'larda çok sayıda algılayıcı noktası kullanılması, bakım işlemleri gerektirmeme özelliği ve uzun çalışma zamanı beklentisi önemli ölçüde sınırlı enerji kaynaklarının çok iyi yönetilmesini gerektirmektedir. Bununla birlikte, sınırlı enerji kaynakları KAA'larda hızlı veri transfer oranlı haberleşmeye engel olmaktadır.

Bahsedilen bu nedenlerden dolayı MANET için literatürde önerilen birçok noktadan noktaya yönlendirme yöntemleri KAA'lar için uygun değildir.

## **2.1. KAA' ların Yönlendirmesinde Amaçlanan Konular**

KAA'ların yönlendirilmesinin temel amaçlarından biri ağ ömrünü artırmak ve yoğun enerji yönetimi tekniklerini kullanımıyla ortaya çıkabilecek bağlantı hatalarını

önlemektir. Algılayıcı noktaların konumlandırılmaları genelde önceden belirlenmemekte ve zor coğrafya bölgelerine veya afet bölgelerine rasgele yerleştirilmektedirler. Bu ise, algılayıcı noktaların herhangi bir bakım veya düzenleme yapılmaksızın, uzun süre sınırlı kaynaklarıyla algılama ve iletişim yapabilmelerini gerektirmektedir. Dolayısıyla, yüksek kalitede algılama ve hatasız çalışma için algılayıcı noktalar arasında önemli ölçüde dayanışma ve işbirliği gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Bir algılayıcı ağına klasik bir ağ protokolünün uygulanamamasının nedenleri şu şekilde özetlenebilir [7]:

1. Algılayıcı noktalar kendi kendine organize olabilmelidir. Çünkü bu noktaların ad hoc türde yerleştirilmeleri, sistemin meydana gelen yerleşim dağılımına uygun bağlantılar oluşturmasını ve çalışır duruma getirmesini gerektirmektedir.
2. Birçok uygulama senaryosunda, algılayıcı noktalar sabittir (durağandır). Ancak bazı uygulamalarda, bazı algılayıcı noktalar (düşük bir hareketlilikte de olsa) konumlarını değiştirebilmektedirler.
3. Algılayıcı noktalar uygulama bağımlıdır. Bir algılayıcı ağının tasarım gereksinimleri uygulamaya göre değişebilir. Örneğin algılama ve haberleşmenin hızlı yapılmasını gerektiren bir askeri araç gözlemiyle, periyodik bilgi transferinin yapıldığı hava durumu gözlemi için tasarım gereksinimleri birbirinden oldukça farklıdır.
4. KAA'lardaki algılayıcılar tarafından toplanan veri ortak bir olay nedeniyledir. Dolayısıyla bu verilerde bazı yinelenen bilgi olması muhtemeldir. Bu yüzden kaynaklardan verilerin hedefe ayrı ayrı gönderilmesi yerine, ağ içerisinde bir noktada toplanması (data aggregation) daha az enerji tüketimi açısından önemlidir. Ayrıca bu toplayıcı noktalar gereksiz verileri elimine de edebilirler.
5. Algılayıcı ağları veri merkezli (data-centric) ağlardır. Klasik ağlarda veri sabit bir noktadan istenmektedir. Algılayıcı ağlarında ise veri belirli özellikleri baz alarak istenmektedir. Algılayıcılar normal durumlarda uyku modunda olabilirler, kalan birkaç algılayıcı az enerji harcayacak durumda veriyi düşük kalitede algılama modunda olabilmektedir. Bir olayın gerçekleşmesi durumunda da sistem kendisini daha yüksek kalitede algılama yapabilecek şekilde organize yapabilmektedir (olaya yakın algılayıcıların çalıştırılması gibi).
6. KAA'larda haberleşen elemanlar klasik sistemlere nazaran daha çok sayıdadırlar (örn. binlerce). Bu yüzden algılayıcı noktalar kendilerine ait tek bir ID (kimlik

belirteci) kullanmazlar. Veri merkezli KAA'larda, verinin kendisi bu veriyi kimin gönderdiğinden daha önemlidir.

7. KAA'lar özellik bazlı adresleme kullanırlar. Kullanıcı, özellik-değer çiftlerinin belirttiği sorgular kümesinden oluşan bir özellik-değer adresini talep eder. Örneğin, sorgu [sıcaklık > 60°C] ise, algılayıcı nokta algıladığı sıcaklık bilgilerinden sadece 60°C' nin üstündeki değerler için raporlama yapacaktır.
8. Veri toplama bölgeye göre yapıldığı için pozisyonun bilinmesi önemlidir. Günümüzde yer belirleme sistemlerinin (Global Positioning System, GPS) donanımları bu amaç doğrultusunda kullanılamayabilir. Bunun yerine üçgenlere bölme metoduyla [18] yeri bilinen birkaç noktanın radyo sinyallerinin genliğinin ölçülmesiyle yaklaşık olarak kendi konumlarının tespiti mümkün olmaktadır. Bu birkaç nokta ise pozisyonunu GPS ile algılamaktadır. Buna rağmen GPS kullanımı KAA'ların yerleşim problemlerinde çok uygun bulunmamaktadır [19].

KAA'larda etkili yönlendirme protokollerinin tasarım ve yerleştirilme konularında hala birçok problemle karşılaşmaktadır. Ayrıca, klasik bilgisayar ağlarında gerçekleştirilen şifreli kodlarla paketleme (encryption) gibi bazı güvenli iletişim tekniklerinin KAA'lar üzerine uygulamalarının da gerçekleştirilmesi gerekli olmaktadır [20].

## 2.2. KAA'ları Yönlendirmede Dikkate Alınması Gereken Faktörler

Yönlendirme protokollerinin tasarımında dikkate alınması gereken birçok faktör vardır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir [7]:

1. *Plansız yerleştirilme:* Algılayıcı noktalar genelde rasgele dağıtılmaktadır. Sistem oluşan dağılımdan bağlantıları kurabilmeli ve kendisini çalışır hale getirebilmelidir. Algılayıcı noktalardaki hatalar nedeniyle bağlantılar yeniden düzenlenebilmeli ve sistem ağ üzerindeki değişimlere karşı adaptif yapıda olmalıdır.
2. *Enerji tüketimi:* Algılayıcı noktalar sınırlı enerji kaynaklarını kullanarak hesaplamalar yapmak ve kablosuz haberleşmek durumundadır. Dolayısıyla enerji tasarruflu haberleşme ve hesaplama önem kazanmaktadır. Algılayıcı noktalarda enerji harcanmasının en fazla haberleşme işlemlerinde yapılmaktadır [17]. Çok sekmeli bir KAA' da, her bir nokta veri gönderici ve yönlendirici olarak çift görevi üstlenmektedir. Enerji kaynaklarının tükenmesi gibi

problemlerden dolayı algılayıcı noktalarda meydana gelebilecek hatalar, ağ üzerinde önemli topoloji değişimlerine ve paketlerin yeniden yönlendirilmesi ve ağın yeniden organizasyonuna neden olabilmektedir.

3. *Hesaplama yetenekleri:* Algılayıcı noktalar sınırlı hesaplama gücüne sahip olduğundan karmaşık ağ protokollerini çalıştırmayabilirler. Dolayısıyla yeni veya klasik yönlendirme protokollerinin basit versiyonları KAA için gereklidirler.
4. *Haberleşme sahası:* Algılayıcılar arası haberleşme kısa mesafeler için geçerli olmaktadır. Bu yüzden bir yönlendirme birçok kablosuz haberleşme sekmelerinden oluşmaktadır.
5. *Hata toleransı:* Bazı algılayıcı noktalar, güç eksikliği, fiziksel hasar veya çevresel etkenlerden dolayı bozulabilirler veya bloke olabilirler. Algılayıcı noktalarda meydana gelebilecek bu hatalar, sistemin genel işlevini etkilememelidir. Eğer çok sayıda noktada bozulmalar olursa MAC (Media Access Address – Ortam Erişim Adresi) ve yönlendirme protokolleri birlikte çalışarak yeni bağlantılar kurmalı ve verileri baz istasyonuna yönlendirmelidirler. Enerji tasarrufunun sağlanması amacıyla daha fazla enerjinin bulunduğu ağ bölgelerini kullanan yönlendirmeler yapılarak da ağ ömrü artırılabilir. Ayrıca hata toleranslı algılayıcı ağları için çoklu seviyede yineleme seviyeleri<sup>1</sup> kullanılması gerekebilir.
6. *Kapasite kullanımının ayarlanabilirliği:* Algılama bölgesine konumlandırılan algılayıcı noktaların sayısı yüzlerce, binlerce veya daha fazla olabilir. Bu büyük sayılarla çalışabilmek için bir şema gerçekleştirilmelidir. Ayrıca ağ büyüklüğünde, nokta yoğunluğunda veya topolojideki değişimler algılayıcı noktaların işlevlerini etkilememelidir. Bununla birlikte, algılayıcı ağlarının yönlendirme protokolleri, çevredeki olaylara gösterilecek yeterli tepkiler<sup>2</sup> için ayarlanabilir olmalıdır. Bir olay meydana gelene kadar, algılayıcıların çoğu uyku (sleep) modundadır. Kalan diğer az sayıdaki algılayıcı kaba bir algılama

---

<sup>1</sup> Bilgi kayıplarının önüne geçmek için veri, farklı güzergahlardan yinelenerek gönderilmektedir.

Yinelenen verilerin miktarı bu işlemin seviyesini ifade etmektedir.

<sup>2</sup> Buradaki yeterli tepkilerden kasıt, olayın büyüklüğüne göre işlem yapması gereken algılayıcı sayılarıdır. Daha çok sayıdaki algılayıcı o bölgedeki olay için daha ayrıntılı bilgi toplayabilmektedir.

yapmaktadır. Olayın gerçekleşmesinin algılanmasından sonra ise sistem daha kaliteli algılama için kendini konfigüre edebilmelidir.

7. *Donanımsal kısıtlamalar:* Bir algılayıcı noktası birçok donanımsal elemanlar içerecek şekilde bir santimetre küpten daha küçüktür. Buna rağmen çevreye uyum sağlayabilmeli ve fonksiyonlarını düzgün bir şekilde gerçekleştirebilmelidir.
8. *Haberleşme ortamı:* Bir çok sekmeli algılayıcı ağda, haberleşme noktalarının bağlantıları kablosuz ortamda gerçekleştirilmektedir. Kablosuz bir haberleşme kanalında karşılaşılan klasik problemler (örn. sönümlenme, yüksek hata oranı) algılayıcı ağlarının işlevlerinde de etkili olmaktadır. Genelde algılayıcı verilerinin ihtiyaç duyulan bant genişliği düşüktür (1-100 Kb/s). Haberleşme ortamına ilişkin tasarım konusu ortam erişim kontrolüdür (Media Access Control, MAC). Algılayıcı ağlar için MAC tasarımında geliştirilen bir yaklaşım olan CSMA (Carrier Sense Multiple Access) gibi içerik tabanlı (contention based) bir protokol yerine TDMA (Time Division Multiple Access) gibi daha fazla enerji tasarrufu sağlayabilen bir protokol önerilebilir [21]. TDMA tabanlı protokoller düz ağlarda (flat network) performanslı çalışmasına rağmen kümelenendirilmiş (clustered) KAA'larda doğrudan çalıştırılamamaktadır. Hiyerarşik KAA'larda TDMA protokolünde yapılacak olan uyarlamalar (algılayıcı ağları büyüklüğü ve yapılarına göre) önemli bir araştırma konusu olmaktadır. KAA'larda algılayıcılar haberleşme için Bluetooth gibi bir kablosuz haberleşme protokolü kullanabilmektedirler. Bluetooth; ekonomik, basit yapıda, sabit ve mobil uygulamalarda küçük mesafeler için ses ve veri iletiminde radyo haberleşmesini kullanmaktadır.
9. *Bağlantı:* Algılayıcı ağlardaki yüksek nokta yoğunluğu, algılayıcıların birbirlerinden izole edilmesine engel olmaktadır. Dolayısıyla algılayıcı noktalardaki bağlantılar yüksek seviyededir. Buna rağmen çeşitli nedenlerden dolayı algılayıcı nokta hatalarının yol açtığı ağ topolojisi ve ağ büyüklüğünün değişken olmasının önüne geçilememektedir.
10. *Kontrol iş yükü:* MAC haberleşmede meydana gelebilen çakışmalar (collision) nedeniyle kablosuz ortamda yapılan yinelenen veri iletimlerinin artması gecikmelerin ve enerji tüketimlerinin artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla

nokta yoğunluğunun artmasıyla doğrusal olarak kontrol paketi iş yükü de artmaktadır.

*11. Servis kalitesi (QoS):* Bazı uygulamalarda veri algılandıktan sonra belli bir süre içerisinde hedefe ulaştırılmalıdır. Aksi taktirde bu bilginin bir önemi kalmayacaktır. Bu yüzden zaman-kısıtlı (time-constrained) uygulamalarda sınırlı gecikmeler istenmekte ve veri iletimi için dikkat edilmesi gereken diğer bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Algılayıcı noktalar genelde bir algılayıcı alanı içerisine dağıtılırlar. Ağ üzerindeki noktalar fiziksel ortam hakkında yüksek kalitede bilgi almak için işbirliği içinde çalışırlar. Her bir algılayıcı noktası, görevi doğrultusunda sahip olduğu bilgiyi, hesaplarını, haberleşme işlemlerini ve enerji kaynaklarını baz alarak karar oluşturur. Dağıtılmış algılayıcı noktaların her biri veriyi toplama ve bu veriyi baz istasyonuna yönlendirme yeteneğine sahiptir. Baz istasyonu ise sabit veya mobil olabilir. Algılayıcıların oluşturduğu ağ mevcut bir haberleşme altyapısı veya internetle bağlantı içerisinde olan harici bir ağa erişim yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu sayede, kullanıcı ağ üzerinde raporlanan verilere ulaşabilmektedir.

### **2.3. KAA'lar için Geliştirilen Yönlendirme Protokollerinin Türleri**

Algılayıcı ağlarda veri iletiminin kalitesi hususunda ağ performansından ziyade ağ ömrüyle ilişkili olan enerji tasarrufu dikkate alınan en önemli kriterdir. Enerji tükendikçe, ağ kendi ömrünü artırmak için noktalardaki enerji harcamasını azaltmakta ve kaliteden taviz verebilmektedir. Dolayısıyla enerji tasarrufu ağ performansından daha önemli görülebilmektedir.

Son zamanlarda KAA için yönlendirme protokolleri üzerine ciddi araştırmalar yapılmaktadır [2, 12, 13]. Genel olarak KAA'ların yönlendirme teknikleri düz, hiyerarşik, adaptif ve sezgisel tabanlı yapılar olarak sınıflandırılabilir. Düz yönlendirmede bütün noktalar eşit rollere sahipken, hiyerarşik yönlendirmede noktalara farklı roller tahsis edilmiştir. Adaptif yönlendirmede, belli sistem parametreleri ağın mevcut durumuna ve elverişli enerji seviyesine göre kontrol edilmektedir. Ayrıca bu protokoller de çok yollu (multipath), sorgulama tabanlı (query based) veya görüşme tabanlı (negotiation based) yönlendirme teknikleri olarak da işlevleri dikkate alınarak

sınıflandırılabilirler. Bu tez çalışmasında ağın işleyiş yapısına (çok sekmeli, kümeleme tabanlı, vb.) ve kullanılan yönlendirme kriterlerine (enerji sarfiyatı, zaman, vb.) göre sınıflandırma yapılacaktır [1, 2, 7].

### 2.3.1. Düz Yönlendirme

Düz yönlendirmeye en basit örnek doğrudan haberleşme ile baz istasyonunda verilerin toplanmasıdır. Bir diğer temel yöntem ise yayılım (flooding) yöntemidir [22]. Yayılım yönteminde veriler komşu elemanlar üzerinden yayılarak baz istasyonuna iletilmektedir. Veriyi bütün ağ üzerinden yayınlamak çok fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Ayrıca yüksek bant genişliğine de ihtiyaç duyulmaktadır. İhtimale dayalı bir yayınlama yöntemi olan “dedikodu” tekniği ile enerji ve bant genişliği tasarrufu bir ölçüde sağlanmaya çalışılır. Ancak verinin rasgele güzergahlardan baz istasyonuna ulaşmaya çalışması enerji sarfiyatına neden olan bir unsur olabilmekte ayrıca veri kayıplarına da yol açabilmektedir [22, 23].

Düz yönlendirmeye ait bilinen en iyi yöntemlerden birisi Yönlendirilmiş yayılım (Directed diffusion) algoritmasıdır [24]. Yönlendirilmiş yayılım, enerji tasarrufunu gerçekleştirmek üzere geliştirilen veri-merkezli (data-centric) bir yönlendirme tekniğidir. Bunun için deneysel olarak uygun veri yollarının seçilmesi, ağ üzerinde veri tamponlaması ve veri işleme görevleri gerçekleştirilmektedir. Operatör bir bölgede meydana gelen bir olay karşısında, bu olaya ait bilgi almak için bu bölgedeki nokta algılayıcılara, öncelikle ilgilendiği verinin kimliğini belirtir ilgi (interest) mesajları yayımlar. Daha sonra olayın gerçekleşmesi durumunda daha önceden bu ilgi mesajını alan algılayıcı noktaları olaya ilişkin veriyi, ilgi mesajının geliş güzergahına ters bir yönde merkeze ulaştırırlar. Veri merkeze giderken farklı algılayıcı noktalardan gelen bilgiler ara algılayıcı noktalarca toplanıp doğrudan veya işlenip merkeze daha anlamlı veri olarak gönderilebilirler. Bu işleme, veri toplama ve işleme (data aggregation and processing) adı verilir. Güzümlü yayılım veri transferini bölgesel olarak yani komşuluklar aracılığıyla yapmaktadır. Bu tekniğin kullandığı temel elemanlar ise; ilgi mesajları, veri mesajları, gradyentler ve kuvvetlendirme işlemleridir.

### 2.3.2. Kümeleme Tabanlı Yönlendirme

Kümeleme tabanlı yönlendirme ilk olarak kablolu ağlarda önerilmiştir. Sistem kapasitesinin ayarlanabilmesi ve verimli haberleşmeyi sağlayan avantajlar içermektedir. Bununla birlikte bu yönlendirme kavramı, kablosuz algılayıcı ağlarında verimli enerji kullanımlı yönlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bir kümeleme tabanlı mimaride, az enerjili noktalar hedefle ilgili algılamalar yaparken yüksek enerjili noktalar bilgiyi işleme ve iletme görevini üstlenirler. Bu ise, kümelerin oluşturulması ve kümenin baş elemanlarına (cluster head) özel görevlerin tahsisıyla kapasitenin ayarlanabilirliğini, ağ ömrünün artırılmasını ve enerji verimliliğini sağlamaktadır.

Heinzelman [25], algılayıcı ağları için düşük enerjili adaptif kümeleme hiyerarşisi (low energy adaptive clustering hierarchy-LEACH) isminde hiyerarşik kümeleme algoritmasını önermiştir. LEACH, dağıtılmış küme oluşumunu içeren küme tabanlı bir protokoldür. Daha az enerji tüketimi için kümelerin baş elemanlık rolü rasgele bir şekilde dönüşümlü olarak verilir ve enerji harcaması ağdaki algılayıcılara paylaştırılır. LEACH, kapasite ayarlanabilirliği ve dinamik ağlardaki gürbüzlüğü (robustness) sağlamak üzere yerel bir koordinasyon kullanır ve baz istasyonuna gönderilecek bilgi miktarını azaltmak üzere veri birleştirmesini (data fusion) gerçekleştirir. Ayrıca çalışmada küme içi ve kümeler arası çarpışmaları azaltmak amacıyla TDMA/CDMA MAC kullanılmaktadır.

LEACH protokolü ağ ömrünü artırmasına rağmen bu protokolde bazı kabuller tartışma konusudur. LEACH, her bir nokta elemanın baz istasyonuyla haberleşme yapabileceğini ve farklı MAC protokollerini gerçekleştirebilecek kapasiteye sahip olduğunu kabul eder. Ayrıca her nokta sürekli haberleşme yapmak durumunda ve birbirine yakın noktalar sürekli aldığı verileri doğrulamak durumunda olmaktadır. Üstelik küme baş elemanlarının ağ içerisinde nasıl düzgün dağılımla yayılacağı açıkça belirtilmemiştir. Küme baş elemanlarının ağ içerisinde bir bölgede toplanma ihtimaline karşın ağdaki bazı noktalar yakınlarında baş eleman bulamayacaklardır. Son olarak her bir nokta için baş elemanların aynı seviyede enerji harcadıkları düşünülmüştür. Protokol, enerji seviyelerine de dikkat edecek şekilde düzgün dağılımlı enerji noktalarının sağlanması amacıyla geliştirilmelidir.

Heinzelman ve arkadaşları LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) protokolünde gereksiz haberleşmenin önüne geçmek için her bir transferde farklı verilerin iletilmesini sağlayacak bir iyileştirme yapmışlardır. LEACH protokolünü geliştiren araştırmacılar, küme başkanlarının baz istasyonunca merkezi olarak belirlenmesi için LEACH-C protokolünü de önermişlerdir [26]. PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [27] protokolü, LEACH protokolünü referans alarak enerji tasarrufunu gerçekleyecek şekilde ilave metotlarla oluşturulan bir çözümdür. [28] nolu referansta verilen LEFC (Low-Energy Fixed Clustering) protokolü de kümeleme tabanlı olarak geliştirilen bir diğer metot örneğidir. LEACH-C, PEGASIS ve LEFC algoritmaları LEACH algoritmasına kıyasla ağ ömrünü artıracak şekilde daha başarılı sonuçlar üretmişlerdir. Ancak, bu protokollerin işletilebilmeleri için GPS gibi yer tanımlama sistemlerinin kullanılması zorunlu bulunmaktadır.

### 2.3.3. Adaptif Yönlendirme

Heinzelman [29] ve Kulik [30], SPIN (Sensor protocols for information via negotiation) adı verilen adaptif protokol ailesini önermişlerdir. Bu protokoller, her bir noktadaki bilgiyi ağ üzerindeki bütün noktalara (sanki her bir nokta baz istasyonuymuş gibi) yayarlar. Bu ise kullanıcının herhangi bir noktayı sorgulama yapmasına ve gereken bilgiyi hemen almasına izin verir. Birbirine yakın noktalar benzer veri içermektedir. SPIN protokolleri benzer verilerin yayılmasını engelleyerek farklı olan bilgilerin diğer noktalara yayılmasını sağlarlar.

SPIN protokol ailesi veri görüşmeleri (data negotiation) kullanırlar ve adaptif olarak kaynakları kullanırlar. Noktalar topladıkları veriler hakkında bunların özelliklerini belirten metadatalar (veri tanımlayıcı) kullanırlar. Bir veriyi tamamen transfer etmeden metadata görüşmeleri gerçekleştirilir. Bu sayede ağ içerisinde gereksiz veri transferi yapılmamış olur. Metadata formatı uygulamaya bağlıdır ve SPIN'de belirtilmemiştir. Ayrıca SPIN, kalan enerji seviyesine göre hareket etmektedir. Bu protokoller zaman-bazlı (time-driven) olarak çalışır ve kullanıcı istemese bile bilgiyi ağ üzerine yayarlar.

SPIN ailesi temel yayılım algoritmasının (flooding) eksikliklerini görüşmeler ve kaynak adaptasyonu ile kapatacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sınıftaki protokoller, her defasında

verilerin tamamının gönderilmesi yerine bunları tanımlayan özelliklerin gönderilmesiyle enerji tasarrufu elde etmeye çalışırlar. Ancak SPIN protokolünde veri iletimini garanti eden bir mekanizma yoktur. Çok yollu haberleşmede verinin baz istasyonuna ulaşması daha başarılı olmaktadır.

Tillett ve arkadaşları [31] tarafından önerilen çalışmada PSO (Particle Swarm Optimization) olarak bilinen optimizasyon tekniği ile algılayıcı noktaların kümelenmesi probleminin çözülmesi hedeflenmiştir. Önerilen yaklaşımda alınan verilerin maksimize edilmesi sağlanırken harcanan enerji minimumda tutulmaya ve nokta sayıları ile baş eleman sayıları dengede tutulmaya çalışılmıştır.

LEACH protokolünde kümelerin baş elemanları her turda rasgele bir şekilde seçilmektedir. Bu ise verimli olmayan bir ağ yapısının oluşmasına neden olabilmektedir. Kümelerin baş elemanlarının merkezi olarak seçilmesi ısıtım işlemi algoritması (simulated annealing) kullanılarak da yapılmıştır [32]. Burada her nokta kendi pozisyonu ve enerji seviyesini merkeze göndermekte ve bu bilgilere göre seçim işlemi yapılmaktadır.

#### **2.3.4. Çok Yollu Yönlendirme**

Bir protokolün esnekliği kaynaktan hedefe giden ana güzergahın bozulması durumunda alternatif yolların mevcudiyetiyle ölçülmektedir. Bu ise kaynaktan hedefe giden yolların sayısının, enerji maliyeti artsa da artırılması ve bu yolların canlı tutulması için periyodik mesajların gönderilmesiyle gerçekleştirilir.

Ganesan ve çalışma arkadaşları [33] işlem yükünü (overhead) azaltmak için birbirinden ayrık çoklu yollar yerine birbirlerine yakın kordon (braided) veri yollarını kullanmışlardır. Kordon veri yollarındaki alternatif güzergahlar ana güzergaha yakın olduğundan dolayı enerji harcaması bu tip yollarda daha az olmaktadır.

Chang ve Tassiulas [34] çalışmalarında güzergahlar içerisinde en fazla enerji ihtiva eden yolu seçmeye çalışan algoritma önermişlerdir. Ana güzergahtaki noktaların enerjileri belli bir seviyenin altına düştüğü durumda, yedek güzergahlardan haberleşme sağlanacak şekilde ağ ömrü artırılmaya çalışılmaktadır.

### 2.3.5. Sorgulama Tabanlı Yönlendirme

Sorgulama tabanlı yönlendirmelerde hedef nokta ağ içerisine algılama işlemiyle ilgili bir sorgu göndermektedir. Daha sonra bu sorguya uyan veriyi içeren algılayıcı, hedef noktaya istenen veriyi iletmektedir. Genelde bu sorgulamalar yüksek seviyeli bir dille tanımlanmaktadır. Örnek olarak, C1 istemcisi, N1 noktasına “1 bölgesinde hareket eden taşıt var mı?” diye bir sorgu gönderebilir. Güzümlü yayılım bu tipte bir protokoldür.

### 2.3.6. Görüşme Tabanlı Protokoller

Bu protokoller görüşmeler aracılığıyla gereksiz veri iletiminin engellenmesi için yüksek seviyeli veri tanımlayıcıları (data descriptors) kullanmaktadır. Haberleşme yapma kararı kalan enerji miktarına göre de belirlenmektedir.

SPIN ailesi protokolleri görüşme tabanlı protokoller içinde bir örnektir. Veri yayılımında bazı veriler birbirinin aynısı olabilir veya bazıları diğerlerini de içerebilir. Bu verilerin ayrı ayrı gönderilmesi yerine öncelikle veri tanımlamalarının gönderilmesi ve daha sonrada birbirinden farklı kısımlarının talep edilmesi ile kontrol edilmektedir. Dolayısıyla görüşme tabanlı yönlendirmede aynı içerikli veriler sıkıştırılmakta ve gereksiz veri gönderiminin önüne geçilmektedir.

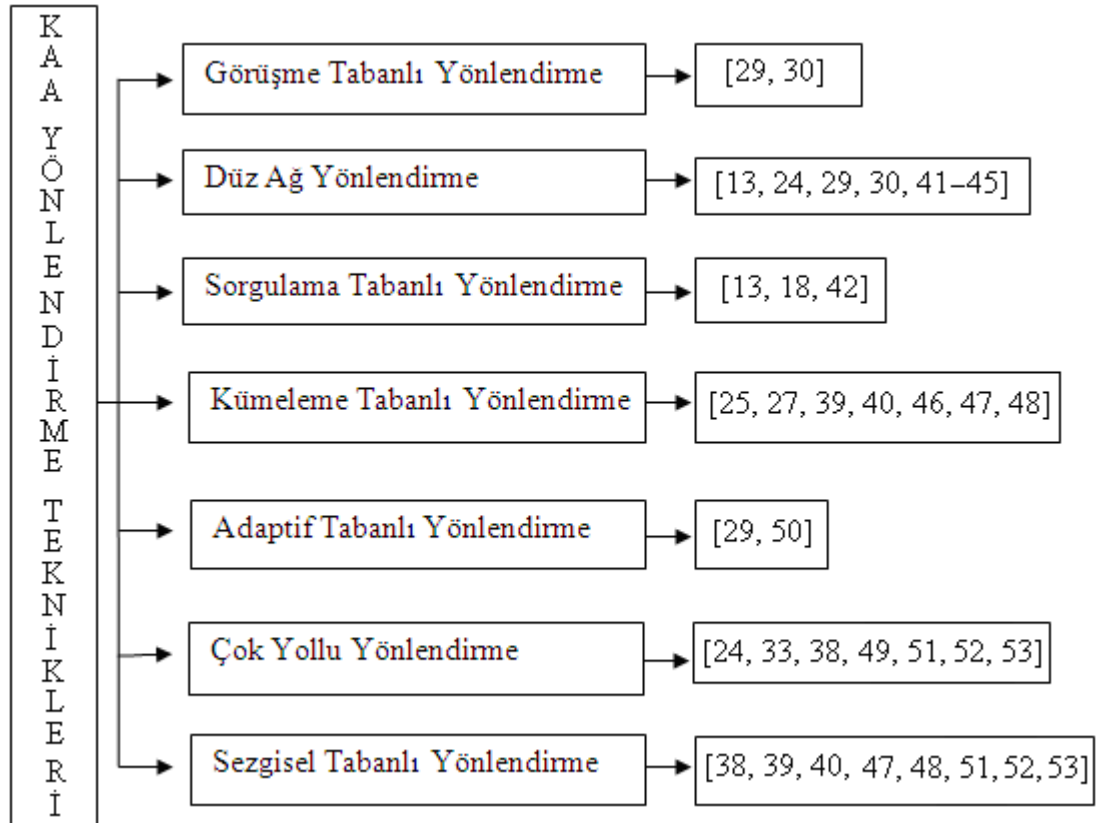
### 2.3.7. Sezgisel Tabanlı Yönlendirme Teknikleri

Bu tür tekniklerde ağ ömrünü artırmak için enerji tasarrufunu sağlayacak şekilde verinin baz istasyonuna en uygun yollardan iletimi bir optimizasyon problemi olarak modellenmektedir. Optimizasyon problemlerinin çözümünde canlıların genetik gelişimini, karıncalar ve arılar gibi işbirliği içerisinde çalışan canlıların davranışlarını model alarak geliştirilen modeller referans alınarak geliştirilen algoritmalar kullanılmaktadır. Karıncaların davranışlarını referans alan Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) algoritması birçok klasik bilgisayar haberleşmesinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [35].

Singh ve arkadaşları tarafından KAA yapıları için karınca algoritması tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir [36]. KAA'lara özgü sınırlamaların geliştirilen yaklaşımda

dikkate alınmaması, uygulamada ağ ömrünün kısa olmasına neden olan problemleri doğurmaktadır. Zhang ve arkadaşları karınca algoritması tabanlı bir yaklaşımı gerçekleyen SC (Sensor Driven Cost Aware Ant Routing), FF (Flooded Forward Ant Routing) ve FP (Flooded Piggypacked Ant Routing) olmak üzere üç yönlendirme algoritmasını geliştirmişlerdir [37]. SC ve FF algoritmalarında gecikme (latency) problemleri görülebilmektedir. FP algoritmasında ise fazla enerji tüketimi sorunu ile karşılaşılabilir. EEABR protokolü ise algılayıcıların enerji seviyelerini ve yolların uzunluklarını dikkate alarak geliştirilen KKO tabanlı bir yöntemdir [38]. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Genetik Algoritma (GA) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) gibi sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılarak ağ ömrünü artıracak yeni yöntemler üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır [39, 40].

Şekil 2.1 üzerinde literatürde yer alan popüler yönlendirme teknikleri gruplandırılmıştır.



Şekil 2.1. Yönlendirme tekniklerinin gruplandırılması

#### 2.4. KAA Yönlendirme İşleminde Hedeflenen Çalışma Konuları

KAA'ların gelecek vizyonuna fiziksel olaylar için çok sayıda ayırık elemanın kullanılması, yoğun algılama işlemleri ve yüksek seviyede işlemleri gerçekleştiren ağ oluşumlarının algılayıcılarca koordineli olarak yapılması gösterilebilir. KAA'ların yönlendirilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen hala bazı konular etkili yönlendirme protokollerinin çözümü için çalışılmayı beklemektedir. Fiziksel ortama algılayıcıların bir daha bakım yapılmayacak şekilde yerleştirilmesi bu konulardan birisidir. Bu durum klasik internet, PDA (Personal Digital Assistant, el bilgisayarı) ve diğer mobil uygulamalardan farklılık arz etmektedir. Algılayıcılar küçük yapıdadırlar ve bu yüzden çok sınırlı enerji kaynakları ile çalışmak durumundadırlar. Haberleşme en çok enerji tüketen işlemdir ve enerji tüketiminde mesafeye göre üstel olarak artmaktadır [54, 55].

Mevcut yönlendirme teknikleri birçok soruna çözümler sunabilmesine rağmen algılayıcı ağlarda bazı problemler hala çözüm beklemektedir [7]. Algılayıcı ağlarda yönlendirme, sınırlı ama hızlı büyüyen araştırma sonuçlarıyla birlikte yeni bir çalışma sahasıdır. Yönlendirme tekniklerinin hepsinin ortak özelliği, algılayıcı ağ ömrünün artırılmasının sağlanmasıdır. Ağ ömrünü maksimum yapacak şekilde KAA yapısına özgü kriterleri dikkate alarak optimum yönlendirme tekniklerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu tekniklerin geliştirilmesinde optimizasyon metodları arasında yer alan KKO, PSO ve ABC algoritmaları gibi sürü tabanlı sezgisel algoritmaların da kullanılması hedeflenmektedir.

#### 2.5. KAA'larda Güvenlik Problemleri ve Önerilen Çözümler

Kablosuz ağlarda güvenlik tehditlerinin ve saldırılarının çoğu kablolu ağlardakine benzerlik göstermektedir. Gerçekte kablosuz ağlarda birçok saldırı türüne karşı güvenlik daha zayıftır. Kablosuz haberleşmede iletişimin yayınlanarak yapılması güvenlik açığını artıran bir unsurdur. Kablosuz ad hoc yapıları için gerçekleştirilen güvenlik önlemleri birçok bakımdan KAA'lar için de uygulanabilir olmaktadır. Buna rağmen ad hoc yapılarıdaki güvenlik stratejileri doğrudan KAA'lara uygulanamamaktadır. Çünkü yapılar arasında mimari farklılıklar söz konusudur. Ad hoc ağlarının kendi kendine

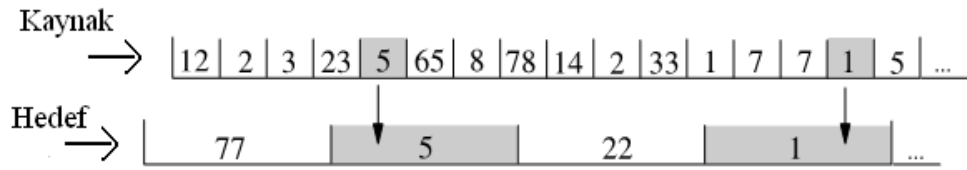
organize olabilmesi, noktadan noktaya haberleşme yapması, dinamik topolojide çalışması gibi KAA'lara benzer yönlerinin olmasına rağmen KAA'larda sistemi komuta eden bir eleman veya baz istasyonu bulunmamaktadır [20].

KAA'larda güvenlik saldırıları iki seviyede ele alınır. Bunlardan ilki güvenlik mekanizmalarına saldırı, diğeri ise yönlendirme mekanizması gibi temel işlevsel mekanizmalara saldırıdır. KAA yapılarında belli başlı saldırı türlerinden aşağıda bahsedilmektedir.

Servis isteklerinin kabul edilememesi (DoS-Denial of Service) durumu haberleşen elemanların arızalanmaları veya iletişim problemlerinin varlığında söz konusu olmaktadır. En basit anlamda DoS saldırısı, bir elemana kaynaklarının tüketilmesine yol açacak ölçüde gereksiz veri paketlerinin gönderilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu sayede gerçek işlevli bir iletişim kurulması gerektiğinde, gereksiz veri paketleriyle boğulan eleman cevap verememektedir. KAA' larda değişik katmanlarda DoS saldırıları yapılabilmektedir. DoS türünde saldırıları etkisiz hale getirebilecek KAA yapıları için gerek mimarinin güçlendirilmesine (maliyet artırımına neden olmaktadır) gerekse de ağ kaynaklarının bir bölümünün koruma amaçlı ayrılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Mimarinin güçlendirilmesi konusunda Wood ve Stankovic [56] DoS saldırılarına karşı farklı katmanlarda çözüm getirmeye çalışmıştır. Jam [57] isimli çalışmada ise çalışmada bölgenin analizini yaparak yönlendirme işleminde hatalı bölgeleri saptamakta ve DoS saldırılarının önüne geçmeyi amaçlamaktadır.

DoS saldırılarına karşı etkili çözüm olarak frekans sıçramaları (frequency hopping) yöntemi kullanılabilmektedir [58]. Bu yöntemde veri parçaları belirli zamanlarda farklı frekanslardan hedefe iletilmektedir. Hangi zaman dilimlerinde hangi frekansların kullanılacağı bilgisi ise haberleşen elemanların ortak olarak bildiği gizli bir kod (frekans sıçrama bilgisi) içerisinde tutulmaktadır. Ancak KAA yapılarında algılayıcıların bozulmaları ve sisteme yeni elemanların dahil olmaları sıkça yaşanan bir durumdur. Bu durumda yeni elemanlara diğeri elemanlarca bu kodun iletilmesi gerekmektedir. Belirli bir frekansdan bu kodun iletimi DoS saldırılarıyla engellenebileceği için farklı frekanslardan parçalar halinde iletilmesi kodun alınabilmesini daha kolay hale getirmektedir. Şekil 2.2'de yer alan haberleşme örneğinde her bir sayı farklı bir frekansı

temsil etmektedir. Kaynaktan rasgele düzende farklı frekanslarda gönderilen kodlar hedef elemanca dinlenmekte ve belirli bir süre sonra bu kodun parçaları toplanmaktadır [59]. Güvenli iletişimin sağlanabilmesi için tez çalışmasında geliştirilen yönlendirme protokolleriyle birlikte fiziksel katman haberleşmelerinde bu yöntemin kullanılması DoS saldırıları için etkili bir çözüm olarak görülmektedir.



Şekil 2.2. Farklı frekanslardan iletilen frekans sıçrama bilgisi

Diğer bir saldırı türü ise iletim halinde olan veriler için yapılan saldırı yöntemleridir. Bir algılayıcı ağında, algılayıcı elemanlar çevrelerindeki değişimleri daha önceden kendilerinden istenildiği şekilde algılayıp merkeze bu bilgiyi raporlamaktadır. Raporlama esnasında bilgi değişebilmekte, bozulabilmekte veya zayıflayabilmektedir. Kablosuz haberleşme birçok olumsuz etkene karşı dayanıksız bir iletişim ortamı sunduğu için saldırgan bilgiyi kolayca görüp değiştirebilmektedir [60]. Bu sayede merkeze yanlış bilginin iletilmesi söz konusu olabilmektedir. Algılayıcı ağlarda, her bir algılayıcının enerjisi ve iletişim mesafesi sınırlı olduğu için daha çok enerjili ve daha geniş çevrede iletişim becerisine sahip bir saldırgan unsur aynı anda birçok algılayıcıya saldırabilmektedir. Hat izleme, paket yakalama ve veri gizliliğinin bozulması gibi saldırılara karşı şifreli haberleşme yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [61].

Birçok uygulamada algılayıcı elemanlar işbirliği içerisinde çalışarak belirli bir görevi yerine getirmeyi amaçlamaktadır. Verileri yardımlaşarak toplama, gönderme ve dağıtık hesaplama işlemleri KAA yapılarının önemli ortak özelliklerindendir [7]. Bu işbirliğini bozacak şekilde yapılan saldırılar “sybil attack” olarak adlandırılmaktadır. Bu saldırıda haberleşme yapan bir eleman kullanılarak birden fazla sahte algılayıcı eleman varmış gibi gösterilmekte ve işbirliği bozulmaya çalışılmaktadır. Kablosuz ad hoc ve KAA yapılarında çok etkili olabilen bu saldırıdan merkezi kontrol ve elemanlar arası sürekli koordinasyon yapılarak korunulabilmektedir. Ayrıca radyo sinyallerinin sürekli test edilmesiyle yabancı unsurların varlığı saptanabilmektedir [20].

KAA’larda verilerin merkeze iletilmesi haberleşen elemanların birbirleri üzerinden verileri aktarmasıyla gerçekleşmektedir [62]. Bu türden bir yaklaşımda, verinin en uygun (kaliteli) yoldan gitmesi için yönlendirme işleminin yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla, KAA yapılarında etkili yönlendirme yöntemleri güncel çalışmalar arasında yer almaktadır [11, 38, 40, 51-53]. Yönlendirme mekanizmasını tehdit eden bir saldırı türü kara delik (blackhole) saldırısıdır. Bu saldırıda harici bir eleman en kaliteli yolun kendi üzerinden geçtiğini iddia ederek bütün trafiği üstüne almakta ve verilerin merkeze sağlıklı bir şekilde gitmesini önlemektedir. Reward adıyla önerilen yönlendirme algoritması ağ üzerinde kara delik saldırılarına karşı savunan etkili bir çözümdür [20]. Benzer bir saldırı türü de saldırganın çevreye sahte “hello” paketleri yaymasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sayede algılayıcı elemanlar saldırganı komşusu olarak görmekte ve sahip oldukları verileri göndermektedirler [63]. Hamid ve arkadaşları sahte “hello” saldırısına karşı olasılık tabanlı şifreli bir yaklaşım gerçekleştirmişler ve karşılıklı haberleşen elemanlarda bunu çift yönlü kullanmışlardır. Güvenlik derecesi daha da artırılmak istenirse çoklu yollu ve çok merkezli olarak yönlendirme yapılarak haberleşme gerçekleştirilebilmektedir [64]. Tez çalışmasında geliştirilen yönlendirme protokollerinde komşuluk bilgileri baz istasyonunca denetlenmekte ve sahte komşuluk taleplerinin önüne geçilmektedir.

KAA altyapısını tehdit eden diğer bir saldırı ise solucan deliği (wormhole) saldırısıdır. Bu türden bir saldırıda, saldırgan yayınlanan bir veriyi alıp bunu tekrar çevreye yayınlamakta ve bu veriyi almaması gereken elemanlara göndermektedir. Böylece bu veriyi alan elemanlar gerçekte komşusu olmayan bir algılayıcı elemanı komşuları gibi görmektedirler. Bu ise KAA’nın topolojisini sağlıklı bir şekilde oluşturmasını tehdit etmektedir. Cagalj ve arkadaşları çalışmalarında KAA yapıları için çok zararlı olan solucan deliği saldırısının etkili DoS saldırılarının önlenmesiyle engellenebileceğini göstermiştir [65]. [59] nolu referansta yer alan frekans sıçraması yöntemi ile bu türden saldırılara karşı etkili düzeyde güvenlik sağlanabilmektedir.

KAA yapılarında bahsedilen bu saldırı türlerine karşı geliştirilen çeşitli güvenlik uygulamaları mevcuttur [66-69]. Bu uygulamalar içerisinde yer alan [68] nolu kaynakta servis kalitesini de dikkate alacak şekilde farklı türlerdeki güvenlik açıklarına ilişkin

alışmalar yer almaktadır. [69] ile verilen kaynakta ise veri birleştirme üzerine geliştirilen güvenlik yöntemleri verilmiştir.

Yayın yoluyla haberleşme yapan elemanların iletişimini engellemek için bulundukları ortama kullandıkları frekans aralığında daha güçlü taşıyıcı sinyaller yayınlanarak bu elemanların yayınları bastırılabilir. Böylece daha zayıf kalan sinyallerle haberleşme yapılamamakta ve ancak saldırıcı sinyalin yerinin bulunup kesilmesiyle normal iletişime dnlebilmektedir. Bu saldırı türü mobil haberleşmenin iptal edilmesi gerekli olan yerlerde (askeri bölge, hapishane gibi) fayda sağlamaktadır. Fiziksel katmanda gerçekleştirilen bu saldırı türü düşük glerde haberleşme yapan KAA yapıları için güvenliği önemli ölçüde tehdit eden ve etkin bir önlem alınması zor olan bir saldırı olmaktadır. Ancak haberleşmede frekans sıçramaları ile farklı kanalları kullanan algılayıcı elemanlar için bu tür saldırılar etkisiz kalmaktadır. [59] nolu referansta önerilen bu türden bir yaklaşımla KAA algılayıcı yapıları dışarıdan gelebilecek saldırı türlerine karşı korunaklı hale getirilebilmektedir.

### **3. BÖLÜM**

#### **YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİNİN TEST EDİLMESİ AMACIYLA GELİŞTİRİLEN YAZILIM**

Küçük boyutlarda algılayıcı elemanlar kullanılarak alıcı/verici ünitelerin geliştirilmesiyle çok sayıda zeki algılayıcılar geniş ölçekli uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir. Bu algılayıcı elemanlar bir ağ yapısı oluşturarak yapılacak olan işlemleri (algılama, yönlendirme vb.) sahip oldukları kısıtlı kaynaklarla (düşük iletişim yeteneği, sınırlı hesaplama gücü, sınırlı enerjisi) işbirliği içerisinde yaparlar. Bu tür ağ yapıları için yeni ve etkin algoritmaların geliştirilmesi bu alandaki önemli araştırma konularından biridir. KAA yapıları için optimum çözümü sağlayan performanslı yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi daha önceden belirtildiği gibi bu tezin amacını oluşturmaktadır. Bu algoritmaların geliştirilmesi esnasında performans ölçümlerinin yapılabilceği bir yazılıma ihtiyaç duyulmuştur. Bu bölümde böyle bir yazılım ortamının elde edilmesine yönelik çalışmalar açıklanmaktadır.

Kablosuz ağlarda uygulamak üzere geliştirilen donanımsal ve yazılımsal çalışmalar klasik bilgisayar ağlarında kullanılan OSI (Open Systems Interconnection) referans katmanları içerisinde yer almaktadır. İlk katman, enerji, frekans, gerilim ve akım ile ilgili gereksinimler, anten yapıları, donanımsal tasarımlar gibi fiziksel çalışma alanlarını kapsar. İkinci katman kablosuz haberleşme ile ilgili ortam erişim kontrolü (MAC), veri bağlantı konuları, hata kontrolü ve bit senkronizasyonu gibi elektronik haberleşmenin gerçekleştirilmesine yönelik çalışma konularını içerir.

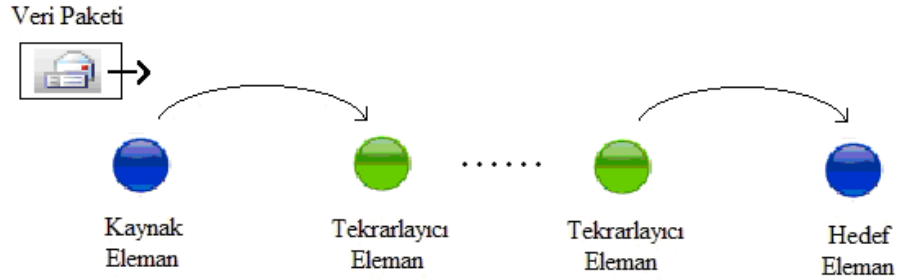
Üçüncü katmanda haberleşme gerçekleştiren elemanların verilerinin kaynaktan hedefe ulaşması için en iyi güzergahın belirlenmesini amaçlayan “yönlendirme” protokolleri yer alır. Diğer üst katmanlar ise veri iletimini ve akışını denetleyen “taşıma (transport)”; açılan oturumları, bu oturumların durumlarını denetleyen “oturum (session)”; aynı işlemi gerçekleştiren farklı programların verilerini ortak bir yapıda ifade edilmesini sağlayan “sunum (presentation)” ve son olarak da uygulama programlarının yer aldığı “uygulama (applications)” katmanıdır. Bir katman için özel olarak oluşturulmuş benzetim programları olabildiği gibi birden çok katmanlar üzerinde KAA yapılarını test eden benzetim programları da mevcuttur.

KAA yapılarında yönlendirme protokolleri üzerinde geliştirilen yaklaşımlar farklı senaryolar için test edilmekte ve önerilen yaklaşımların bu yapılar için kullanılabilirliği ve performans sonuçları test verilerine göre tartışılmaktadır.

Gerçek ortamda doğal şartlar altında KAA yapılarının belirlenen kriterler çerçevesinde test edilmesi, sistemin işleyişinin performansı hakkında bilgi edinilmesini sağlayan ideal bir yöntem olmaktadır. Ancak bu yaklaşım bazı zorlukları beraberinde getirmektedir. Bunlardan birincisi, az sayıda KAA yapısının hali hazırda uygulanmış olmasıdır. Henüz gerçek anlamda yaygınlaşmamış olan bu tür ağ yapılarını uygulama üzerinde birebir test imkanı zor olmaktadır. Farklı tiplerde ağ yapılarının olduğu ve uygulamanın istenilen test yöntemlerine açık ve adapte olabileceği koşulu da düşünülürse test işlemlerinin gerçekleştirilebilirliği tartışma konusu olmaktadır. Ayrıca günümüz KAA uygulamaları onlarca veya yüzlerce algılayıcı elemanı destekleyecek ölçüde olmaktadır. KAA araştırma konuları geleceği hedefleyen doğrultuda binlerce, hatta milyonlarca algılayıcı eleman içeren ağları öngörmektedir. Bir benzetim platformunun hazırlanması geliştirilen protokollerin başarısını ölçmede uygun bir çözüm olabilir. Değişik dağılımlarda ve farklı sayılarda elemanlara sahip KAA uygulama senaryoları üretilerek örnek yapıların oluşturulması ve bunlara ait ortalama performans sonuçlarının alınmasına yönelik test işlemleri bu platformlar üzerinde yapılabilir.

Benzetim platformunun oluşturulmasında KAA işleyişi ve referans alınan model devam eden bölümlerde açıklanmaktadır. KAA’larda veri iletiminde temel işleyiş komşu

elemanların katılımlarıyla gerçekleştirilmektedir. Böyle bir yapıda kaynaktan hedefe veri akışı, algılayıcı elemanların birbirleri üzerinden tekrarlama mantığı ile sağlanır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. KAA’larda veri transferi

Veri akışını belirleyen en önemli parametre veri paketinin hedefe hangi elemanlar üzerinden gideceğidir. Veri akışında güzergahın belirlenmesi işlemi OSI referans modelinin üçüncü katmanı olan “ağ katmanı” içerisinde yer alan yönlendirme protokolüne yapılır. Çeşitli tiplerde ve donanımsal özelliklerde farklı sayılarda eleman içeren kablosuz algılayıcı ağlar için önerilen yönlendirme protokollerinin performans analizlerinin yapılmasına yönelik benzetim platformlarının geliştirilmesi tezin bu bölümünün amacını oluşturmaktadır. Geliştirilmeye çalışılan benzetim programı, yönlendirme protokollerinin analizleri için kullanılan ağ katmanı konularını ihtiva etmektedir. Ayrıca platform, veri haberleşmesinin gerçekleştirilmesi ve enerji harcamasının hesaplanması için gerekli olan alt katmanlara ilişkin temel özellikleri de desteklemektedir.

### 3.1. OSI Referans Modeli

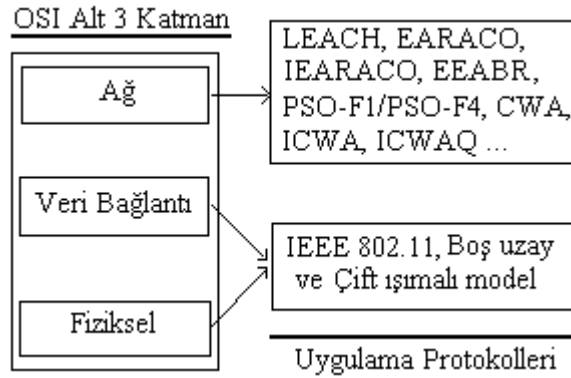
KAA yapılarında yönlendirme işlemi mevcut bilgisayar haberleşme sistemlerinin bu yapılar uyarlanması gerektirmektedir. Çünkü KAA yapılarında haberleşme hızı oldukça düşük olmakta, enerjileri sınırlı ve bu yapılar üzerinde çalışacak algoritmalarında basit (az kod, düşük hafıza gereksinimli) ve etkin (hızlı ve performanslı) olmaları gerekmektedir. Tezin konusu, OSI referans modelinin üçüncü katmanı olan ağ katmanını ilgilendirmektedir. OSI referans modelinin ikinci katında bulunan veri bağlantı katmanı özetle haberleşme, adresleme ve hata kontrolleri gibi

konu başlıklarını içermektedir. İlk kat ise fiziksel katman olarak adlandırılmakta ve bu katmanda elektromagnetik (frekans, modülasyon vb), optik, mekanik (anten yapısı, boyutlar, vb) ve diğer fiziksel özellikler ile ilgili konular ele alınmaktadır.

Araştırmacı ve uygulamacılar bilgisayar ağ haberleşmesinde OSI referans modelini bir standartlar bütünü olarak ele alırlar. Çalışmalar, bu modelin ilgili alt katmanlarının özelliklerine uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Bu sayede belirli standartlar dahilinde çalışmalar yürütülmekte ve sonuçta katmanlar arasında uyumun korunabildiği bir yapı ortaya çıkmaktadır.

ISO (International Standards Organization) tarafından geliştirilmiş olan OSI referans modeli, bilgisayar sistemleri arasındaki iletişimin nasıl olacağını tanımlar. İlk olarak 1978 yılında ortaya çıkarılan bu standart 1984 yılında yeniden düzenlenerek OSI referans modeli olarak yaygın kabul görmüş ve ağ işlemi için bir kılavuz olmuştur. OSI Modeli herhangi bir donanım ya da ağ tipine özel değildir. OSI'nin amacı ağ mimarilerinin ve protokollerinin bir ağ ürünü bileşeni gibi kullanılmasını sağlamaktır. Model yedi katmanlı yapıdan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla fiziksel (physical), veri bağlantı (data link/MAC), ağ (network), taşıma (transport), oturum (session), sunum (presentation) ve uygulama (application) katmanları olarak adlandırılmaktadır [70, 71]. İlk iki katman fiziksel bağlantı işlemi, ağ katmanı iletişimin sağlanması, son üç katman da servis yazılımlarının işbirliği içinde çalışmasıyla haberleşme gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.2'de referans alınan OSI model katmanlarının geliştirilen uygulamada kullanılan protokol karşılıkları verilmiştir.

Veri, alt katmanlara iletilirken iletim temel anlamda şu şekilde yapılır: Veri (data) halinde alınan bilgi, taşıma katmanında segment adı verilen birimlere ayrılır. Bu şekilde veri alıcı makinede tekrar bir araya getirilirken doğru sıralanması sağlanır. Ağ katmanına segment şeklinde gelen verilere adres bilgileri eklenmekte, böylece segmentler paket haline dönüşmektedir. Veri-bağlantı katmanında paketlere MAC adresleri eklenerek frame adını verdiğimiz yapı oluşur. En son aşama olarak fiziksel katmana gelen çerçeveler burada bir bit dizisine dönüştürülerek iletme hazır hale getirilir.



Şekil 3.2. OSI Modeli – Uygulamadaki protokol karşılıkları

Verinin iletimi üst katmandan alt katmana doğru olur. Verinin kablo ile iletimi fiziksel katman tarafından gerçekleştirilmektedir. Kablosuz iletimde fiziksel katman elektromanyetik dalgalarla belirlenen frekans ve modülasyon tekniklerini kullanarak veri iletimini gerçekleştirir. KAA yapılarında ise iletişim elektromanyetik dalgalarla yapılmaktadır. Geliştirilen benzetim yazılımı IEEE 802.11 kablosuz haberleşme standardını baz almaktadır. Bu standart fiziksel katman ve veri bağlantı katmanı özelliklerini içermektedir. Ağ katmanında ise tezin devam eden bölümlerinde açıklanan yönlendirme protokolleri yer almaktadır.

### 3.2. KAA Benzetim Yazılımları

KAA yapılarının farklı türlerde ve çalışmalarda test edilmesi ve performans analizlerinin yapılabilmesi için benzetim yazılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bilgisayar haberleşme protokollerinin test edilebildiği, bilinen en popüler benzetim yazılımı ns-2 isimli ağ yazılımıdır. Ns-2 ağ benzetim yazılımı [72], TCP/IP protokolü üzerinde çalışmaların da test edilebildiği güçlü bir yazılımdır. Ancak bu yazılımın asıl çalışma alanı PC'ler (kişisel bilgisayarlar), client-server (istemci-sunucu) yapılar, ve benzeri gibi nispeten gelişmiş kapasitedeki bilgisayar sistemlerinin haberleşmesini konu almaktadır. KAA yapılarında bulunan düşük kapasiteli elemanlar için ns-2 yazılımının özelleştirilmesi, uyarlanması veya bu yapılara özgü diğer benzetim yazılımlarının kullanılması gerekmektedir. Geliştirilen optimum yönlendirme algoritmalarının test edilmesi işleminde farklı sayılarda eleman içeren ve bu elemanların bölge içerisine farklı yerleştirilmeleri gibi farklı senaryolar kapsamında çalışmalar yer almaktadır. Bu şekilde bir çalışma için benzetim yazılımının farklı KAA

yapılarını test edecek ölçüde ayarlanabilir ve ölçeklenebilir (scalable) olması hedeflenmektedir.

Benzetim yazılımlarının gerçekte birebir örtüşebilmesi için OSI katmanlarının ilgili bölümlerini içermek durumundadır. Bu sayede, farklı katmanlarda çalışma yapan araştırmacılar kendileri ile ilgili katman üzerinde modellemeleri ve program geliştirmelerini yaparak çalışma sonuçlarını elde etmektedirler. Dolayısıyla bir simülatör yazılımı farklı modüllerden oluşmakta ve her bir modül OSI katmanlarından birinin çalışma alanına karşılık gelmektedir. Bu sayede farklı alanlarda çalışma yapan araştırmacılar ortak bir noktada buluşmakta ve belirli bir standart dahilinde araştırma ve geliştirme yapabilmektedirler. Bilgisayar haberleşmesinde genel olarak kabul gören standart bilindiği üzere OSI referans modelidir. Bu model içerisinde IEEE organizasyonu etkin olarak standartlar belirlemekte ve genelde bu standartların pratikte kullanımı tercih edilmektedir. Yönlendirme işlemleri için geliştirilen benzetim programları OSI referans modelinin üçüncü katmanla ilişkili modüllerini konu almakta ve bu modüller üzerinde yeni algoritmaların eklenebilir olmasını amaçlamaktadır.

Kablosuz ağ yapıları için ağ benzetimlerini gerçekleştiren bazı ağ benzetim programlarına GlomoSim (Global Mobile Information System Simulator) ve OPNET' i örnek verebiliriz. Kablolulu ve kablosuz haberleşmenin her ikisini de kapsayarak benzetim yapan yazılımlara da Ns-2 ve Ptolemy örnek olarak verilebilir [72-74].

GlomoSim [75] hareketli kablosuz haberleşme yapan elemanların oluşturduğu ağ yapıları için geliştirilen bir benzetim yazılımıdır. GlomoSim, katmanlı bir mimari içerisinde modüllerin tasarlanmasıyla oluşturulmuştur. Her bir modül belirli bir protokolün parçasını temsil etmektedir. GlomoSim benzetim programında modül ekleme genişletme ve düzenleme işlemleri PARSEC (Paralel Simulation Environment for Complex Systems) [76] programlama diliyle yapılmaktadır. PARSEC programlama dili "C" tabanlı sıralı ve paralel çalışma yapabilen bir yazılım geliştirme ortamıdır.

OPNET [77] benzetim yazılımı OPNET teknolojileri firması tarafından geliştirilen ticari bir ağ modelleme yazılımıdır. Bu yazılımda ağlar, alt ağlar, ağ bileşenleri, haberleşen elemanlar ve diğer haberleşmeyi sağlayan yardımcı ağ aygıtları hiyerarşik

bir düzende modellenmiştir. Bu elemanların her biri nokta eleman (node) olarak adlandırılmakta ve her bir işlev sonlu durumlu makine (Finite State Machine – FSM) olarak modellenmektedir. Ağın tamamı ayırık-olay (dicrete-event) tabanlı benzetim programlarıyla çalıştırılmaktadır. OPNET; noktadan-noktaya, yol (bus), ve kablosuz olarak üç ayrı bağlantı türünü desteklemektedir. Kablosuz bir bağlantı; kablosuz, hareketli (mobile) veya uydu ağı olacak şekilde kullanılmaktadır. Alıcı-verici bağlantısında, kanal durumunun 14 hali (görüş durumu, sinyal şiddeti, ve bit hataları gibi) modellenmektedir. Alıcı-verici modülünde alınan sinyalin gücü hesaplanmakta ve bu sinyal belirli bir seviyeden yüksek ise alıcı tarafından ele alınmakta işleme tabi tutulmaktadır.

Ns-2 [72] yazılımı REAL ağ benzetim programının [78] bir türüdür. Bu yazılımın tasarımı yakın bir geçmişte geliştirilmiştir. Temelde bu yazılım TCP, yönlendirme ve multicast (çok noktaya yayımlama) yapıları için geliştirilmiştir. Ancak bu yazılım üzerine bazı eklemeler ve düzenlemeler yapılarak kablosuz ve hareketli sistemler için de benzetim çalışmaları mümkün hale getirilmiştir. Rice Üniversitesi tarafından geliştirilen Monarch (Mobile Networking Architectures) isimli proje bu yönde çalışmaları içermektedir [79]. Ns-2 yazılımının son versiyonu IEEE802.11 MAC protokolü, hareketli modeller, ad-hoc yönlendirme protokolleri (AODV ve DSR gibi), kablosuz haberleşme, kablolu ve kablosuz haberleşmenin bulunduğu karışık ağ yapıları için benzetim ortamlarını sunmaktadır.

UCLA (The University of California, Los Angeles) tarafından Ns-2 yazılımı düzenlenerek SensorSim [80,81] adında algılayıcı ağı benzetim programı geliştirilmiştir. Diğer benzetim platformlarına benzer şekilde SensorSim bünyesinde, hedef, kaynak, algılayıcılar, haberleşme bağlantı kanalları, fiziksel ortam (medya), hareketlilik (mobility) modeli ve güç modeli gibi tanımlamaları içermektedir. Ne yazık ki SensorSim yazılımı açık kod olarak artık genel kullanıma sunulmamaktadır.

Plotemy [74], UC Berkeley Üniversitesi tarafından geliştirilmeye devam edilen ayırık-olay (discrete-event) tabanlı, gerçek zamanlı (real-time) gömülü sistem tasarımını konu alan bir benzetim yazılımıdır. Bu yazılımın temel prensibi çoklu hesaplama modellerini

(örneğin: süreklilik analizi, veri akışı ve sonlu durumlu makineler gibi) hiyerarşik tasarımı sunmasıdır.

TOSSIM [82], TinyOS [83] kablosuz algılayıcı ağlarına özgü geliştirilmiş bir benzetim yazılımıdır. TOSSIM yazılım geliştiricilerinin temel amacı algoritmalar ve bunların gerçek ortamda uygulamaları üzerine uyarlanmalarını hedefleyen ölçeklenebilir kolay bir arabirimin oluşturulmasıdır. Bu benzetim programında oluşturulan bir senaryo, TinyOS donanımlarına kolayca aktarılabilir. Bu yazılımın dezavantajı hedef ağın sadece belirli bir donanım için tasarlanmış olmasıdır. Bundan dolayı hata kontrolleri, akış denetimi ve diğer OSI katmanları için kullanılabilecek algoritmalar son derece sınırlıdır. Genel amaçlı bir algılayıcı ağ yapısı için benzetim platformunu sunmada yetersiz kalmaktadır. JProwler ve Prowler [84] benzetim yazılımları java ve MATLAB dilinde geliştirilmiş ve OSI referans modelinin birinci ve ikinci katmanını simüle etmektedir. Yazılım açık kaynak kodludur ve OSI referans modelinin üçüncü katmanında yer alan yönlendirme protokollerinin bu yazılıma ilave edilebilmesi mümkündür. Ayrıca alt katmanlarda yer alan fiziksel ve bağlantı özelliklerinin ve algoritmalarının da değiştirilmesi ve güncellenmesi mümkündür. Ancak bu yazılımın özelliklerine ve katmanlara ilişkin istenilen ayarlarına yönelik değişimleri yapma imkanı çok sınırlı düzeyde kalmaktadır.

### **3.3. Kullanılan KAA Enerji Modeli**

Geliştirilen protokolün uygulama türüne göre haberleşme performansını incelemek için kablosuz ağ yapısına uygun bir modelin çıkarılması gerekmektedir. Model, kanal yayımı, enerji tüketimi, alt düzey veri bağlantı ve haberleşmesi (frekans, veri yayım gücü\kayı, MAC haberleşme türü vb.) yapılarını ihtiva etmektedir. Bunlar performans ölçütleri alınacak ağ protokollerinin üzerinde işletildiği alt katman yapıları olarak görülmektedir. Sonuçlar için performans değerleri alınırken her bir ağ protokolünde aynı alt katman parametreleri kullanılmıştır.

Haberleşme gerçekleştiren bir modelde en basit anlamda bir verici ve bir alıcı yer almaktadır. Bu iki eleman arasındaki bağlantı kablolu (bakır, fiber aracılığıyla) veya kablosuz (elektromanyetik, infrared, ultrasonik vb. dalgalar aracılığıyla) yapıda

olabilmektedir. Ancak her iki durumda da aradaki mesafeye bağılı olarak karşılıklı iletilen sinyallerde zayıflamalar olmaktadır. Çalışmada kullanılan model doğrultusunda KAA yapılarındaki haberleşmenin elektromanyetik dalgalar aracılığı ile olduğu varsayılmaktadır. Elektromanyetik dalgaların iletilmesinde yaygın olarak iki fiziksel katman model türü ele alınmaktadır. Bunlardan ilki, doğru bir görüş sahası içerisinde ve arada engel bulunmadığı durumlarda haberleşmenin gerçekleştiği kabulüyle kullanılan boş uzay modelidir (free space model). İkincisi ise hava ve yer yansımalarının neden olduğu muhtemel dalga sönümlerinin bulunduğu ve farklı yollardan farklı zamanlarda dalga alıcıya ulaştığını modelleyen iki ışımalı yer yayım modelidir (two-ray ground propagation model). Literatür çalışmalarında belli bir mesafeden ( $d_{sınır}$ ) kısa haberleşmelerde boş uzay modeli, uzun mesafeli haberleşme türlerinde de iki ışımalı yer yayım modeli tercih edilmektedir [85]. Eşitlik 3.1’de  $d_{sınır}$  için verilen ifade yer almaktadır.

$$d_{sınır} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{L} \cdot h_a \cdot h_g}{\lambda} \quad (3.1)$$

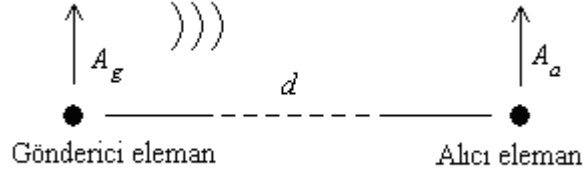
Eşitlikte  $L$  sistemin kayıp faktörü (loss factor),  $h_a$  alıcı antenin uzunluğunu,  $h_g$  gönderici antenin uzunluğunu ve  $\lambda$  ise taşıyıcı sinyalin dalga boyunu vermektedir.  $d_{sınır}$ ’dan küçük mesafeli haberleşmelerde kullanılan güç Eşitlik 3.2’de yer almaktadır.

$$P_a(d) = \frac{P_g \cdot A_g \cdot A_a \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot d)^2 \cdot L} \quad (3.2)$$

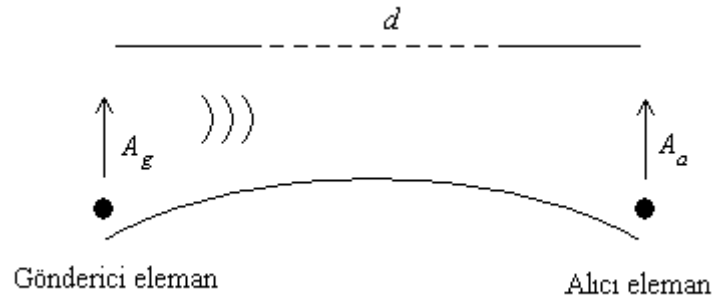
Eşitlik,  $P_g$  gönderici sinyal şiddetiyle  $d$  uzaklıktaki alıcı anten üzerine  $P_a(d)$  değerinde bir güç aktarıldığını ifade etmektedir. Eşitlikte geçen  $A_g$  gönderici anten kazancını,  $A_a$  alıcı anten kazancını,  $L$  sistem kayıp faktörünü ve  $\lambda$  ise taşıyıcı sinyalin dalga boyunu ifade etmektedir.

Şekil 3.3 kısa mesafeli ( $d < d_{sınır}$ ) açık alanda boş uzay modelindeki güç iletimini, Şekil 3.4 ve 3.5 ise iki ışımalı yer yayım modeli kullanılan yapıda güç iletimini göstermektedir. Şekil 3.5’de alıcı anten üzerine bırakılan güç doğrudan iletilen  $E_d$  ile yerden yansıyan  $E_y$ ’nin toplamına ( $E_t$ ) eşit olmaktadır (Eşitlik (3.3)).

$$E_t = E_d + E_y \quad (3.3)$$



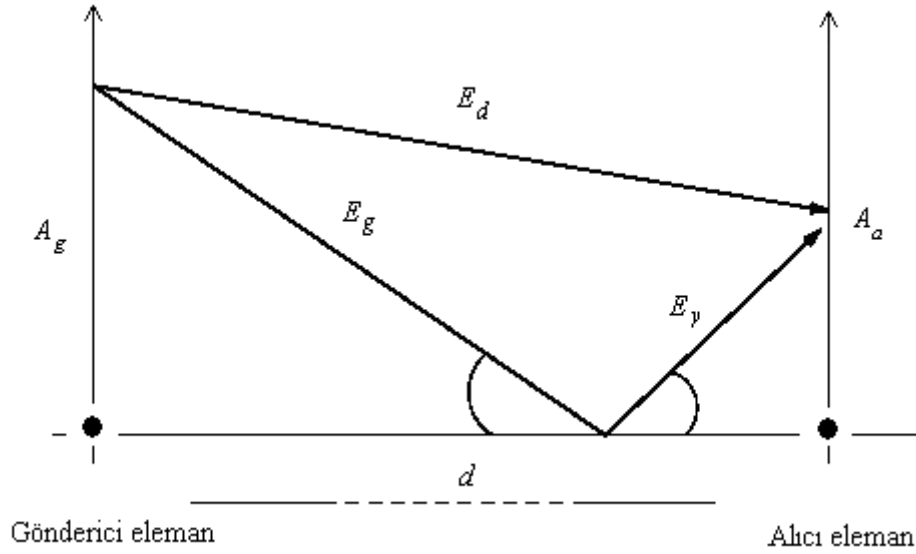
Şekil 3.3. Kısa mesafeli açık ve doğru bir görüş sahası içerisinde alıcı anten üzerine bırakılan güç



Şekil 3.4. Uzun mesafeli muhtemel yansımaların bulunduğu bir görüş sahası içerisinde alıcı anten üzerine bırakılan güç

Eşitlik 3.2 yansıma bulunmaksızın direk görüş sahası içerisinde gerçekleştirilen kısa mesafeli ( $d < d_{sınır}$ ) haberleşmeler için kullanılabilir. Eğer haberleşme mesafesi  $d > d_{sınır}$  ise Eşitlik 3.4'te yer alan iki ışımalı model kullanılmalıdır.

$$P_a(d) = P_g \cdot \frac{h_g^2 \cdot h_a^2}{d^4} \cdot A_a \cdot A_g \quad (3.4)$$



Şekil 3.5. Yer yansımalarının dikkate alındığı durumda alıcı anten üzerine bırakılan güç

Eşitlikte  $P_a(d)$ ,  $P_g$  gücüyle gönderilen sinyalin  $d$  uzaklıktaki alıcı anten üzerine düşürdüğü gücü ifade etmektedir. Bu güç değerinde  $A_a$  alıcı anten kazancının,  $A_g$  gönderici anten kazancının,  $h_a$  alıcı anten boyunun,  $h_g$  gönderici anten boyunun ve  $d$  mesafesinin etkisi bulunmaktadır. Bu iki modelde göze çarpan en temel ayrım, alınan sinyal gücünün mesafeye oranıdır. İlk modelde alınan sinyal gücü aradaki mesafenin karesiyle ters orantılı olurken ikinci modelde farklı yollardan gelen sinyallerin birbirlerini sönmleme gerçeğinden hareketle mesafenin dördüncü kuvvetiyle ters orantılı olmaktadır.

Her iki modelde de sinyal zayıflamasının hesabı söz konusu olmaktadır. Eşitlik 3.5’de verildiği üzere desibel (decibel) cinsinden kazanç ( $K_{dB}$ ) gönderilen sinyal şiddetinin ( $P_g$ ) alınan sinyal şiddetine ( $P_a$ ) logaritmik oranı ifade eden bir yöntemdir.

$$K_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_g}{P_a} \right) \quad (3.5)$$

Çevresel şartların, radyo dalgalarının iletimi üzerine etkisi oldukça karmaşık bir yapıdadır. Dolayısıyla bir verici elemanın radyo iletim sahasının (radio range) tam olarak belirlenmesi zordur. Radyo iletim sahası, normal çalışma koşullarında

haberleşen iki eleman arasında ortalama olarak verilen maksimum uzaklıktır. Bu uzaklık temelde direk olarak verici ve alıcı elemanın iletim gücü (transmission power) ve alıcı hassasiyeti (receiver sensitivity) parametre değerlerine bağlıdır. Maksimum uzaklık dolaylı olarak çevresel şartlara da bağlıdır. İletim gücü vericinin radyo dalgalarını yayım gücüdür. Alıcı hassasiyeti ise alıcı ünitenin algılayabileceği en düşük radyo sinyali. Bu değer alıcının performansını belirlemektedir ve ne kadar düşükse o kadar iyi bir donanım kullandığı anlamına gelmektedir. Bu değer endüstriyel uygulamalarda genelde (-80) - (-90) dBm civarında olmaktadır. Kullanılan antenlerin ideal izotropik [75] anten olduğu düşünülürse boş uzay modelinde güç kazancı Eşitlik 3.6'da verildiği üzere ifade edilebilmektedir.

$$\frac{P_g}{P_a} = \frac{(4\pi l)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2} \quad (3.6)$$

Eşitlikte  $c$  ışık hızı,  $f$  ise iletim frekansını ifade etmektedir. Yer yansımali modelde ise alıcı ve verici arasında direk iletişim etkisi dikkate alınmakla beraber yer yansıma etkisi de hesaba katılmaktadır. Şekil 3.5'de görüleceği üzere alıcı ünitesinde toplam alınan enerji ( $E_t$ ), doğrudan iletilen enerji ( $E_d$ ) ile yansıyan enerjinin ( $E_y$ ) toplamına eşittir.

$d$  mesafedeki verici tarafından  $P_g$  gücüyle yapılan bir iletimde alıcının bu sinyali sağlıklı bir şekilde alabilmesi için anteni üzerine düşen güç Eşitlik 3.7'de verildiği üzere en az  $RX_{hassasiyet}$  kadar olmalıdır. Eşitlikte geçen  $RX_{hassasiyet}$  değeri alıcı donanımına bağlı bir parametre olmaktadır.

$$P_a^{\min} = RX_{hassasiyet} \quad (3.7)$$

Boş uzay ve iki ışımali model için verilen eşitlikler kullanılarak belirli bir güçte çalışan bir radyo vericisinin alıcısına olan iletişim mesafesinin bulunmasına yönelik hesaplama yapılabilmektedir. Bu hesaplama aynı şekilde belirli bir mesafe için vericinin ne kadar bir güçte yayın yapmasının gerektiğinin bulunmasına yönelikte yapılabilmektedir. Bu sayede istenilen mesafeye iletişim gerçekleştirilebilmek için en az güç sarfiyatının ne olacağı hesaplanabilmektedir.

*Örnek I.*

Tablo 3.1’de yer alan özelliklere sahip bir radyo vericisi ve alıcısı için iletişim mesafesi Eşitlik 3.5 ve Eşitlik 3.6 kullanılarak elde edilmektedir.

Tablo 3.1. Örnek I hesaplaması için radyo özellikleri

| Model                                 | Boş uzay modeli | Gösterimi    |
|---------------------------------------|-----------------|--------------|
| Radyo frekansı                        | 2,4GHz          | $f$          |
| Radyo iletim gücü                     | 15dBm           | $P_g$        |
| Radyo alım hassasiyeti                | -81dBm          | $P_a^{\min}$ |
| Radyo anteninin yerden yükseklik boyu | 1,5m            | $h_g, h_a$   |
| Radyo anten kazancı                   | 0dBm            | $A_a/A_g$    |

Eşitlik 3.5 ve 3.6 kullanılarak:

$$P_g = 15dBm = 10^{K_{dB}/10} mW = 10^{15/10} mW = 31,623mW$$

$$P_a = -81dBm = 10^{K_{dB}/10} mW = 10^{-81/10} mW = 7,94.10^{-9} mW$$

$$d = \frac{\sqrt{\frac{P_g}{P_a}} \cdot c^2}{4 \cdot \pi \cdot f} = 627,75m$$

elde edilir.

*Örnek II.*

Tablo 3.2’de yer alan özelliklere sahip izotropik anten kullanan bir radyo vericisi ve alıcısı için iletişim mesafesinin hesabı Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5 kullanılarak elde edilmektedir.

Tablo 3.2. Örnek II hesaplaması için radyo özellikleri

| Model                                 | İki ışımalı model | Gösterimi    |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|
| Radyo frekansı                        | 900MHz            | $f$          |
| Radyo iletim gücü                     | 8dBm              | $P_g$        |
| Radyo alım hassasiyeti                | -81dBm            | $P_a^{\min}$ |
| Radyo anteninin yerden yükseklik boyu | 1,5m              | $h_g, h_a$   |
| Radyo anten kazancı                   | 0dBm              | $A_a/A_g$    |

Eşitlik 3.5 ve 3.6 kullanılarak:

$$P_g = 15dBm = 10^{K_{dB}/10} mW = 10^{8/10} mW = 6,31mW$$

$$P_a = -81dBm = 10^{K_{dB}/10} mW = 10^{-81/10} mW = 7,94.10^{-9} mW$$

$$d = \sqrt[4]{\frac{P_g \cdot h_g^2 \cdot h_a^2 \cdot A_a \cdot A_g}{P_a}} = 251,85m$$

elde edilir.

### Örnek III.

Tablo 3.3’de yer alan özelliklere sahip izotropik anten kullanan bir radyo vericisi ve alıcısı için Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5 kullanılarak iletişim mesafesi elde edilmektedir.

Tablo 3.3. Örnek III hesaplaması için radyo özellikleri

| Model                                 | İki ışımalı model | Gösterimi    |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|
| Radyo frekansı                        | 2.4GHz            | $f$          |
| Radyo iletim gücü                     | 15dBm             | $P_g$        |
| Radyo alım hassasiyeti                | -81dBm            | $P_a^{\min}$ |
| Radyo anteninin yerden yükseklik boyu | 1,5m              | $h_g, h_a$   |
| Radyo anten kazancı                   | 10dBm             | $A_a/A_g$    |

Eşitlik 3.5 ve 3.6 kullanılarak:

$$P_g = 15dBm = 10^{K_{dB}/10} mW = 10^{15/10} mW = 31,623mW$$

$$P_a = -81dBm = 10^{K_{dB}/10} mW = 10^{-81/10} mW = 7,94.10^{-9} mW$$

$$A_a = A_g = 10dBm = 10^{K_{dB}/10} mW = 10^{10/10} mW = 10mW$$

$$d = \sqrt[4]{\frac{P_g \cdot h_g^2 \cdot h_a^2 \cdot A_a \cdot A_g}{P_a}} = 1191,61m$$

elde edilir.

Tablo 3.4’de farklı model ve özelliklerdeki radyo verici ve alıcıları için iletişim mesafeleri yer almaktadır. Sonuçların elde edilmesine yönelik benzetimlerde radyo verici ve alıcı donanımlarının özellikleri Tablo 3.5’de verildiği şekilde alınmıştır. Tablodaki değerler kullanılarak Eşitlik 3.1’den  $d_{sınır}$  mesafesi 226,195m olarak elde edilmiştir [86].

Tablo 3.4. Farklı özellikteki radyolar için iletişim mesafesi değerleri

| Model                                                | Boş uzay modeli | İki ışımalı model | İki ışımalı model | İki ışımalı model |
|------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Radyo frekansı ( $f$ )                               | 2,4GHz          | 2,4GHz            | 2,4GHz            | 2,4GHz            |
| Radyo iletim gücü ( $P_g$ )                          | 15dBm           | 15dBm             | 15dBm             | -10dBm            |
| Radyo alım hassasiyeti ( $P_a^{\min}$ )              | -81dBm          | -81dBm            | -81dBm            | -81dBm            |
| Radyo anteninin yerden yükseklik boyu ( $h_g, h_a$ ) | 1,5m            | 1,5m              | 1,5m              | 1,5m              |
| Radyo anten kazancı ( $A_a/A_g$ )                    | 0dBm            | 0dBm              | 10dBm             | 0dBm              |
| İletişim mesafesi                                    | 627,75m         | 376,78m           | 1191,422m         | 35,293m           |

Düşük enerji ile çalışan radyolar üzerinde oldukça geniş çapta araştırmalar mevcuttur. İletim ve alım modlarında minimum seviyede enerji harcamaları konusunda radyo donanımlarının çeşitli karakteristikleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Farklı karakteristiklerin farklı protokoller üzerinde sunduğu avantajlarda da değişimler gözlenmektedir. Çalışmamızda, alıcı/verici elektronik devrelerini ve iletim yükselteci

çalıştırmak için değişken düzeylerde enerjiye ihtiyaç duyan bir radyo modeli kullanılmıştır [87].

Daha önceden bahsedildiği üzere iletilen sinyaldeki güç kaybı mesafeye bağlıdır. Bu kayıp kısa mesafeler için mesafenin karesiyle ( $d^2$ ) ters orantılı, uzun mesafelerde ise mesafenin dördüncü kuvvetiyle ( $d^4$ ) ters orantılı olmaktadır. Farklı mesafelerdeki alıcıların antenleri üzerinde gerekli düzeyde güç bırakılabilmesi için verici yükselticinde güç ayarlaması yapılmaktadır. Kullandığımız radyo modelinde (Şekil 3.6)  $d$  mesafedeki alıcıya  $n$ -bit veri gönderilmesi için gerekli enerji harcaması Eşitlik 3.8’de tanımlanmıştır. Eşitlik açılımlarında yer alan  $E_{elek}$ ,  $\epsilon_{boş\_uzay}$  ve  $\epsilon_{iki\_ışına}$  sabitleri donanıma özgü parametreler olup Tablo 3.5’de açıklanmıştır.

$$E_{Vr} = E_{Vr\_elek}(n) + E_{Vr\_yuk}(n, d), \quad (a)$$

$$E_{Vr}(n, d) = \begin{cases} n \cdot E_{elek} + n \cdot \epsilon_{boş\_uzay} \cdot d^2 & d \leq d_{sınır} \text{ ise,} \\ n \cdot E_{elek} + n \cdot \epsilon_{iki\_ışına} \cdot d^4 & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (b)$$

(3.8)

Tablo 3.5. Kullanılan radyo verici ve alıcısının fiziksel katman parametre değerleri

| Parametre Adı                             | Simgesi                 | Değeri                      |
|-------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Radyo frekansı                            | $F$                     | 2,4GHz                      |
| Radyo iletim gücü (max.)                  | $P_g$                   | 15dBm                       |
| Radyo alıcı hassasiyeti                   | $P_a^{\min}$            | -91dBm                      |
| Sistem kaybı                              | $L$                     | 1                           |
| Radyo Anteninin yerden yükseklik boyu     | $h_g/h_a$               | 1,5m                        |
| Radyo anten kazancı                       | $A_g/A_a$               | 0dBm                        |
| Radyo elektronik devresinin güç harcaması | $E_{elek}$              | 50nJ/bit                    |
| Bit transferi için gerekli güç harcaması  | $E_{bit}$               | 5nJ/bit                     |
| Bit transferi hızı                        | $B_{trans}$             | 1Mbps                       |
| Taşıyıcı sinyal dalga boyu                | $\lambda$               | 0,125m                      |
| Sınır mesafesi                            | $d_{sınır}$             | 226,195m                    |
| Radyo yükseltici güç harcaması            | $\epsilon_{boş\_uzay}$  | 10pJ/bit/m <sup>2</sup>     |
|                                           | $\epsilon_{iki\_ışına}$ | 0,0013pJ/bit/m <sup>4</sup> |

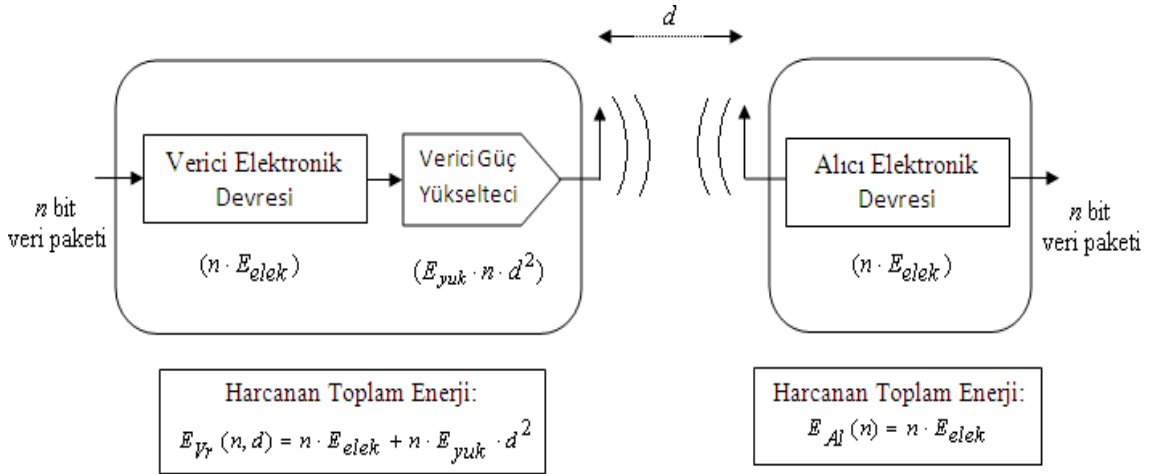
Eşitlik 3.8 verici tarafından harcanan enerjiyi, Eşitlik 3.9 ise alıcı tarafından harcanan enerjiyi ifade etmektedir. Harcanan enerji haberleşme mesafesine, elektronik devrelerin enerji tüketimine ve  $n$  bit sayısına bağlıdır.

$$E_{Al}(n) = E_{Al\_elek}(n),$$

$$E_{Al}(n) = n \cdot E_{Al\_elek}$$

(3.9)

Eşitlik 3.8’de  $E_{Vr}(n, d)$   $n$  bitlik veriyi  $d$  uzaklıktaki alıcıya gönderebilmek için verici tarafından harcanması gereken enerjiyi,  $E_{Al}(n)$  ise gönderilen bu  $n$  bitlik veriyi almak için alıcı tarafından harcanması gereken enerjiyi temsil etmektedir.



Şekil 3.6. Kullanılan radyo modeli

Eşitlik 3.9’da verilen fiziksel parametrelere bağlı değişkenlerin etkisiyle gerçekleşen enerji harcaması, Eşitlik 3.10’da verilen haliyle elektronik elemanların ihtiyaç duyduğu gerilim ve akım parametreleriyle de ifade edilebilir.

$$E_{Al} = V \cdot I_{Al} \cdot t$$

$$E_{Vr} = V \cdot I_{Vr} \cdot t$$

(3.10)

Eşitlik 3.10,  $V$  gerilimi altında alıcı ve verici ünitenin ihtiyaç duyduğu  $I_{Al}$  ve  $I_{Vr}$  akımlarını kullanmaları durumunda  $t$  süresince harcadıkları enerjiyi vermektedir.

### **3.4. KAA Yönlendirme Protokollerinin Performans Analizlerinin Yapılabilmesi için Geliştirilen Yazılım**

Bu bölüm, sınırlı işlemci gücü, haberleşme kapasitesi ve enerji kaynaklarına sahip KAA ağ yapıları için yeni ve etkin algoritmaların geliştirilmesinde test işlemlerinin yapılmasına yönelik yazılımın oluşturulmasını konu almaktadır. Tezin amacı, OSI referans modelinin üçüncü katında bulunan ağ katmanı içerisindeki yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesini içermektedir. Bu amaç doğrultusunda yönlendirme algoritmaların geliştirilmesi için performans ölçümlerinin alınacağı güçlü bir benzetim yazılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilen yazılımlar ağ üzerinde istenilen ayarları yapabilmekte ve sonuçlar istenilen ölçütlere göre oluşturulabilmektedir.

#### **3.4.1. Programda Kullanılan Fiziksel ve Veri Bağlantı Katmanlarının Özellikleri**

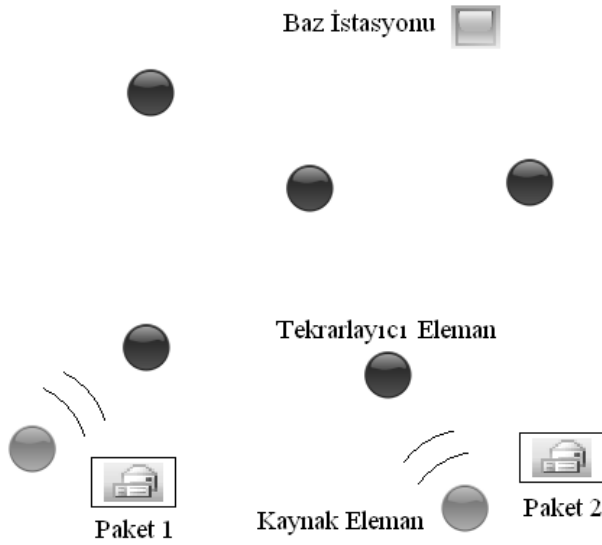
Radyo dalgalarının iletilmesinde çevresel şartların etkisi büyüktür. Verici radyosu yayının kapsama alanının belirlenmesi için çevresel şartların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Radyonun kapsama alanını belirleyen iletim sahası haberleşen iki eleman arasında ortalama olarak verilen maksimum uzaklıktır. İletim sahası, direk olarak verici ve alıcı elemanın iletim gücü ve alıcı hassasiyetine bağlıdır. Dolaylı olarak da çevresel şartlara bağlı olan iletim gücü, vericinin radyo dalgalarını yayınlamak için harcadığı güçtür. Alıcı performansını belirleyen alıcı hassasiyeti ise alıcı ünitenin sağlıklı bir şekilde algılayabileceği en düşük seviyedeki radyo sinyalıdır. Çevresel şartların belirlenmesinde yayım modeli olarak “boş uzay” ve “yer yansımali” model olmak üzere genelde iki model kullanılmaktadır. Oluşturulan benzetim programında bu iki model desteklenmektedir. Veri bağlantı modelleri olarak CSMA, TDMA ve FDMA (Frequency Division Multiple Access) kullanılabilir. Radyo modelleri, enerji ile ilgili eşitlikler ve diğer fiziksel katman özellikleri Bölüm 3.3’de detaylı olarak ele alınmıştır.

#### **3.4.2. Paralel Yapıda Ayrık Olay Çalıştırma Mimarisi**

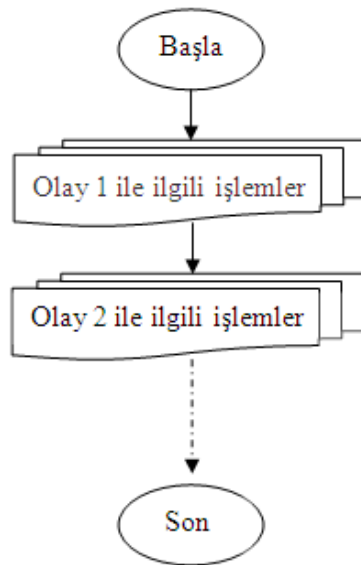
Ağ üzerindeki farklı bölgelerde aynı zaman dilimlerinde gerçekleşen olaylar gözlenebilmektedir. Bu durumda farklı algılayıcı elemanlar aynı anda farklı paketleri

merkeze iletmek isteminde bulunacaklardır. Geliştirilen benzetim yazılımı, Şekil 3.7’de yer alan örnek bir senaryoda görüldüğü üzere farklı paketleri aynı anda ağ üzerinde yayınlayacak özellikte paralel çalıştırmayı desteklemektedir.

Paralel çalıştırmanın gerçekleştirilmesi için MATLAB platformunun zamanlayıcı (timer) nesnesinden faydalanılmıştır. Zamanlayıcı nesnesi olayları çoklu programlama yöntemiyle aynı ağ yapısında paralel bir şekilde çalıştırmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Paralel yapıda gerçekleştirilen veri yayını



Şekil 3.8. Zamanlayıcı nesnesi çağırma fonksiyonunda yer alan işlem akışı

Olaylara ait işlemlerin çalıştırılmasında her bir işleme eşit zaman dilimlerinin verildiği döner çekirdek (round robin) çoklu işlem tekniği kullanılmıştır. Her bir olaya ait işlem süresi değişken alınmış ve işlemin ilgili adımının tamamlanmasıyla işlem süresi sonlandırılmıştır. Şekil 3.9'da yer alan komşulukla verilen 8 elemanlı bir ağ yapısı kullanılarak iki olay için oluşturulan örnek bir senaryoda 3. ve 6. elemanlar temel yayılım (flooding) tekniği ile veri iletiminde bulunmaktadırlar. Komşuluk tablosunda ilk satır birinci elemanın komşularını diğer satırlarda sırayla diğer elemanların komşularını içermektedir. Başlangıçta veri gönderici olarak sadece 3. ve 6. elemanlar rol almakta iken bir adım sonra bu elemanların komşuları da ilgili paketleri göndermek için rol almaktadırlar (Şekil 3.10). Şekil 3.11'de ise aynı ağ yapısında yayılan 2. paketin adımları yer almaktadır.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 4 | - | - | - | - | - |
| 2 | 5 | 8 | - | - | - | - | - |
| 3 | 1 | 5 | 6 | - | - | - | - |
| 4 | 1 | 7 | - | - | - | - | - |
| 5 | 2 | 3 | 7 | 8 | - | - | - |
| 6 | 3 | 8 | - | - | - | - | - |
| 7 | 4 | 5 | 8 | - | - | - | - |
| 8 | 2 | 5 | 6 | 7 | - | - | - |

Şekil 3.9. Sekiz elemanlı örnek bir ağ yapısı için programın ürettiği komşuluk tablosu

|          |                      |                    |
|----------|----------------------|--------------------|
| Adım 1 > | Göndericiler : 3     | Alicılar : 1_5_6   |
| Adım 2 > | Göndericiler : 1_5_6 | Alicılar : 2_4_7_8 |

Şekil 3.10. İki adım için çalıştırılan senaryoda 1. Paket için programın ürettiği alıcı/verici elemanlar

|          |                    |                    |
|----------|--------------------|--------------------|
| Adım 1 > | Göndericiler : 6   | Alicılar : 3_8     |
| Adım 2 > | Göndericiler : 3_8 | Alicılar : 1_2_5_7 |

Şekil 3.11. İki adım için çalıştırılan senaryoda 2. Paket için programın ürettiği alıcı/verici elemanlar

### 3.4.3. Zamanlayıcı Nesnesi Yapılandırması

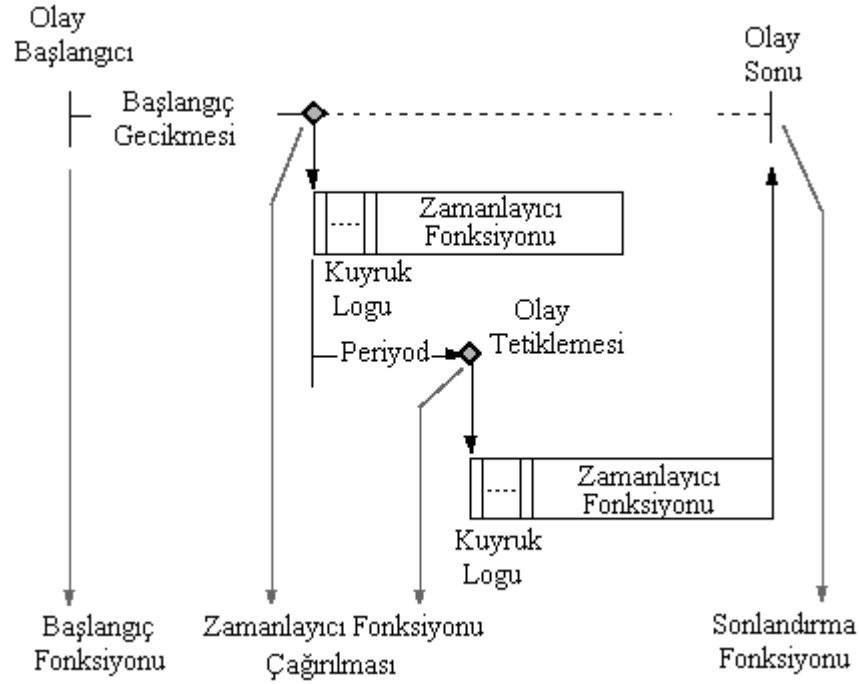
Geliştirilen benzetim programında olaylar birbirinden bağımsız bir şekilde ele alınmakta ve paralel yapıda gerçekleşebilmektedir. Bunun için çoklu programlama tekniklerinden faydalanılmıştır. Oluşturulan yönlendirme algoritması için veri gönderimi, alımı, hata olayları, olayların kaydedilmesi, raporlanması gibi fonksiyonlar verilen öncelik değerlerine göre sistemde çalıştırılmaktadır. Öncelik değerleri sistemde CPU kullanım hakkını ve çalışma periyodunu ifade etmektedir. MATLAB ortamında geliştirilen benzetim programında “öncelikleri dikkate alan döner çekirdek” (priority based round robin) çoklu programlama tekniği kullanılmaktadır. Bu tekniğin MATLAB platformunda oluşturulmasında MATLAB araçlarından olan zamanlayıcı nesnelerinden faydalanılmıştır.

#### 3.4.3.1. Zamanlayıcı Nesnesinin Çalışma Modları

Zamanlayıcı nesnesi fonksiyonların belirli süre aralıkları ile çalıştırılmasını sağlamaktadır. Bu sayede her bir program parçasına belirli bir CPU çalışma hakkı tanıyarak belirli periyotlar dahilinde sırayla çalıştırılma sağlanmaktadır.

#### 3.4.3.2. Zamanlayıcı Fonksiyonunun Bir Defa Çalıştırılması

Zamanlayıcı nesnesi, zamanlayıcı fonksiyonunun (TimerFnc) çalışma alanının nasıl olacağını belirlemek üzere birkaç çalışma modunu desteklemektedir. Çalışma modu, ‘ExecutionMode’ özelliğinin ayarlanması ile belirlenmektedir. Zamanlayıcı fonksiyonunu bir defa çalıştırmak için ‘ExecutionMode’ özelliği varsayılan çalışma modu olan ‘singleshoot’ değerine getirilir. Bu modda zamanlayıcı nesnesi zamanlayıcıyı başlatır ve sonra ‘Başlama Gecikmesi-startdelay’ zaman süresinde belirtilen periyod tükenince, MATLAB’ten zamanlayıcı fonksiyonunu çalışma kuyruğuna ekler. Zamanlayıcı fonksiyonu bittiğinde zamanlayıcı da sona erer. Şekil 3.12’de zamanlayıcı nesnesinin işleyiş grafiği yer almaktadır. Tek çalıştırma çalışma modu için grafikte zamanlayıcı çalışmasının bölümleri görülmektedir. Şekilde kuyruk logunda geçen süre MATLAB çalışma kuyruğuna zamanlayıcı fonksiyonu eklenmesi ile zamanlayıcının çalışmaya başladığı ana kadar geçen zamanı temsil eder. Bu süre MATLAB de aynı zamanda işletilmekte olan işlemlere bağlıdır.



Şekil 3.12. Zamanlayıcı işleyişi

### 3.4.3.3. Çoklu Zamanda Zamanlayıcı Fonksiyonunun Çalışması

Zamanlayıcı nesnesi Tablo 3.6’da verildiği üzere üç farklı çalışma modunu desteklemektedir:

- 1- Sabit Oran,
- 2- Sabit Gecikme,
- 3- Sabit Boşluk.

Simulatörde, “sabit boşluk” modu tercih edilmiştir. Bu mod türünde, çalışmakta olan bir fonksiyon zamanı dolsa da işini bitirmeden önce bir sonraki fonksiyona geçilmez. Zamanlayıcı ise fonksiyon çalışmaya başlayınca işlemeye başlar.

“Çalıştırma işlemleri” özelliği zamanlayıcı fonksiyonunu kaç kez çalışacak şekilde kullanılacağını belirtir. “Peryot” özelliği zamanlayıcı fonksiyondaki derleme zamanlarının miktarını gösterir. “Meşgul mod” özelliği bir önceki geribildirim fonksiyonu tamamlandığında zamanlayıcı nesnesinin zamanlayıcı kuyruğuna nasıl tutunduğunu tanımlar. Bu modlar yönlendirme algoritması ihtiyaçlarına uygun olarak dinamik olarak değiştirilmektedir.

Tablo 3.6. Zamanlayıcı çalışma modları

| Çalışma Modu  | Açıklama                                                                                                                                                          |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sabit Oran    | Zamanlayıcı fonksiyonundan hemen sonra başlayan MATLAB çalışma kuyruğuna eklenen çalışmaların arasındaki zaman periyodudur.                                       |
| Sabit Gecikme | MATLAB çalışma zamanındaki beklenen gecikmelerden sonra zamanlayıcı fonksiyonunun gerçekte çalışmaya başladığı zamandaki çalışmalar arasındaki zaman periyodudur. |
| Sabit Boşuk   | Zamanlayıcı fonksiyonunun çalışmayı bitirdiği an ile başlayan çalışmalar arasındaki zaman periyodudur.                                                            |

#### 3.4.3.4. Program Parçalarının Kuyruğa Alınmasının İncelenmesi

Çoklu programlama senaryolarındaki meşgul zamanlarda, bir önceki kuyruğa alınan çalışmaya ait zamanlayıcı fonksiyonu tamamlandıktan sonra zamanlayıcı fonksiyonunu (TimerFnc) MATLAB çalışma kuyruğuna eklemeye ihtiyaç duyabilir. Zamanlayıcı nesnesinin “Meşgul mod” özelliği bu işlemi belirlemektedir. “İptal”, “Meşgul mod” özelliğinin değeri olarak belirlenirse ve eğer bir önceki programlanmış fonksiyon henüz tamamlanmadıysa zamanlayıcı nesnesi zamanlayıcı fonksiyonunun çalışmasını atlar. Eğer bu değer “kuyruk” olarak belirlenmişse, zamanlayıcı nesnesi peryot özelliğinde belirlenmiş zaman miktarına eşit çalışmalar arasındaki ortalama zamanı bulmaya çalışır. Eğer zamanlayıcı fonksiyonu “Peryot” alanında verilen zamandan daha fazla süre beklemede olursa, sonraki programın çalışması için zamanı yetiştirmek maksatıyla “Peryot” alanında belirtilen değeri kısaltır. Eğer “Meşgul mod” özelliği “hata” olarak set edilirse, zamanlayıcı nesnesi durur ve zamanlayıcı nesnesi, daha önce belirlenmiş olan muhtemel bir hata fonksiyonunu (ErrorFnc) çalıştırır.

#### 3.4.3.5. Zamanlayıcı Nesnesi Çağırma Fonksiyonunun Oluşturulması

Zamanlayıcı nesnesi çalıştırılmaya başlandığı andan itibaren diğer zamanlayıcı nesnelerinin olaylarını (Timer-events) desteklemek için durma, hata oluşması gibi daha

önceden belirlenen MATLAB komutlarını çalıştırabilecek özelliktedir. Bunlar çağırımlar olarak adlandırılmaktadır. Zamanlayıcı nesnesi olayları ile MATLAB komutlarını ilişkilendirmek için ilişkilendirilmiş zamanlayıcı nesnesinin “Çağırma” özelliğinin değeri set edilmektedir.

MATLAB komutlarını belirlenen parametre değerleri ile direk olarak çağırılabilir. Ayrıca bu komutlar bir m-dosyaya atanabilmekte ve bu m-dosya da çağırma özelliğine değer olarak verilebilmektedir. Bu şekilde oluşturulan çağırma fonksiyonlarında ilk iki argüman zamanlayıcı nesnesine ait bir olay düzenini ifade etmektedir. Bir olay düzeni “tip” ve “veri” olarak isimlendirilen iki alana sahiptir. “Tip alanı” çağırma fonksiyonuna neden olan olayın tipini belirlemektedir. Bu alanın değeri “Başlama Fonksiyonu-StartFnc”, ”Durma Fonksiyonu-StopFnc”, “Zamanlayıcı Fonksiyonu-TimerFnc” ya da “Hata Fonksiyonu-ErrorFnc” olabilmektedir. “Veri alanı” ise olayın meydana geldiği zamanı içermektedir. Bu iki giriş argümanına ek olarak, çağırma fonksiyonu uygulamaya özel argümanları da kabul etmektedir. Argümanların kabul edilebilmesi için çağırma özelliğinin değeri olan fonksiyonun ismi bir hücre dizisi (cell array) kullanılarak belirlenmelidir.

Uygun çağırma özelliğinin değerini ayarlayarak çağırma fonksiyonu özel bir olayla ilişkilendirebilmektedir. Çağırma fonksiyonu “metin dizisi”, “hücre dizisi” ya da “fonksiyon kolu” olarak belirlenebilmektedir.

#### 3.4.4. KAA Senaryosunun Başlatılması

Programın içerisinde yer alan KAA-başlatma (argümanlar) fonksiyonuyla argüman parametreleriyle verilen özellikler sahip bir KAA yapısı oluşturulmaktadır. Argüman parametreleri ağ yerleştirilmesi, algılayıcı elemanlar ve alt katman özellikleri hakkında bilgiler içermektedir. Bu parametreler Tablo 3.7’de yer almaktadır. Şekil 3.13’de ise MATLAB komut satırından ilgili başlatma fonksiyonu örnek bir KAA yapısı için çağırılmaktadır. Çağırılan fonksiyon, 100x100m<sup>2</sup> alan üzerine düzgün dağılımla rasgele yerleştirilen 100 elemanlı bir ağ yapısı için “LEACH” yönlendirme protokolünü kullanmaktadır.

Tablo 3.7. Başlatma argüman parametreleri

| Argümanlar            | Tanımları                                                                    | Birim      |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| $N$                   | KAA eleman sayısı                                                            | adet       |
| $X$                   | Algılayıcı elemanların yerleştirildiği dikdörtgensel bölgenin yatay uzunluğu | metre      |
| $Y$                   | Algılayıcı elemanların yerleştirildiği dikdörtgensel bölgenin dikey uzunluğu | metre      |
| $E$                   | Algılayıcı elemanların başlangıç enerjileri                                  | joule      |
| $f_{\text{taşıyıcı}}$ | Radyo iletim/alan taşıyıcı frekansı                                          | Hertz      |
| $TX$                  | Radyo iletim gücü                                                            | dBm        |
| $RX$                  | Radyo alım gücü                                                              | dBm        |
| $K$                   | Paket uzunluğu                                                               | Bit        |
| $f_{\text{veri}}$     | Veri iletim frekansı                                                         | bit/saniye |
| $R$                   | Yönlendirme protokolü tanımlayıcısı                                          | Metin      |

```
>> N=100; X=100; Y=100; E=2; f_tasiyici=2.4e9; TX=10; RX=-90; k=8192; f_veri=250e3; R={'FLOODING'};
>> kaa_baslatma(N, X, YE, f_tasiyici, TX, RX, k, f_veri, R);
>> |
```

Şekil 3.13. Başlatma fonksiyonunun çağırılması

### 3.4.5. Ağ Üzerinde Haberleşme Bağlantılarının Elde Edilmesi

Yayılım algoritmasına göre yapılan bir başlatma için komşuluk tablosu algılayıcı elemanların verici gücüne, alıcı hassasiyetine ve birbirlerine olan uzaklıklarına göre çıkartılmaktadır. Şekil 3.14’de 50x50m<sup>2</sup> bölge üzerinde dağıtılmış -80dBm alıcı hassasiyetli alıcılara sahip 8 elemanlı KAA ağları için programın ürettiği komşuluk tabloları görülmektedir. -15dBm verici gücüne sahip elemanların oluşturduğu komşuluklar şeklin sol tarafında görülmektedir. -10dBm verici gücüne sahip elemanların oluşturduğu komşuluklar ise şekil üzerinde sağda görüldüğü üzere daha yoğun olmaktadır.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 8 | - | - | - | - | - |
| 2 | 4 | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 6 | 7 | 8 | - | - | - | - |
| 4 | 2 | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 1 | 8 | - | - | - | - | - |
| 6 | 3 | 7 | - | - | - | - | - |
| 7 | 3 | 6 | - | - | - | - | - |
| 8 | 1 | 3 | 5 | - | - | - | - |

(a)

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | - |
| 2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 3 | 1 | 2 | 4 | 5 | 8 | - | - |
| 4 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | - | - |
| 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | - |
| 6 | 1 | 2 | 7 | - | - | - | - |
| 7 | 2 | 5 | 6 | - | - | - | - |
| 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | - | - |

(b)

Şekil 3.14. Farklı verici güçlerine sahip elemanların oluşturduğu komşuluklar: a)-15dBm, b)-10dBm

Komşuluklar üzerinden yayılım algoritmasıyla yapılan haberleşme Eşitlik 3.11 ile tanımlı bağlantılar aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Eşitlikte tabu listesi daha önce alınan paketlerin kimliklerini içermektedir. Algılayıcı eleman alıcısına gelmeye başlayan paketin öncelikle kimliğinin de bulunduğu başlık bilgisi değerlendirilmekte ve bu paketin daha önce alınıp alınmadığına tabu listesindeki kimlik kontrolünden sonra karar verilmektedir. Eğer bu paket daha önce alınmış ise paketin yayınlanmakta olan verisi dikkate alınmamakta ve paketle ilgili bir işlem yapılmamaktadır. Eşitlikte  $L$  bağlantı grafiğini,  $s$  gönderici elemanı,  $r$  alıcı elemanı,  $N_s$  verici eleman  $s$ 'nin komşuluğunu,  $tabu_r$  alıcı eleman  $r$ 'nin tabu listesini,  $n$  ise maksimum paket sayısını ifade etmektedir.

$i = (0, 1, 2, 3, \dots, n)$  paket numarasını temsil etmek üzere;

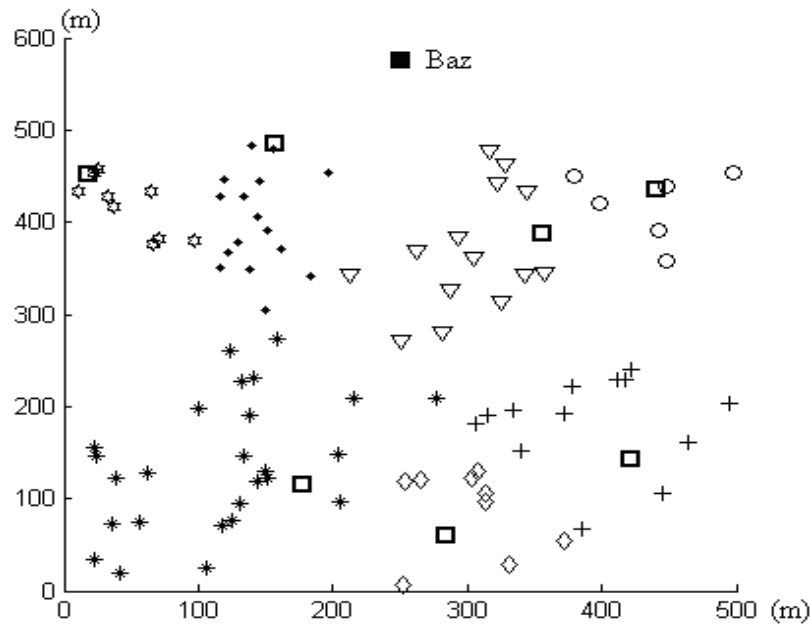
$$L = (s_i, r_i) \text{ öyle ki } r \in N_s \text{ ve } tabu_r \notin i \quad (3.11)$$

Periyodik veri iletimini kullanan küme tabanlı haberleşmede iletim iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada veriler kümeler içerisinde seçilen ve “başkan” olarak adlandırılan algılayıcılara gönderilir. İkinci aşamada ise başkanlar bu verileri merkeze iletir. Küme başkanlarıyla yapılan bir KAA haberleşmesi için yönlendirme işleminde en uygun küme başkanları ve elemanları belirlenmektedir. Daha sonra bu veriler bu başkanlar aracılığıyla merkeze (baz istasyonu) toplanmaktadır. Bölge üzerinden periyodik veri transferi gerektiren durumlar için kullanışlı bir çözüm olan kümeleme tabanlı bir yaklaşımda benzetim programı tarafından elde edilen kümeler Şekil 3.15’de

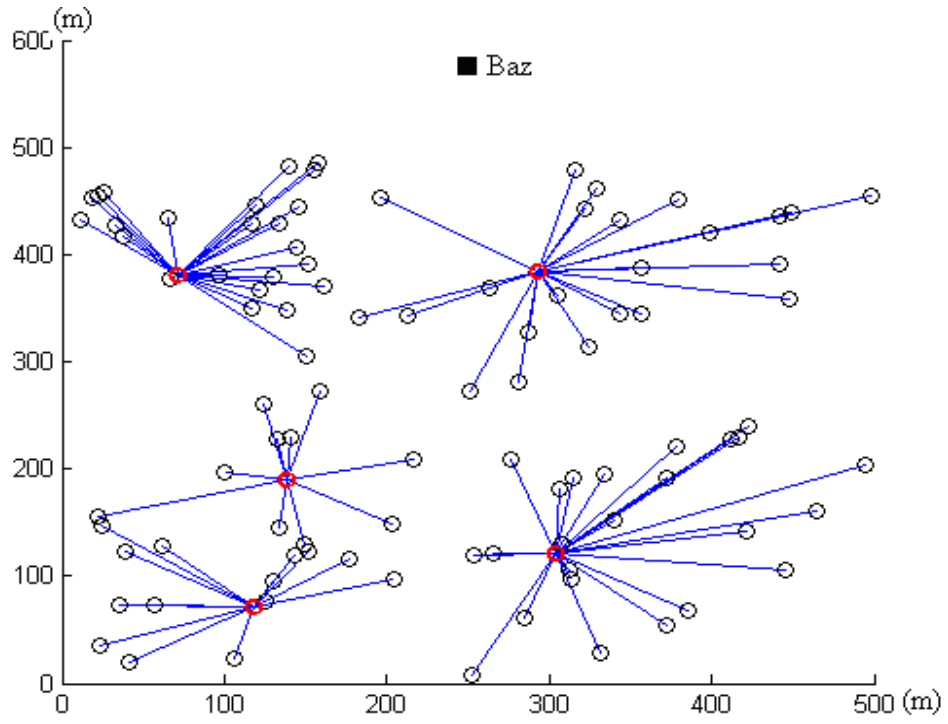
yer almaktadır. Şekil, Tablo 3.8’de verilen parametreler için rasgele dağıtılmış algılayıcı elemanlar içeren bir ağ yapısını temsil etmektedir. Bu ağ yapısında küme başkanı sayısı 5 olarak alınmıştır. Boş kare işaretçileriyle gösterilen küme başkanlarının seçimi ise LEACH protokolü [25] ile gerçekleştirilmiştir. Diğer algılayıcı elemanlar ait oldukları kümelerle göre işaretlendirilmişlerdir. Bu kümelerdeki elemanlar üçgen, yıldız, artı, vb. işaretçiler ile gösterilmiştir. Elemanlar verilerini ait oldukları kümenin başkanları aracılığı ile baz istasyonuna (Baz) iletmektedirler. Örnek olarak verilen Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de farklı protokollerin ürettiği bağlantılar yer almaktadır. Şekillerden görüldüğü üzere CWA [39], küme başkanları seçimini ağ üzerinde diğer elemanlara olan uzaklıkları dengeleyecek şekilde daha düzgün dağılımlı olarak gerçekleştirmektedir.

Tablo 3.8. Parametre değerleri

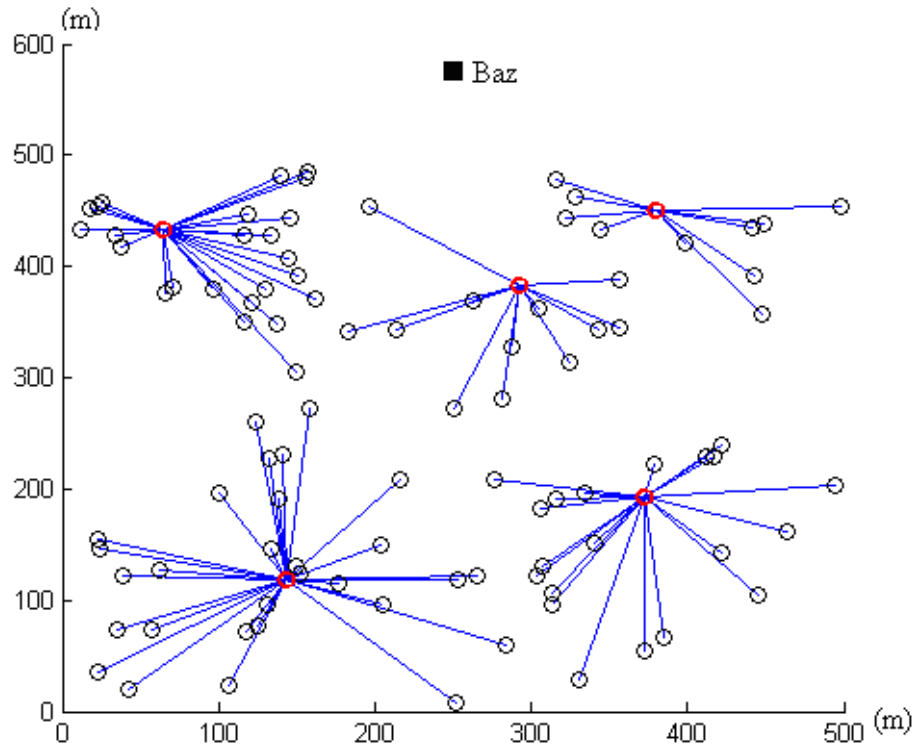
| $N$ | $X(m)$ | $Y(m)$ | $R$     |
|-----|--------|--------|---------|
| 100 | 500    | 500    | “LEACH” |



Şekil 3.15. Kümeleme tabanlı bir KAA yapısında oluşturulan kümeler



Şekil 3.16. LEACH Protokolü ile oluşturulan haberleşme bağlantıları

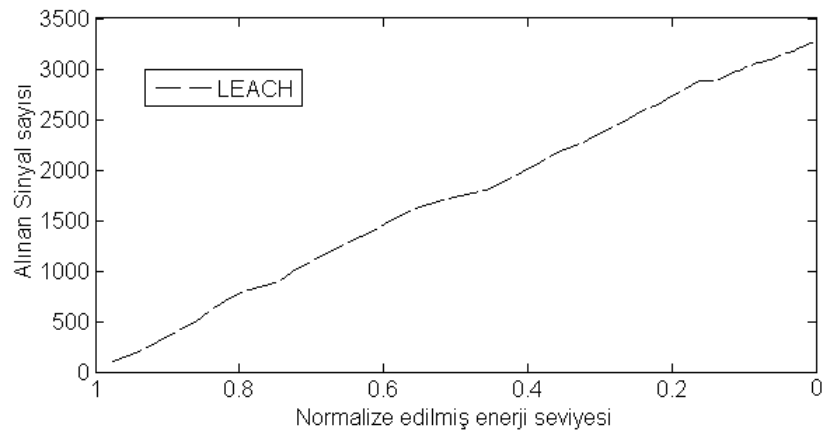


Şekil 3.17. CWA Protokolü ile oluşturulan haberleşme bağlantıları

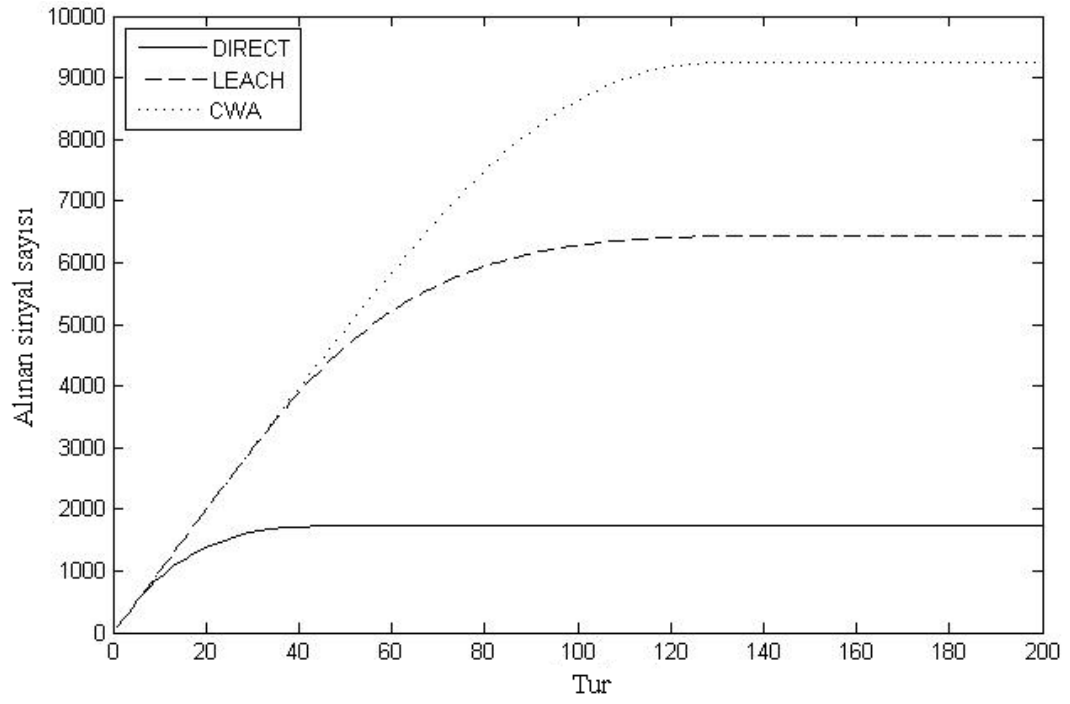
### 3.4.6 Farklı Protokoller için Alınan Performans Sonuçları

Geliştirilen program ile ağ katmanı fonksiyonları üzerinde farklı yapılardaki protokoller oluşturulabilmektedir. Ayrıca var olan yapılar üzerinde düzenleme ve geliştirmeleri de yapmak mümkün olmaktadır. Ağ katmanı fonksiyonlarını oluşturan yönlendirme protokollerinin başarısı farklı yapılardaki KAA türlerinde test edilebilmektedir. Olay-tabanlı olarak işletilen veya periyodik veri transferi gerçekleştiren KAA yapıları için alınan paket sayısı, veri alma süresi, tüketilen enerji miktarı, yaşayan mevcut algılayıcı sayısı veya enerjisi tükenen algılayıcıların sayısı gibi farklı ölçütler (metric) için performans sonuçları sütun ve grafik gösterimlerden faydalanılarak alınabilmektedir. Şekil 3.18 - 3.22’de örnek bir KAA yapısı için bu gösterimler yer almaktadır. Şekil 3.18 ve 3.19’da farklı protokoller kullanılarak alınan sinyal sayısının enerji durumuna ve tur sayısına göre sonuç grafikleri verilmiştir. Şekil 3.20’de 2048 adet paket alımı için ihtiyaç duyulan süreler yer almaktadır. Sonuçlarda verilen LEACH, PSO-F1, PSO-F4, ABC-F1 ve ABC-F4 değerleri test edilen farklı yönlendirme algoritmalarını ifade etmektedir. Şekil 3.21 üzerinde ağın ortalama enerjisinin zamanla azaldığı gözlenmektedir. Zamanla azalan enerji grafiği aynı zamanda ağda hayatta kalan eleman sayıları hakkında bilgi vermektedir. Şekil 3.22’de ise bir yönlendirme protokolünün farklı parametre değerleri için ağ enerjisi üzerine etkisi verilmektedir.

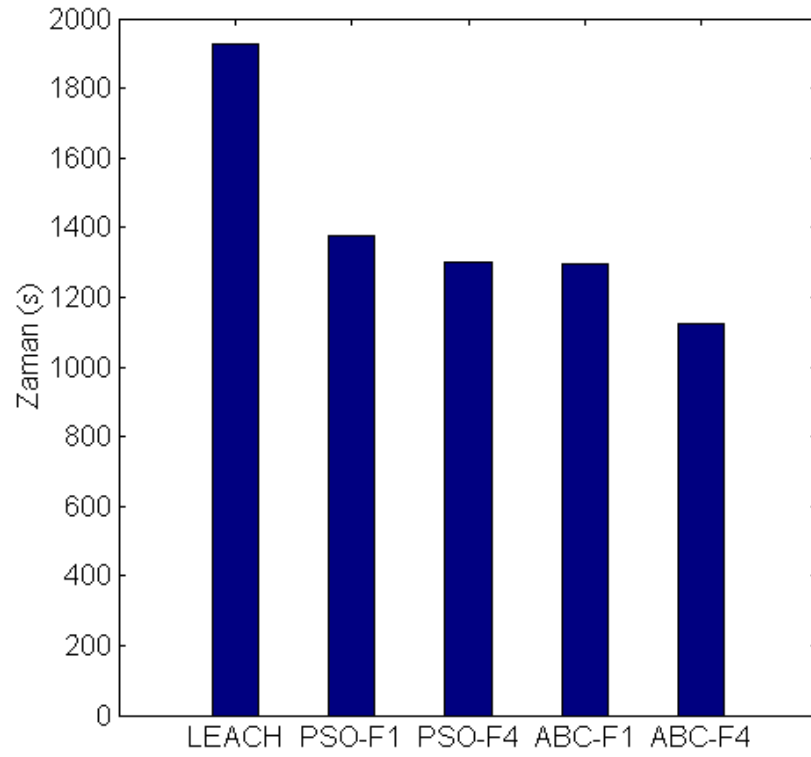
Tezin devam eden bölümlerinde Yapay Karınca Kolonisi ve Yapay Arı Kolonisi algoritmaları kullanılarak geliştirilen EARACO, IEARACO, CWA, ICWA ve ICWAQ protokollerine ait performans sonuçları alınmıştır. Bu sonuçlar diğer protokollerle karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır.



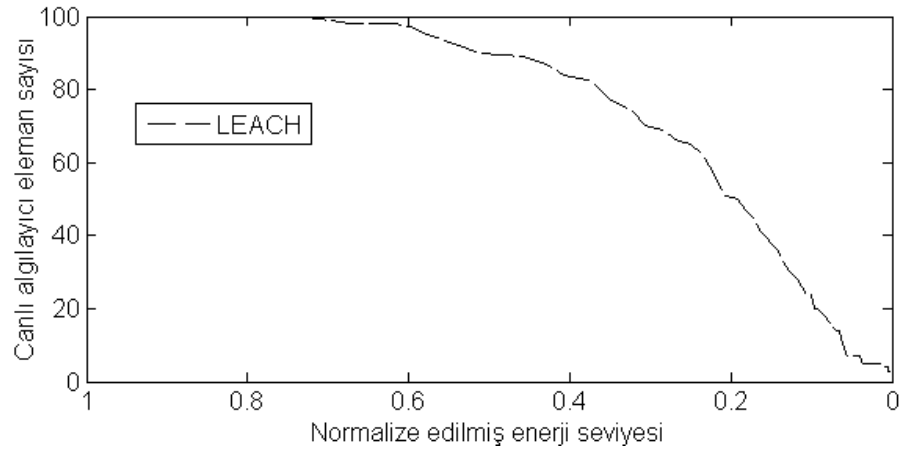
Şekil 3.18. Enerji durumuna göre alınan toplam sinyal sayısı



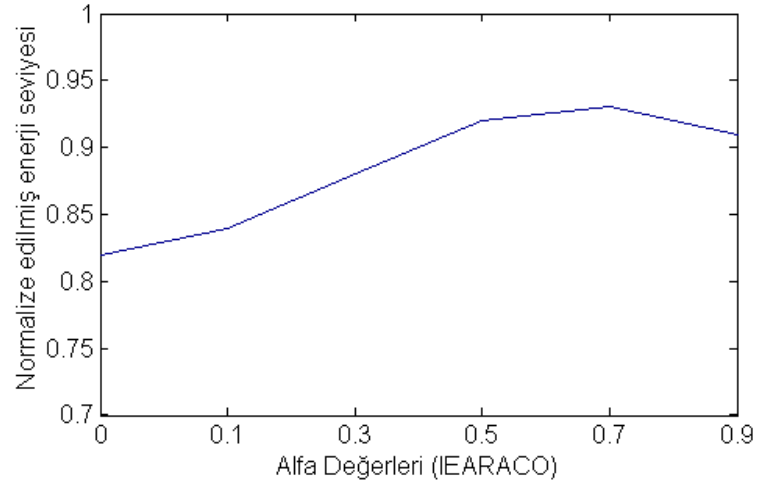
Şekil 3.19. Tur sayısına göre alınan sinyal sayısı



Şekil 3.20. 2048 adet paket alımı için geçen süre



Şekil 3.21. Enerji durumuna göre canlı eleman sayısı



Şekil 3.22. Farklı parametre değerleri için alınan grafik

Sonuç olarak geliştirilen benzetim programı aracılığıyla farklı yönlendirme protokollerinin başarısı test edilebilmekte ve sonuçlar tablo verileri halinde ve grafiksel ortamda alınabilmektedir.

## 4. BÖLÜM

### OPTİMUM YÖNLENDİRME TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİNDE REFERANS ALINAN SEZGİSEL TABANLI PROTOKOLLER

Bilgisayar bilimlerinde, sezgisel (heuristic) algoritmalar bir problem çözme tekniğidir. Bu tür tekniklerde en iyi sonucun bulacağının garanti edilememesine rağmen makul bir süre içerisinde en iyiye yakın çözümler elde edilebilmektedir.

Genetik algoritmalar (GA), doğada gözlemlenen evrimsel sürece benzer bir şekilde çalışmakta olup karmaşık ve zor problemlerinin çözümünde kullanılan optimizasyon metodlarındandır. Sürü zekası ise bu tür problemlerin çözümünde kullanılmak amacıyla canlıların sosyal davranışları temel alınarak geliştirilen sezgisel yöntemlerdir. Sürü zekası, doğada karınca, arı, kuş ve balık gibi canlıların bireysel olarak gerçekleştiremediği ancak grup halinde hareket ederek gerçekleştirebildikleri faaliyetleri örnek alır. Bu canlıların yiyecek arama gibi grup halinde yaptıkları çalışmada birbirleriyle haberleşme etkileşimi söz konusudur. Bu sayede bireylerin bilgileri işbirliği içerisinde paylaşarak güçlü bir bilgi etkileşim mekanizması oluşturulur. Yiyecek aramada ortaya çıkan sürü zekası temelde üç adımdan oluşur. Bunlardan birincisi sezgileri kullanarak belirli bir hedefe (yiyecek) gitmeye karar vermek, ikincisi hedefe ulaşmak için uygun yolu belirlemek, üçüncüsü işbirliği içerisinde hedefi (uygun çözümü temsil eden yiyecek) taşıma adımlarıdır. Bu adımların tamamı merkezi bir kontrol olmaksızın bireylerin birbirleriyle etkileşimleriyle ve işbirliğiyle gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde, tez çalışmasında geliştirilen protokollerde referans olarak kullanılan KAA yönlendirme protokolleri tanıtılmıştır. Protokol tanıtımlarından önce kullanılan optimizasyon teknikleri olan GA, Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) (Ant Colony Optimization, ACO), Parçacık Sürü

Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), Yapay Arı Koloni Optimizasyonu (Artificial Bee Colony Optimization-ABC) ve Diferansiyel Gelişime (Differential Evolution, DE) dayalı algoritmalara yer verilmiştir.

#### **4.1. Tez Çalışmasında Kullanılan Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları**

KAA yönlendirme protokollerinin geliştirilmesinde ve performans karşılaştırmalarının alınmasında aşağıdaki algoritmalarından faydalanılmıştır.

##### **4.1.1. Genetik Algoritmalar (GA)**

GA yönlendirilmiş rasgele araştırma algoritmalarının bir türüdür [88]. GA'lar, canlılarda bulunan doğal seçim ile genetik gelişimi modellemektedir. Algoritma diğer sezgisel algoritmalar gibi araştırma uzayında bulunan çözümlerin bir kümesinin oluşturduğu başlangıç popülasyonunu kullanmaktadır. Çözümü temsil eden bu popülasyon devam eden gelişim döngüleriyle (kuşaklar) birlikte doğal seçim ve tekrar üreme işlemleri aracılığıyla geliştirilir. En son döngüde en kaliteli birey, problem için o ana kadar üretilen en uygun çözümdür. Popülasyondaki diğer tüm bireyler problem için oluşturulan alternatif çözümleri ifade ederler. Algoritmanın temel adımları aşağıdaki gibidir.

1. Başlangıç aşamasını gerçekleştir,
2. Aşağıdaki adımları tekrarla
  - Elde edilen çözümlerin kalitesini değerlendir,
  - En iyi çözümü seç,
  - Çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile yeni çözümler elde et,
3. Sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar 2. adımı gerçekleştir.

Holland, bit dizileri kullanarak karmaşık yapıların kodlamış ve bu yapıları çözülecek problemin temsili çözümleri olarak göstermiştir [88]. Bu çözümler muhtemel tüm çözümleri içine alan araştırma uzayından alınmaktadır. GA'nın işletilmesiyle birlikte ard arda gelen kuşaklarda bu çözümler geliştirilerek optimuma ulaşılmaya çalışılır. GA işletilirken çözümler üzerinde durdurma kriteri sağlanıncaya kadar temel operatörler olan tekrar üreme, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik işlemler yapılmakta ve mevcut

çözümlerin kalite değerlerine bakılarak daha iyi çözümlerin elde edilebilmesi amaçlanmaktadır.

Tekrar üreme işlemi, doğal seçim işlemi olarak adlandırılan kalitesi yüksek bireylerin hayatta kalmaları ve sayılarının artması, kalitesi düşük bireylerin ise sayılarının azalarak kaybolması prensibine göre çalışan bir GA işlemidir. Çaprazlama işlemi, genetik çaprazlama olayıyla ortaya çıkan melez yapıların üretilmesini modelleyen bir özelliktir. Çözüm havuzunda bulunan yapıların birer çifti seçilmekte ve çaprazlama operatörü kullanılarak bu iki yapıdan yeni yapılar meydana getirilmektedir. Çaprazlama işlemiyle meydana gelen yapılar daha iyi nesilleri ifade ediyorsa bu yapılar havuza alınan yeni bireyleri oluşturmaktadır. Mutasyon işlemiyle doğal genetik mutasyon olayının modellenmesi gerçekleştirilir. İkili gösterimin kullanıldığı GA' da mutasyon işlemi, popülasyonda bulunan çözümleri temsil eden bit dizisinin her biti tek tek kontrol edilerek ve mutasyon oranı'na göre bu bitler değiştirilerek gerçekleştirilmektedir. Mutasyon, yeni ve araştırılmamış çözüm elemanlarının bulunmasını sağlayan önemli bir operatördür [89].

#### **4.1.2. Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO)**

İlk olarak Dorigo ve meslektaşları tarafından gezgin satıcı problemi (GSP) ve quadratik sıralama problemi (QSP) gibi zor kombinasyonel optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen karınca algoritmasında gerçek karınca kolonilerinin yiyecek temin etme davranışları örnek alınır [39, 90, 91].

Karıncalar koloniler halinde yaşayan canlılardır. Bu canlılar koloni içinde bireysel davranışlardan ziyade bir bütün halinde (koloni olarak) hayatta kalabilmeye çalışan sosyal bir topluluğu oluştururlar. Kolonide yer alan sınırlı yeteneğe sahip bireylerinin bir araya gelip yüksek yapılanma seviyelerini oluşturabilmeleri bilim çevrelerinin dikkatini çekmiştir. Yiyecek bulmak için gösterdikleri çaba ve özellikle de yiyecek kaynağı ve yuvaları arasındaki en kısa yolu bulabilme özellikleri karınca kolonisinin sosyal işbirliğini gösteren önemli ve ilginç bir davranıştır.

Karıncalar, yiyecek kaynaklarından yuvalarına ve yuvalarından yiyecek kaynaklarına giderlerken feromon adı verilen kimyasal bir madde (koku) bırakırlar. Feromon maddesinin oluşturduğu izleri karıncalar tekrar yuvalarına (yada yiyecek kaynağına) dönerken kullanırlar. Ayrıca bu iz diğer yuva arkadaşları tarafından bulunan yiyecek kaynaklarının yerini bulmakta da kullanılabilir. Yuvadan yiyecek kaynağına birden fazla yol olduğu durumda, bir karınca kolonisi bireysel karıncalar tarafından oluşturulmuş olan feromon izlerinden yuvadan yiyecek kaynağına ya da tersine en kısa yolu keşfetmek için faydalanır. Çünkü, zamanla buharlaşma eğiliminde olan feromon madde miktarı doğal olarak kısa yollarda yani daha yoğun kullanılan yollarda daha fazla olmaktadır.

Zor optimizasyon problemlerinin çözümlerine uygulanan yapay çoklu-ajan sistemler için ilginç bir model oluşturan yapay karıncaların kullanımında dolaylı haberleşme (stigmergy) özelliği etkin olmaktadır. Bu özellik, karıncaların birbirleriyle dolaylı olarak haberleşmesini sağlamaktadır. Dolaylı haberleşme ise karıncaların yollara bıraktıkları kimyasal maddeyle (feromon) olmaktadır. Doğal karıncalara benzer olarak, yapay karıncalar uygulandıkları optimizasyon problemlerine çözüm oluştururken, karşılaştıkları problem durumları ile ilişkilendirilen uygun ‘feromon değişkenleri’ni değiştirmek suretiyle feromon bırakma işini taklit ederler.

Yapay karınca ajanlarda kullanılan bir diğer özellik ise pozitif geri besleme mekanizmasıdır. Bu özellik sayesinde çözümler ile değerlendirme arasındaki koordinasyon sağlanmaktadır. Yapay karıncalar daha düşük maliyetli çözümü temsil eden kısa yolları uzun yollardan daha kısa sürede geçebilmekte ve böylece ilave feromon’u daha hızlı bir şekilde bu yollara bırakmaktadır. Sonuç olarak, yol ne kadar kısa olursa birim zamanda o kadar çok feromon bırakılmaktadır, böylece bu yoldan daha fazla karınca geçmektedir. Bu olaya pozitif geri besleme denilmektedir. Bırakılan feromon’un miktarı karıncanın oluşturmuş olduğu çözümün kalitesi ile doğru orantılıdır. Bu sayede, yüksek kaliteli çözüm üretilmiş ise bu çözümün belirtildiği hareket yolunda kalite derecesiyle doğru orantılı olacak şekilde fazla miktarda feromon maddesi bulunacaktır. Optimizasyon işlemlerinde pozitif geri besleme kullanılırken erken yakınsamadan kaçınmak gerekmektedir. Erken yakınsama, çok iyi olmayan bireylerin araştırma uzayının daha fazla incelenmesini engelleyecek şekilde popülasyonun kontrolünü ele geçirme durumudur. Feromon izi buharlaşması ve rasgele

durum geçişleri, pozitif geri beslemenin dezavantajlarını ortadan kaldırmada etkili olmaktadır.

KKO algoritmasında sonlu büyüklükteki yapay karınca kolonisi, incelenmekte olan optimizasyon probleminde yardımlaşmayı esas alarak kaliteli çözümler üretmeye çalışmaktadır. Her karınca başlangıç durumundan başlayarak bir çözüm veya çözümün bir parçasını üretir. Çözümün üretilmesinde karıncaların performansından bilgiler biriktirilmekte ve bu bilgiler genel çözüme ulaşmak amacıyla değerlendirilmektedir. Genel çözüme ilişkin bilgi bütün karıncalar tarafından araştırma süresince toplanan ve feromon izi üzerinde kodlanmış bulunan probleme özgü sezgisel bilgileri içerir.

Adaptif ve yardımlaşma doğasının bir neticesi olarak KKO algoritması, özellikle dağıtık yapıda olan rasgele problemler için uygundur. KKO algoritmasının bu karakteristiği özellikle elektronik haberleşme ve bilgisayar ağları gibi dağıtık yapı teşkil eden problem sahalarına yoğun olarak uygulanmaktadır [92]. Eşitlik 4.1’de karıncaların yol seçim işleminde kullandığı olasılık tabanlı fonksiyon verilmektedir. Daha önce bahsedilen feromon buharlaşma mekanizması bütün karıncaların araştırma uzayında aynı bölgeye doğru sürüklenmesini önlemektedir. Feromon miktarlarındaki buharlaşma ile meydana gelen değişim Eşitlik 4.2’de yer almaktadır. Olasılık tabanlı yapılan işlemler ve feromon izindeki değişim miktarı elde edilen bilgiler kullanılarak durum uzayındaki yeni noktaların araştırılmasını sağlamaktadır.

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{j \in N(i)} \tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}, & j \notin \text{tabu}^i \text{ durumunda} \\ 0 & \text{farklı durumlarda} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij}(t) \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.1 ve 4.2’de  $\tau_{ij}$   $i$  ve  $j$  yolları arasındaki feromon miktarını,  $\eta_{ij}$  sezgisel ifadeyi (genellikle yol uzunluğunun tersi olarak alınmaktadır),  $N(i)$   $i$  noktasının komşuluğunu,  $\alpha$  ve  $\beta$  ağırlıklandırma parametrelerini ve  $\rho$  ise buharlaşma katsayısını ifade etmektedir. Karıncalar yaptıkları her tur sonunda gelmiş oldukları yola pozitif geri beslemeyi

gerçekleştirmek amacıyla bir miktar feromon bırakırlar. Bu miktar geldikleri yolun uzunluğuyla ters orantılı olmaktadır. Bir karınca ne kadar kısa bir tur meydana getirirse bu turu oluşturmak için kullandığı hatlara bıraktığı feromon miktarı da o kadar fazla olmaktadır. Bu şekildeki bir yaklaşım iyi çözümlere doğru araştırmanın yönlendirilmesine neden olmaktadır. Feromon buharlaşmasıyla da sistemin yerel bir çözümde tıkanıp genel çözüme gidilememesinin önüne geçilmektedir.

Tabu listesi (*tabu<sup>i</sup>*) olarak adlandırılan her karıncanın hafızası ziyaret edilmiş şehirleri kaydetmektedir. Böylece hafızadan yararlanmak suretiyle iç döngüler yapılması engellenmektedir. Ayrıca hafıza, karıncanın uğradığı köprülere tekrar dönüş yaparak yolun kalite durumunu simgeleyen feromon maddesini bırakabilmesini sağlamaktadır [91]. Belirli bir süre sonunda karıncalar en kısa yollardan istenilen noktalara erişebilecek ve uygulanan probleme karşılık gelen çözümleri üretecektir.

#### 4.1.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması

PSO algoritması sürü halinde hareket eden kuşların davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş popülasyon tabanlı ve sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır [93]. PSO’da rasgele olarak başlatılan ve muhtemel çözümleri temsil eden parçacıklar yer almaktadır. Her iterasyon sonrası parçacık sürüsü, eğilimini yem parçasına en yakın olana göre ayarlamaktadır. Her bir parçacık çözüme ulaşmayı hedefleyen bir bireyi temsil eden yapıdır. Bireyler oluşturdukları çözümün kalitesini ifade eden bir uygunluk değeri ile eşleştirilmektedir. Bu değerler gerçek çözüme olan uzaklık hakkında bilgi veren bir uygunluk fonksiyonundan elde edilir. PSO algoritmasında bireyler arasındaki bilgi paylaşımı esas alınır. Sürüdeki bir birey kendi pozisyonunu en iyi pozisyona doğru ayarlarken bir önceki tecrübesinden yararlanır.

Çok boyutlu bir arama uzayında iteratif yapıda çalıştırılan PSO algoritmasında her bir birey çözüm arayışında bulunmaktadır. Bireyleri temsil eden parçacıkların hızları ve pozisyonları her iterasyonda güncellenmektedir. Sürüdeki bireyler aşağıdaki eşitlikte (Eşitlik 4.3) verilen bir vektör olarak tanımlanmaktadır [93]. Sürüdeki bir bireyin en iyi pozisyonunu  $y_{eniyi}$ , sürünün o ana kadar elde edilen en iyi pozisyonunu da  $b_{eniyi}$

değişkenleri ifade etmektedir. Bu değişkenlerle ifade edilen  $i$ . bireyin pozisyon ve hız vektörleri Eşitlik 4.3 ve 4.4'de yer almaktadır.

$$\vec{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN}) \quad (4.3)$$

$$\vec{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}) \quad (4.4)$$

Sürüdeki tüm parçacıklar hız vektörleriyle en iyi pozisyona ulaşmaya çalışmaktadırlar.  $n$  iterasyon sonucunda parçacıkların yeni hız ve pozisyon değerleri Eşitlik 4.5 kullanılarak elde edilmektedir.

$$v_i(n+1) = k \cdot [Iw_i * v_i(n) + c_1 * r_1 * (y_{eniyi} - p_i(n)) + c_2 * r_2 * (b_{eniyi} - p_i(n))]$$

olmak üzere;

$$p_i(n+1) = p_i(n) + v_i(n+1) \quad (4.5)$$

Eşitlikte  $c_1$  ve  $c_2$  sırasıyla  $y_{eniyi}$  ve  $b_{eniyi}$  için ivmelenme sabitlerini,  $Iw_i$  parçacığın momentumunu kontrol eden eylemsizlik ağırlığını,  $r_1$  ve  $r_2$ ,  $[0,1]$  aralığında düzgün dağıtılmış rasgele üretilmiş sayıları,  $k$  ise PSO algoritmasının yakınsamasını kontrol etmek amacıyla kullanılan sınırlama parametresini göstermektedir.  $\varphi = c_1 + c_2$  olmak üzere  $k$  parametresi Eşitlik 4.6'dan hesaplanmaktadır [94].

$$k = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (4.6)$$

İvmelenme sabitleri  $c_1$  ve  $c_2$ , bir iterasyonda parçacıkların ne kadar uzağa gidebileceğini kontrol eden parametrelerdir.  $Iw_i$  eylemsizlik ağırlığı ise yerel ve bölgesel arama arasındaki ilişkiyi düzenleyen parametredir. Bu parametrenin büyük değerde alınması araştırma uzayının hızlı biçimde aranmasını sağlarken optimum noktaya hassas konumlama yapılamamasına neden olabilmektedir. Küçük değerde alınması ise algoritmanın yavaş işletilmesine rağmen yerel olarak bulunacak optimum noktanın en ince şekilde ayarlanmasını sağlamaktadır [94].

#### 4.1.4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Arılar topluluk halinde yaşayan ve birçok işlevi sürü halinde zeki olarak gerçekleştiren varlıklardır. Bal arılarının gerçekleştirdiği sürü zekasında iki önemli işlev bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, kendi kendine organize olabilme yeteneği; ikincisi ise iş bölümüdür. Koloni içerisindeki her birey merkezi bir otorite olmaksızın değişen ortam koşullarına göre organize olabilme yeteneğine sahiptir. Pozitif geri besleme, negatif geri besleme, salınımlar ve çoklu etkileşim kendi kendine organize olabilmenin temel özellikleridir. Zengin kaynaklara daha çok arının gitmesi pozitif geri beslemeyi oluşturur. Tükenen veya nektarı çıkarılmaya değerli görülmeyen nektar kaynaklarının bırakılması durumu negatif geri beslemeyi sağlayan bir işlev olmaktadır. Yeni nektar kaynaklarının bulunmasını sağlayan rasgele dolaşım ve salınımlar aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Çoklu etkileşim koloni içerisinde haberleşmeyi sağlayan bir unsurdur. İş bölümü ise kolonideki belirli bireylerin uzmanlaştıkları farklı işleri gerçekleştiriyor olmalarıdır. Arı kolonilerinde modellenen bir diğer temel özellik arıların kendi kendilerine iş paylaşımında organize olabilme yetenekleridir [95].

Arılar kovan civarında dolaşarak nektar kaynakları bulmakta ve bu kaynaklara ait bilgileri kovadaki belirli arılarla danslar aracılığıyla paylaşmaktadırlar. Yapay arı kolonisi algoritması, koloni halinde yaşayan bal arılarının nektar kaynaklarını bulma işlevini modellemektedir [96-97]. Algoritmada üç grup arı yer almaktadır; bunlar, görevli arılar, gözcü arılar ve kaşif arılardır. Temel modelde koloninin yarısı görevli arı, diğer yarısı da gözcü arılardır. Bu sayede nektar kaynağı başına bir görevli arı bulunmaktadır. Gözcü arılar görevli arılarla yapılan haberleşme neticesinde elde ettikleri bilgileri kullanarak kaynak seçiminde bulunurlar. Ayrıca her kolonide rasgele araştırma yapan kaşif arılar da bulunabilir. Kaşif arılar görevli arılardan seçilirler; bir görevli arının kaynağı tükendiğinde bu kaynağı terk etmekte ve kaşif arı olmaktadır. Görevli, kaşif ve gözcü arılar işbirliği içinde döngüsel bir işlev gerçekleştirmektedirler. Her döngüde görevli ve gözcü arılar kaynaklara gönderilir, kaynakların nektar miktarları hesaplanır ve tükenen kaynaklar var ise kaşif arı yeni kaynaklara rasgele konumlandırılır. Bahsedilen nektar kavramı bir optimizasyon probleminin muhtemel bir çözümünün kalitesini temsil eder. Kaynağın pozisyonu ise çözümün kendisine karşılık

gelmektedir. Gerçek arılar bir nektar kaynağını hızlı bir şekilde bulma ve nektarını kovana taşıma işlevini üstlenirlerken, yapay arılar araştırma uzayında kaliteli çözümler bulmaya çalışırlar. Bu çözümlerin kalite seviyeleri,  $i$  çözümün indisi olmak üzere  $\theta_i$  parametrelerine bağlı olan  $F(\theta_i)$  amaç fonksiyonundan elde edilmektedir. Amaç fonksiyonu değerinin arzu edilen değere yakınlığı kaynağın nektar miktarı yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Yapay arıların buldukları kaynakların kalitesi uygunluk fonksiyonu aracılığıyla belirlenmektedir.

Uygunluk değeri Eşitlik 4.7’de verildiği şekilde amaç fonksiyonu kullanılarak elde edilir.

$$f_i = fit(F(\theta_i)) \quad (4.7)$$

Eşitlikte  $f_i$ ,  $i$ ’nci çözümün uygunluk değeri,  $fit$  fonksiyonu ise uygunluk değerinin hesaplanması için kullanılan fonksiyonu göstermektedir. Gözcü arıların bir kaynağı seçme ihtimali ise Eşitlik 4.8’de verildiği gibi  $f_i$  değerine bağlı olmaktadır. Eşitlikte  $P_i$  değeri,  $\theta_i$  çözümünü temsil eden bir kaynağın gözcü arı tarafından seçilme ihtimalini temsil etmektedir.

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^S f_j} \quad (4.8)$$

Kaynak seçme işleminden sonra bu kaynağın komşuluğunda arayışlar yapılmakta ve daha kaliteli çözümlere ulaşılmaya çalışılmaktadır. Komşuluk belirlenmesi Eşitlik 4.9’da verildiği şekilde yapılmaktadır.

$$\theta_i(c+1) = \theta_i(c) + \phi_i(c) \cdot [\theta_k(c) - \theta_i(c)] \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.7,  $c$ . çevrimden sonraki çevrim için yeni komşuluğu  $[-1,1]$  aralığında rasgele üretilen  $\phi_i(c)$  değeri ve  $i$ . çözüm ile  $k$ . çözüm arasındaki fark kullanılarak hesaplanmaktadır.

Bir kaynağın tükenmesinin algılanması “limit” parametresiyle belirlenmektedir. “Limit” parametresi, kalite seviyesinde bir ilerleme olmadığı durumda o kaynağa giden arıların maksimum kaç defa deneme yapacağını belirleyen bir sayıdır. Bu denemeler neticesinde elde edilen çözümde bir iyileşme sağlanamamışsa işçi arı kaşif arıya dönüştürülmekte ve Eşitlik 4.10’da verilen fonksiyonla yeni bir çözüme gidilmektedir. Eşitlikte  $Q_i(c)$   $c$ ’nci için yeni çözümü,  $Q_{min}$  ve  $Q_{max}$  ise sırayla minimum ve maksimum çözüm değerlerini temsil etmektedir.

$$Q_i(c) = Q_{min} + rand(0,1)(Q_{max} - Q_{min}) \quad (4.10)$$

ABC algoritması kaliteli çözüm arayışına daha önceden verilen bir kalite değerine ulaşıncaya kadar veya önceden belirlenen maksimum çevrim sayısına erişinceye kadar devam etmektedir [96-98].

#### 4.1.5. Diferansiyel Gelişime Dayalı (DE) Algoritma

DE algoritması [99] çaprazlama, mutasyon ve seleksiyon gibi GA’larda bulunan benzer operatörleri kullanan populasyon tabanlı bir algoritmadır. Daha iyi çözümler üretme işleminde DE ve GA arasında görülen temel fark çaprazlama ve mutasyon operasyonlarında yer almaktadır. Algoritma mutasyon operatörünü bir arama mekanizması olarak kullanmaktadır. Seleksiyon operatörü ise arama uzayında daha iyi bölgelere yönlendirilmek amacıyla kullanılmaktadır. Algoritmanın işleyişinde  $D$  adet parametreden oluşan bir optimizasyon işlemi  $D$  boyutlu vektör olarak temsil edilir. Başlangıçta  $NP$  (populasyon sayısı) populasyonlu vektörler rasgele olarak oluşturulurlar. Populasyon; mutasyon, çaprazlama ve seleksiyon operatörlerinin uygulanmasıyla başarılı bir şekilde geliştirilir. Bu operatörlerin işleyişi sırayla açıklanacak olursa:

**Mutasyon** :  $i$ ’nci vektörün  $G$ ’nci neslini temsil eden vektör için mutasyon vektörü

aşağıdaki Eşitlik 4.11’de verildiği gibi üretilmektedir. Eşitlikte,  $i, r_1, r_2, r_3$  değerleri  $\{1,2,\dots, NP\}$  aralığından rasgele seçilmiştir ve birbirinden farklıdır. Algoritma işleyişi süresince adım büyüklüğünü gösteren  $F$  ise  $(x_{r2,G}-x_{r3,G})$  fark vektörünün bir oranlama faktörüdür.

$$v_{i,G+1} = x_{i,G} + K \cdot (x_{r1,G} - x_{i,G}) + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (4.11)$$

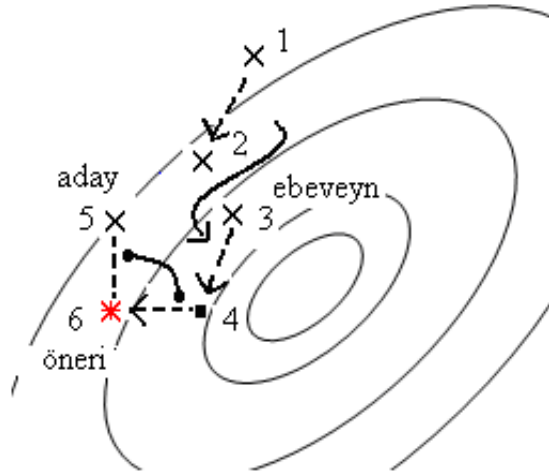
**Çaprazlama** : Ebeveyn vektör, mutasyona uğramış vektör ile birleşir ve bir deneme vektörü ( $u_{ji,G+1}$ ) oluşturulur:

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } (rnd_j \leq CR) \text{ or } j = r_{ni} \\ x_{ji,G} & \text{if } (rnd_j > CR) \text{ and } j \neq r_{ni} \end{cases} \quad (4.12)$$

Burada  $j = 1,2,\dots,D$  ve  $r_j \in [0,1]$  aralığında rasgele bir değerdir.  $CR \in [0,1]$  aralığında çaprazlama oranı ve  $r_{ni} \in (1,2,\dots,D)$  rasgele seçilen indekstir.

**Seleksiyon** : Populasyon içerisinde bütün çözümler uygunluk değerlerine bakılmaksızın ebeveyn olarak aynı seçilebilme şansına sahiptirler. Yeni vektör mutasyon ve çaprazlama operasyonları değerlendirildikten sonra üretilmektedir. Sonra, yeni vektör ile ebeveyn vektörünün performansı mukayese edilerek daha iyi olan seçilmektedir. Eğer ebeveyn hala daha iyi durumda ise populasyon içerisinde tutulmaya devam edilmektedir.

DE işlevi Şekil 4.1’de detaylı olarak gösterilmektedir: iki populasyon üyesi (1,2) arasındaki fark üçüncü populasyon üyesine (3) eklenmekte, sonuç (4) aday (5) ile çaprazlamaya tabi tutulmakta ve bir çözüm önerisi (6) elde edilmektedir. Öneri değerlendirilmekte ve daha iyi bulunduğu takdirde aday yerini almaktadır [100, 101].



Şekil 4.1. DE’de yeni bir çözümün elde edilmesi

## 4.2. Referans Alınan KAA Yönlendirme Protokolleri

Önerilen yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesinde ve performans sonuçlarının karşılaştırılmasında alt bölümlerde yer alan algoritmalarından faydalanılmıştır.

### 4.2.1. LEACH Protokolü

LEACH protokolü, kümeleme tabanlı KAA yapılarında periyodik veri transferinin gerçekleştirilmesinde kullanılan popüler bir yönlendirme tekniğidir. Bu tekniği kullanan bir ağ yapısında, ağ elemanları belirli kümeler ayrılmakta ve her kümeye küme içerisinde bir başkan seçilmektedir. Daha sonra algılayıcı elemanlar üzerindeki verileri bu başkanlar aracılığıyla merkeze iletirler. Veri iletimi sonunda bir sonraki tur için kümeler ve başkanları rasgele tabanlı olarak yeniden belirlenmektedir.

Bu protokol, elemanlara küme başkanlığı ve üye eleman olmak üzere iki farklı rol vererek ağ ömrünü maksimumda tutmaya çalışır. Küme başkanları küme içerisinde bilgiyi toplayıp birleştirmek ve birleştirilen bu bilgiyi merkeze iletmekle sorumludur. Küme içerisindeki elemanlar birbirine nispeten yakın oldukları için haberleşmede daha az enerji harcamakta, küme başkanları ise baz istasyonuna olan uzaklıkları nedeniyle daha fazla enerji harcamak durumundadırlar. Her turda küme başkanları seçimi rasgele olduğundan ağ üzerinde enerji harcaması dengelenmeye çalışılır. Ancak bazı dezavantajlar söz konusudur; Bunlardan birincisi ağ üzerinde bütün elemanlar baz

istasyonu ile haberleşebilecek yetenekte olmalıdırlar. Bu ise her elemanın donanımsal olarak güçlü yapıda olmasını gerektirmektedir. İkincisi, küme başkanları rasgele seçildiğinden dolayı bazı bölgelerde diğer bölgelere kıyasla daha fazla sayıda üye eleman bulunabilir. Ayrıca kümelerdeki elemanların küme başkanları ile arasındaki mesafelerle, küme başkanlarının baz istasyonuna olan mesafeleri dikkate alınmamaktadır. Burada özetlediğimiz son iki dezavantaj, ağ üzerinde fazla enerji sarfiyatına neden olabilmektedir. LEACH algoritmasının geliştiricileri bu problemi küme başkanlarını ağ üzerinde düzgün bir dağılımla yerleştirerek çözmüşlerdir [26]. Ancak bu yöntemi gerçekleştirmek için elemanlar üzerinde GPS gibi pozisyon bilgilerini algılayabilecek donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ise ekonomik olmamakla birlikte, algılayıcı eleman boyutlarını artırmakta ve ayrıca bu donanımın çalışması için de ilave enerji sarfiyatını gerektirmektedir. Sonuç itibariyle bu tür donanımsal özellikler içermeyen ağ yapılarında algılayıcı elemanlara ait pozisyon bilgileri alınamamakta ve bu tür algoritmaların üretebileceği performans iyileştirmeleri gözlenememektedir.

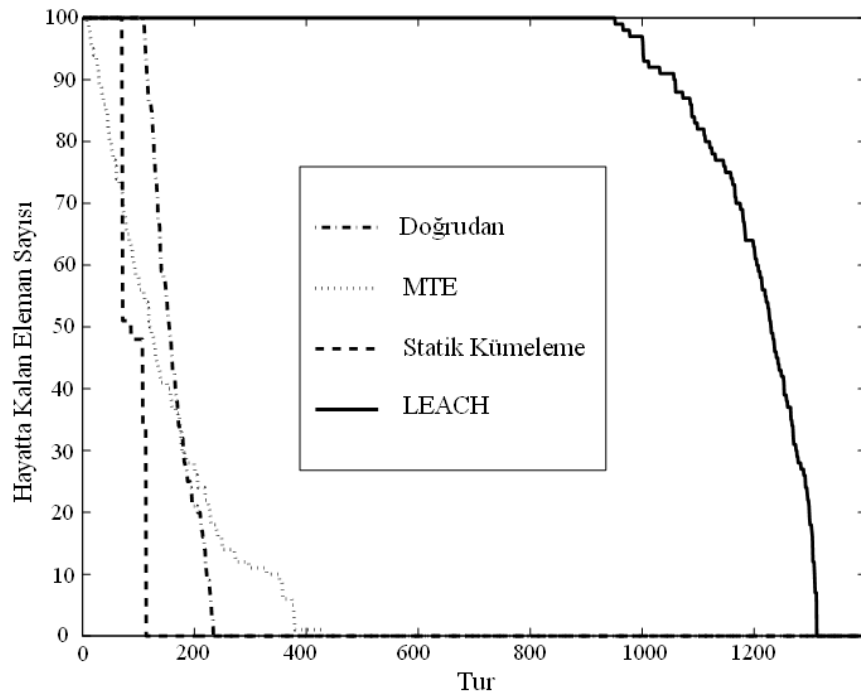
LEACH algoritmasında küme başkanları rasgele olarak seçilmektedirler. Bütün algılayıcı elemanlar küme başkanı olarak seçilebilmek için daha önceden belirlenen  $P$  olasılık katsayısını kullanmaktadır. Elemanlar, başkan veya üye olmak için gereken kararı kendileri verirler. Bu karar için Eşitlik 4.13 kullanılmaktadır.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot [r \bmod (1/P)]} & \text{eğer } n \in G, \\ 0 & \text{farklı durumda} \end{cases} \quad (4.13)$$

Eşitlikte  $T(n)$ ,  $n$ . eleman için eşik değerini,  $r$ , hali hazırdaki tur indisini ve  $G$ 'de daha önceki turlarda seçilmemiş olan elemanların kümesini ifade etmektedir. LEACH Algoritması, iki adet işletim aşamasına sahiptir. Başlangıçta kurulum aşaması gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada elemanlar Eşitlik 4.13'ü kullanarak küme başkanı olmaya veya olmamaya karar vermektedir. Elemanlar  $(0,1]$  aralığında rasgele bir sayı üretmekte ve bu değer  $T(n)$  değerinden küçükse kendilerini küme başkanı olarak ilan etmekte ve ağa tanıtım mesajı yayınlamaktadır. Küme başkanlarınca bu mesajların yayınlanmasından sonra, elemanlar gelen mesajın sinyal şiddetine bakarak kendilerini

en yakın küme başkanına üye etmekte ve bu başkana üyelik isteğini içeren mesajı göndermektedir.

Şekil 4.2 üzerinde doğrudan haberleşme, LEACH, Minimum İletim Enerjisi (Minimum Transmission Energy – MTE) yönlendirmesi ve küme başkanları ve kümelerin başlangıçta oluşturulduğu statik kümeleme protokolünün ürettiği sonuçlar görülmektedir. 100 elemanlı bir ağ yapısı için alınan sonuçlarda her bir elemanın başlangıç enerjisi 0.5J olarak verilmiştir. Diğer parametreler ise  $E_{elek}$  için 50nJ/bit,  $E_{amp}$  için 100pJ/bit/m<sup>2</sup> ve paket büyüklüğü için 2000 bit olmaktadır. LEACH kullanılarak gerçekleştirilen yapıda ilk elemanın enerjisinin tamamen tükenmesi için geçen süre diğer protokollerden en az 8 kat daha uzun, son elemanın enerjisinin tamamen tükenmesi için geçen süre de en az 3 kat uzun olmaktadır. Şekil üzerinde yer alan sonuçların farklı enerjili ağlar için sayısal değerleri Tablo 4.1’de verilmektedir. LEACH protokolü diğer elemanlara kıyasla daha fazla enerji tüketiminde bulunan küme başkanlarını doğal dağılımla her turda yeniden belirlemektedir. Dolayısıyla ağ üzerindeki elemanların yaşam süreleri artmaktadır.



Şekil 4.2. 0.5 J/Elemen enerjili KAA yapısının ağ ömrü

Tablo 4.1. Farklı enerjili ağlarda ilk ve son elemanların ölüm zamanları

| <b>Enerji<br/>(J/Eleman)</b> | <b>Protokol</b> | <b>İlk Eleman<br/>Ölümü (tur)</b> | <b>Son Eleman<br/>Ölümü (tur)</b> |
|------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0,25                         | Doğrudan        | 55                                | 117                               |
|                              | MTE             | 5                                 | 221                               |
|                              | Statik Kümeleme | 41                                | 67                                |
|                              | LEACH           | 394                               | 665                               |
| 0,5                          | Doğrudan        | 109                               | 234                               |
|                              | MTE             | 8                                 | 429                               |
|                              | Statik Kümeleme | 80                                | 110                               |
|                              | LEACH           | 932                               | 1312                              |
| 1                            | Doğrudan        | 217                               | 468                               |
|                              | MTE             | 15                                | 843                               |
|                              | Statik Kümeleme | 106                               | 240                               |
|                              | LEACH           | 1848                              | 2608                              |

#### 4.2.2. GA ve PSO Kullanılarak Gerçekleştirilen Yönlendirme Protokolleri

Yönlendirme işlemlerinde algılayıcı bölge üzerinden veri toplama yapılırken verinin baz istasyonuna mümkün olduğunca az enerji ve bant genişliği tüketimi ile taşınması gerekmektedir. Kümeleme tabanlı yönlendirme tekniklerinden biri olan LEACH ile ağ üzerindeki elemanların enerji durumlarının dengelenmesi hedeflenmektedir. Ancak uzun dönemli gerçekleştirilen ağ işlevleri sonucunda her elemanın enerjisinin dengeli bir şekilde tükenmesinin sağlanmasının zor olduğu gözlemlenmiştir. Enerji farklılıklarının giderilmesinde küme başkanlarının ve kümelerinin oluşumunda kullanılan GA ve PSO algoritmaları optimum düzeyde enerji dengelemesini hedeflemektedir [40, 102].

Küme başkanları için gerçekleştirilen seçim işlemi bu başkanların baz istasyonuna ve kümedeki elemanlara olan uzaklıklarına bağlı olacak şekilde enerji harcamasında etkili olmaktadır. Daha dengeli enerji tüketiminin gerçekleştirilebilmesi için LEACH'in kullandığı parametrelere ilave olarak ekstra parametrelerin kullanılması gerekmektedir.

GA ve PSO algoritmalarıyla geliştirilen protokollerde bu parametreler, algılayıcı elemanların mevcut enerji seviyeleri ve elemanların birbirine olan uzaklıklarıdır.

Baz istasyonunca merkezi olarak işletilen protokoller, GA veya PSO algoritması kullanılarak ağ ömrünü arttırmaya çalışmaktadır. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için küme içi elemanların küme başkanlarına olan mesafeleri ve ağ elemanlarının enerjileri dikkate alınarak optimum küme başkanlarının seçimi yapılmaktadır.

[40] nolu kaynakta önerilen çalışmada GA ve PSO algoritması kullanılarak yönlendirme yaklaşımları gerçekleştirmiş ve alınan performans sonuçları K-ortalama (K-means) algoritmasının ürettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

GA ve PSO algoritması kullanan protokollerin başarısını test etmek için yapılan benzetimlerde 100 elemanlı 500 x 500 m<sup>2</sup>'lik alandaki KAA yapıları kullanılmıştır. Ağdaki elemanların %20'sinin 5 J, diğerlerinin 2 J enerjileri olacak şekilde rasgele dağılımlı olarak bölge üzerine yerleştirilmiştir. Baz istasyonu algılama bölgesine yakın bir pozisyon olan X = 250m, Y = 575 m pozisyonuna yerleştirilmiştir. Küme başkanları sayısı LEACH'de alındığı gibi "5" olarak belirlenmiştir. Radyo modeli ise 3. bölümde verildiği gibi alınmıştır. Benzetimler ağdaki enerji tükenene kadar devam ettirilmiştir.

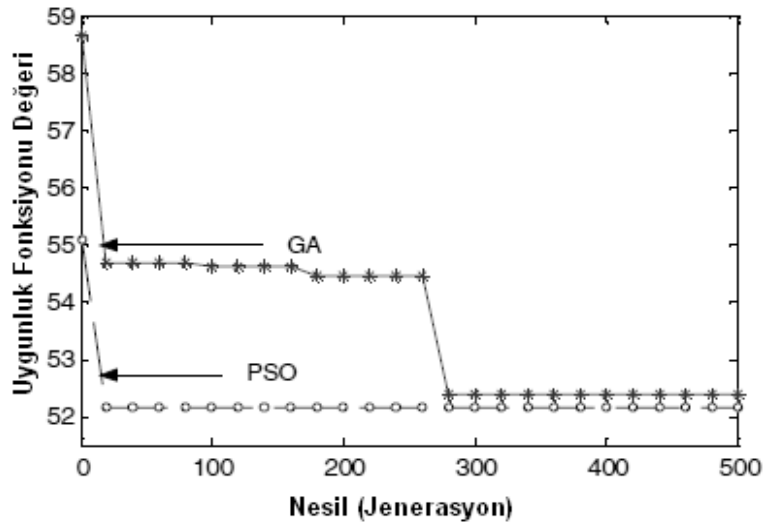
Kıyaslamalarda gerçekçi sonuçların alınması için GA ve PSO algoritmalarının her ikisinde de eşit sayıda (30) popülasyon büyüklüğü alınmıştır. Rulet tekerleği metoduyla GA, orantısız seçim strateji kullanılacak şekilde çalıştırılmıştır. İyi sonuçların elde edilebilmesi için PSO algoritması farklı  $c_1$ ,  $c_2$  ve  $w$  parametreleriyle, GA ise farklı çaprazlama ( $cr$ ) ve mutasyon oranlarıyla ( $m$ ) koşturulmuştur. Daha sonra Tablo 4.2'de sunulan elde edilen en iyi sonuçları veren değerler benzetim sonuçlarının alınmasında kullanılmıştır.

Tablo 4.2. PSO ve GA parametre değerleri

| PSO Parametreleri |       |      | GA Parametreleri |      |
|-------------------|-------|------|------------------|------|
| $c_1$             | $c_2$ | $w$  | $m$              | $Cr$ |
| 2,0               | 2,0   | 0,72 | 0,01             | 0,7  |

Simülasyonlarda algoritmayı durdurma kriteri olarak maksimum nesil sayısı değeri 500 alınmıştır. Şekil 4.3’de GA ve PSO algoritmalarının Eşitlik 4.13’de verilen maliyet fonksiyonu kullanıldığında yürütülen minimizasyon işleminde elde edilen yakınsama grafiği yer almaktadır. Grafik üzerinden PSO algoritmasının daha kısa mesafelerde haberleşme gerçekleştirecek şekilde, enerjisi nispeten daha fazla elemanları küme başkanlığına seçerek maliyet fonksiyonunda daha hızlı minimizasyon yaptığı görülmektedir.

Şekil 4.4’de LEACH, LEACH-C, K-ortalama, GA ve PSO algoritmalarıyla gerçekleştirilen yönlendirme işlemlerinin ağ ömrü üzerinde etkisi görülmektedir. Şekil 4.5’de ise bu yönlendirme tekniklerinin baz istasyonunca alınan sinyal sayısına etkisini gösteren grafik yer almaktadır.

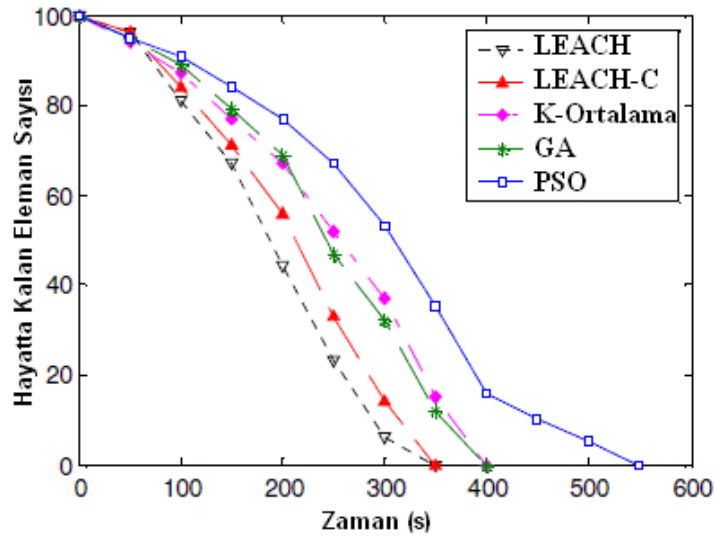


Şekil 4.3. Uygunluk fonksiyonunun yakınsaması

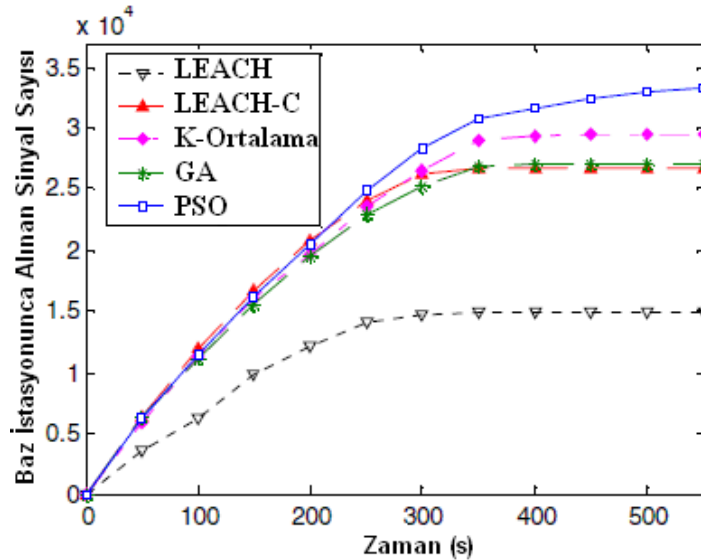
Sonuçlar, PSO, GA ve K-ortalama algoritmaları ağ ömrünü arttıracak şekilde LEACH ve LEACH-C’ den daha performanslı olduğunu göstermektedir. Bu üç algoritma küme içi haberleşme mesafelerini kısaltmakta ve kümelerin ağ üzerinde daha düzgün bir dağılımla oluşmasını sağlayarak ağ ömrünü arttırmaktadır. Kısalan haberleşme mesafeleriyle enerji harcaması da azalmakta ve algılayıcı elemanlar daha uzun süre hayatta kalabilmektedirler. PSO’nun diğer algoritmalara karşı daha fazla miktarlarda mesaj alınacak şekilde uyarlanabilir olduğu görülmektedir. PSO algoritması, küme başkanları seçiminde daha fazla enerjili elemanları gözettiği için elemanların

enerjilerinin tükenmesi durumu daha geç olmakta ve dolayısıyla bu elemanlar enerjileri tamamen tükenmeden önce daha fazla mesaj gönderebilmektedirler. Bu durum özellikle LEACH ve LEACH-C protokollerinde oldukça olumsuz benzetim sonuçlarıyla gözlenmektedir. Çünkü bu iki algoritma, küme başkanları seçimine zayıf enerjili elemanları da dahil etmekte ve sonuç olarak bu elemanların enerjileri daha kısa zamanda tükenmektedir.

Performans sonuçlarını ifade eden bu şekiller üzerinden, PSO algoritmasıyla geliştirilen yönlendirme tekniğinin diğer tekniklere kıyasla daha uzun süreli ağ ömrünü sağladığı ve daha fazla veri sinyalinin gerçekleştirilebildiği görülmektedir.



Şekil 4.4. Hayatta kalan eleman sayısının zamana bağlı grafiği



Şekil 4.5. Alınan sinyal sayısının zamana bağlı grafiği

#### 4.2.3. Diferansiyel Gelişime Dayalı Algoritma Kullanılarak Gerçekleştirilen Kablosuz Algılayıcı Ağ Yönlendirmesi

LEACH protokolü kullanılırken küme elemanlarının dengeli olarak dağıtılamamasından dolayı ağ üzerinde zamanla bazı algılayıcıların enerjileri diğerlerine kıyasla çok daha erken tükenebilmektedir. Bu durumda ağ üzerinde bazı bölgelere ait gözlemler alınamamaktadır. LEACH protokolünün bu dezavantajını gidermek amacıyla DE algortması kullanılarak mevcut LEACH protokolü üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır [48]. Bu iyileştirmeler küme başkanlarının seçimi işleminde bazı kriterleri kullanmaktadır. Kriterler temel olarak aday başkanlarının küme elemanlarına olan uzaklıklarını ve sahip oldukları enerji kaynaklarının durumlarını ele almaktadır. Eşitlik 4.14’de bu kriterler DE algoritmasında kullanılacak olan amaç fonksiyonunu oluşturacak şekilde verilmektedir.

$$f(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \alpha \cdot E_j + \beta \cdot \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq j}^n E_i \cdot e^{(r_i/l)} \right] \quad (4.14)$$

Eşitlikte  $f(i)$   $i$ ’nci aday için üretilen amaç fonksiyonu değerini,  $E$  enerji durumunu,  $r_i$   $i$ ’nci elemanın  $j$ ’nci elemana olan uzaklığı,  $n$  eleman sayısını,  $\alpha$  ve  $\beta$  ise ağırlıklandırma parametrelerini ifade etmektedir.

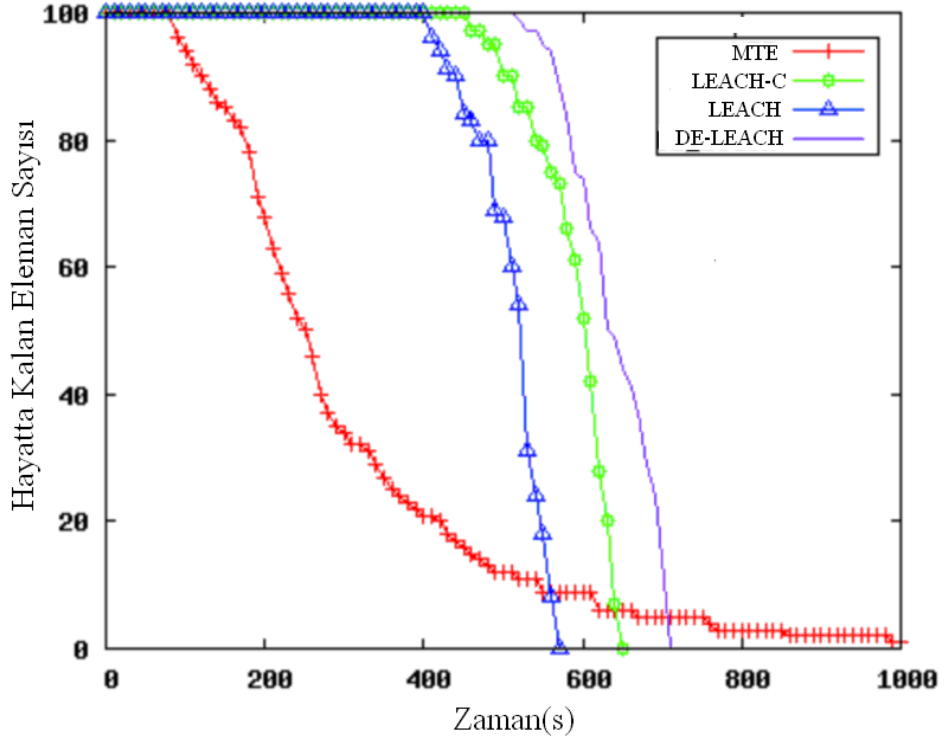
Benzetimlerde radyo modeli olarak boş uzay ve yer yansımali model kullanılmıştır. Bu modellere ilişkin olarak kullanılan eşitlikler Eşitlik 4.15 ve 4.16’da verilmektedir.

$$E_{Al}(k) = E_{elek} \cdot k, \quad (4.15)$$

$$E_{Vr}(k, d) = E_{elek} \cdot k + E_{yuk} \cdot k \cdot d^n \quad (4.16)$$

Eşitliklerde  $d$  haberleşme mesafesi olmak üzere küme içi haberleşmelerde kullanılan boş uzay modeline ilişkin parametre değerleri olarak  $n=2$  ve  $E_{amp}=10\text{pJ/bit/m}^2$  alınmıştır. Küme dışı haberleşmelerde kullanılan yer yansımali modele ilişkin parametre değerleride  $n=4$  ve  $E_{amp}=0.0013\text{pJ/bit/m}^4$  olarak alınmıştır. Radyo elektroniği donanımına ait parametre ( $E_{elek}$ ) değeri ise  $50\text{nJ/bit}$  olarak kabul edilmiştir. Ağ,

100mx100m alan üzerinde rasgele dağıtılmış 100 adet algılayıcı ve ( $x=50m$ ,  $y=175m$ ) noktasına konumlandırılmış bir baz istasyonundan meydana gelmektedir. 2J başlangıç enerjisine sahip algılayıcılar gözlem bilgilerini 25 Bayt başlık ve 500 Bayt veriler halinde periyodik olarak 1Mbit/s hızıyla göndermektedir. [48] nolu referansta yer alan çalışmada farklı sonuçlar üzerinden en iyi DE parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. Bu değerler için adım büyüklüğünün ( $F$ ) [0.6,0.8], çaprazlama oranının ( $CR$ ) [0.2,0.3] aralığında olması önerilmiştir. Alınan benzetim sonuçları üzerinden (Şekil 4.6) MTE protokolünün performansının en zayıf kalan eğriyi gösterdiği görülmektedir. LEACH-C protokolü ağ ömrü süresince LEACH protokolünden başarılı sonuçlar üretmesine rağmen genel olarak DE-LEACH protokolünün performans eğrisi altında kalmaktadır. Sonuç olarak DE-LEACH protokolü daha az eleman ölümüne (enerjisi tükenen eleman) neden olacak şekilde daha uzun süreler için ağ işleyişini devam ettirebilmektedir.



Şekil 4.6. Hayatta kalan eleman sayısının zamana bağlı grafiği

#### 4.2.4. KKO Tabanlı Olarak Geliştirilen Enerji Tasarruflu KAA Yönlendirme Algoritmaları

BABR (Basic ant-based routing algorithm), IABR (Improved ant-based routing algorithm) ve EEABR (Energy-efficient ant-based routing algorithm) bu tür uygulamalara örnek olarak verebileceğimiz KAA yönlendirme teknikleri olmaktadır [38].

Temel Karınca Tabanlı KAA Yönlendirme (Basic Ant Based Routing for WSNs-BABR) uygulamasının genel işleyişi, aşağıda yer alan adımlarla özetlenen bir yönlendirme protokolüdür.

1. Belirli aralıklarla  $k$  indisli karınca merkeze (baz istasyonuna) doğru hareket etmekte ve uğradığı güzergahtaki elemanlar  $M_k$  hafızasına kaydedilmektedir.
2. Ziyaret edilen her  $r$  elemanında bir sonraki hedef  $s$  elemanı ihtimale dayalı olan KKO sezgisel ifadesi kullanılarak (Eşitlik 4.17) seçilmektedir.

$$P_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[T(r, s)]^\alpha [E(s)]^\beta}{\sum_{u \in M_k} [T(r, s)]^\alpha [E(s)]^\beta} & s \in M_k \text{ ise,} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.18’de verilen  $P_k(r, s)$ ,  $k$  karıncasının  $r$  pozisyonundan  $s$  pozisyonuna gitme ihtimalini,  $T(r, s)$  yoldaki feromon maddesi miktarını,  $E$  ise sezgisel ifade olan  $(C - e_s)$ ’yi vermektedir. Sezgisel ifadede yer alan  $C$  başlangıç enerjisini,  $e_s$  ise  $s$  elemanının şu anki enerjisini ifade etmektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları ise feromon miktarı ve sezgisel ifadelerin olasılık fonksiyonu üzerindeki ağırlıklarını belirleyen katsayılardır.

3. Hedefe ulaşan karıncalar geçtikleri güzergaha belirli miktarda feromon bırakırlar.
4. Bırakılan feromon miktarı yolun kalite durumunu yansıtacak şekilde Eşitlik 4.18’den hesaplanmaktadır.

$$\Delta T_k = \frac{1}{N - Fd_k} \quad (4.18)$$

Eşitlikte,  $N$  eleman sayısını,  $Fd_k$  ise  $k$  karıncası tarafından kat edilen yolun uzunluğunun güzergah üzerinden geçilen eleman sayısı olarak verilen değeridir.

5. Feromon bırakmak için dönüş yapan bir karınca, bir elemana uğradığı zaman Eşitlik 4.19 ile tanımlı feromon güncellemesi işlemi yapılmaktadır.

$$T_k(r,s) = (1-p) T_k(r,s) + \Delta T_k \quad (4.19)$$

Eşitlikte  $p$  buharlaşma katsayısı  $T_k(r,s)$  ise yoldaki mevcut feromon miktarını göstermektedir.

6. Dönüş yapan karınca başlangıçta gönderildiği kaynak elemana geldiğinde bu karınca ile ilgili işlem tamamlanmaktadır.

BABR protokolü üzerine geliştirilen ve karınca tabanlı bir protokol olan “Karınca Tabanlı KAA Yönlendirmesi” (Improved Ant Based Routing for WSNs-IABR) tekniği daha az hafıza kullanacak şekilde düzenlenmiştir. Ayrıca karıncaların güzergahındaki enerji durumlarında da iyileştirmeler yapılmıştır. IABR protokolünde geri dönüş yapan karıncalar yönlendirme tablosu olarak hafızalarında sadece kaynak elemanın adresini içermektedirler. Güzergah üzerindeki elemanlar komşuluk tablolarından kendisine gelen karıncanın hangi yöne gideceğini belirlemektedir. Bu sayede hafıza gereksinimi düşürülmüş olmaktadır. Ayrıca geri dönüş işlemi gerçekleştirilen karıncaların yola bıraktıkları feromon miktarları da Eşitlik 4.20’deki gibi yeniden düzenlenmiştir.

$$\Delta T_k = \left[ C - \left( \bar{E}_k - \frac{1}{\min(E_k)} \right) \right]^{-1} \quad (4.20)$$

Eşitlikte  $E_k$ ,  $k$  karıncasının ziyaret ettiği elemanların enerji durumlarını gösteren vektördür.

IABR protokolü üzerinde iyileştirme yapan bir diğer protokol “Enerji - Tasarruflu Karınca Tabanlı KAA Yönlendirmesi (Energy-Efficient Ant Based Routing for WNSs-EEABR) tekniğidir. Bu teknik hafıza kullanımında ve feromon miktarı eşitliğinde yeni düzenlemelerin yapıldığı bir protokol olarak önerilmiştir. Protokolde karıncaların geçtikleri son iki noktayı hafızalarında tutarak güzergah boyunca bulunan diğer bilgileri

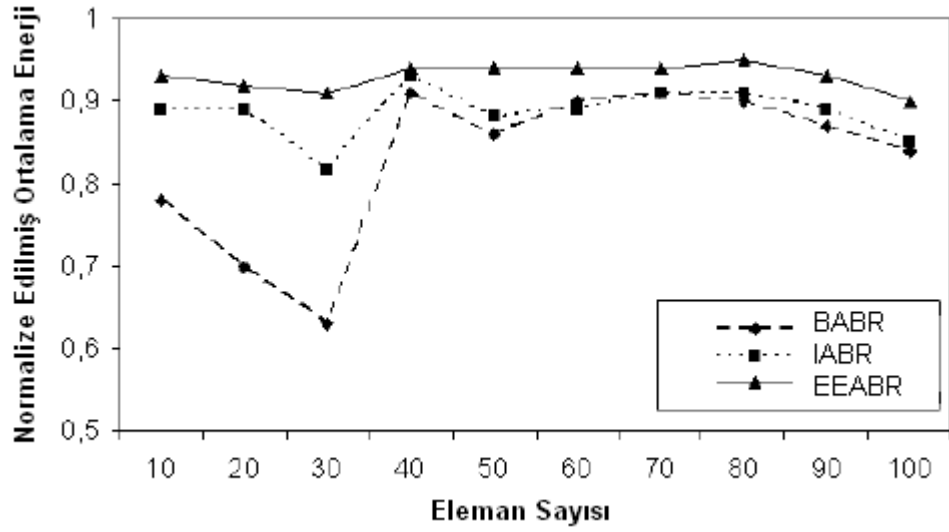
elemanlardan alınacak şekilde hafıza kullanımı yeniden düzenlenmiştir. İlave feromon miktarı eşitliği ise Eşitlik 4.21’de verilmiştir.

$$\Delta T_k = \left[ C - \left( \frac{E_k^{\min} - Fd_k}{E_{avg}^{\min} - Fd_k} \right) \right]^{-1} \quad (4.21)$$

Ayrıca yollardaki feromon miktarlarının güncellenmesinde Eşitlik 4.22 kullanılmıştır:

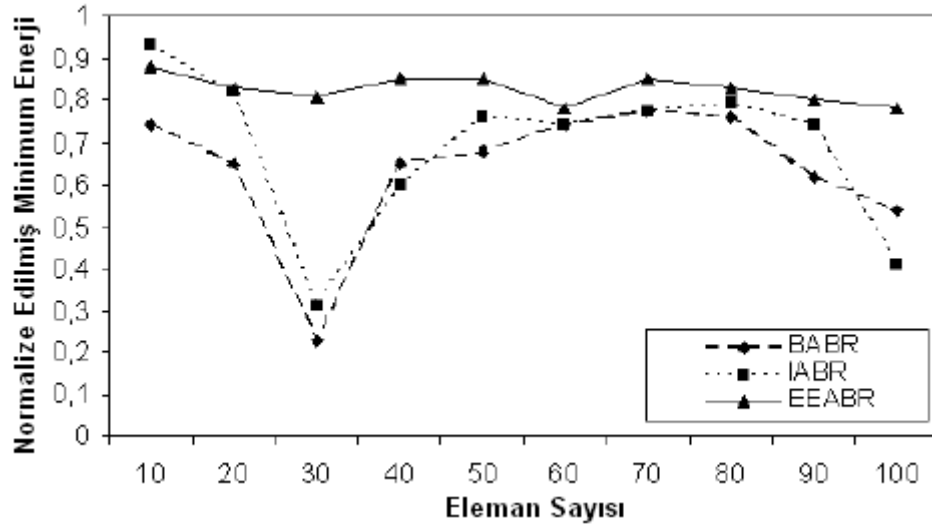
$$T_k(r, s) = (1 - p) \cdot T_k(r, s) + \frac{\Delta T_k}{\varphi \cdot Bd_k} \quad (4.22)$$

Eşitlikte  $Bd_k$ , ziyaret edilen eleman sayısını,  $\varphi$  ise düzenleyici katsayıyı göstermektedir. BABR, IABR ve EEABR protokollerinin performans grafikleri Şekil 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. 0.5 J/Element enerjili KAA yapısının ağ ömrü-I

Benzetim sonuçları 10 ile 100 arasında farklı eleman sayıları içeren KAA yapıları için elde edilmiştir. Algılama bölgesinin alanı ise 10, 20, 30, 40 elemanlı KAA yapıları için sırayla  $200 \times 200 \text{ m}^2$ ,  $300 \times 300 \text{ m}^2$ ,  $400 \times 400 \text{ m}^2$  ve  $500 \times 500 \text{ m}^2$  alınmıştır. 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 elemanlı KAA yapılarında ise bu alan  $600 \times 600 \text{ m}^2$  alınmıştır. Şekiller üzerinden farklı sayılar içeren KAA yapılarında EEABR protokolünün diğer protokollere kıyasla ağ ömrünü daha uzun sürelerce devam ettirecek ölçüde kısmen daha az enerji sarfiyatında bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. 0.5 J/Element enerjili KAA yapısının ağ ömrü-II

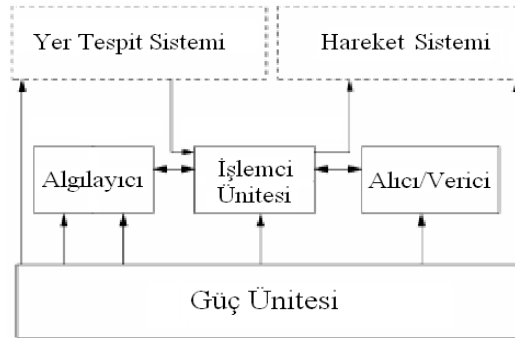
#### 4.3. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde, KAA'lara özgü nitelikler olan sınırlı enerji kaynağı, düşük haberleşme bandı ve düşük hesaplama kabiliyeti gibi kısıtlamaları dikkate alan LEACH, GA, PSO, DE-LEACH, BABR, IABR ve EEABR yönlendirme protokolleri tanıtılmıştır. Ayrıca protokollerinin geliştirilmesinde kullanılan sezgisel algoritmalar da kısaca açıklanmıştır.

## 5. BÖLÜM

### KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KARINCA KOLONİ OPTİMİZASYONU KULLANARAK YAPILAN OPTİMUM YÖNLENDİRME İŞLEMİ

Temel olarak bir algılayıcı, algılayıcı birim, işlemci birim, haberleşme ünitesi ve enerji kaynağı içermektedir. Şekil 5.1’de bir algılayıcı eleman içeriğinin şematik gösterimi yer almaktadır. Baz istasyonu, bu algılayıcı elemanlardan biri olabileceği gibi internet ortamında bir PC de olabilir, aynı zamanda algılayıcılar ve baz istasyonu sabit veya hareketli ünitelerden de meydana gelebilir [103, 104].



Şekil 5.1. Algılayıcı eleman içeriği

Klasik bilişim ağ yapılarından farklılık arz eden KAA yapıları için etkin haberleşmenin sağlanabilmesi amacıyla yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi, uygulama alanlarının artmasıyla birlikte önem kazanmıştır. Klasik ağ yapılarında yönlendirme algoritmalarına alternatif olarak güzel sonuçlar sunan karınca koloni optimizasyonu (KKO) [105-110] KAA yapıları için de uyarlanabilmektedir. Bu tip uyarlamalara örnek

olarak: Singh ve arkadaşları [36] KAA yapıları için karınca algoritması tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Ancak, bu yaklaşımda enerji ile ilgili sınırlamalar dahil olmak üzere KAA'lara özgü temel özelliklere yönelik unsurlara dikkat edilmemiştir. Zhang ve arkadaşları [37] yine karınca algoritması tabanlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Çalışmaları SC (Sensor Driven Cost Aware Ant Routing), FF (Flooded Forward Ant Routing) ve FP (Flooded Piggypacked Ant Routing) olmak üzere üç yönlendirme algoritmasını ihtiva etmektedir. Algoritmalar sistem çalışması başlangıcında karınca algoritmasına özgü bir parametre olan ilk feromon değerlerini güzel sonuçlar verecek şekilde üretmektedir. Ancak sistemin çalışmasının ileri aşamalarında SC ve FF algoritmaları için gecikmeler (latency) artmaktadır. Diğer iki algoritmaya nazaran FP algoritması hızlı veri iletimi yapabilmesine rağmen, SC ve FF algoritmalarından daha fazla enerji tüketiminde bulunmaktadır. EEABR [38] algoritması da KKO tabanlı olarak çalışan bir diğer KAA yönlendirme algoritmasıdır. EEABR, algılayıcıların enerji seviyelerini ve yönlendirilmiş yolların uzunluklarını dikkate alan etkili bir strateji kullanmaktadır.

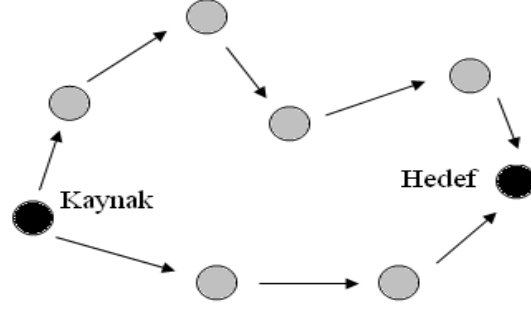
Bu bölümde KAA'lar için geliştirilen temel yönlendirme algoritmaları, bunların getirdiği avantaj ve dezavantajlar ana hatlarıyla verilmiş ve gerçekleştirilen protokol açıklanmıştır. KKO tabanlı yeni bir yaklaşım olan bu protokol "Energy Aware Routing using Ant Colony Algorithm for WSNs – EARACO" (KAA'lar için enerji durumlarını değerlendiren yönlendirme algoritması) [51-53] olarak isimlendirilmiştir. Bölümün daha sonraki kısımlarında ise bu protokolün başarısı benzetim yazılımıyla test edilmiş ve bilinen bir diğer karınca tabanlı algoritma olan "Energy Efficient Ant Based Routing Algorithm for WSNs, EEABR" (Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Karınca Tabanlı Yönlendirme Algoritması) [38] ile performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu algoritmaların farklı yapılarıdaki KAA'lar üzerindeki benzetim sonuçları tartışılmıştır.

### 5.1 EARACO Yönlendirme Protokolü

KAA'lar çok sayıda sabit veya hareketli algılayıcılarla, bu algılayıcılardan gelen verileri değerlendirmek üzere toplayan bir baz istasyonundan meydana gelirler. Verilerin merkeze hangi yollardan ne şekilde gideceğini yönlendirme algoritmaları belirlerler. Etkin ve güvenli bir veri iletişimi sağlamak amacıyla KAA'lara özgü başlıca

sınırlamalar bu yönlendirme algoritmaları tarafından dikkate alınmalıdır. KAA'lar üzerinde diğer ağlara göre daha fazla hatalarla karşılaşma olasılığı söz konusudur. Çünkü algılayıcılar bir daha bakım veya tamir yapılamayacak şartlarda genelde rasgele olarak coğrafik bölge üzerine yerleştirilirler. Enerji kaynakları sınırlı olduğu için ve çevresel şartlar (sıcaklık, nem manyetik alan girişimleri vb.) sağlıklı haberleşmeyi çok zorladığı için klasik ağ haberleşme protokollerinin kullandığı stratejiden daha farklı bir yaklaşım geliştirmek gerekebilir. Zamanla farklı elemanlar hatalarından ağ işlevinin etkilememesi ve sağlıklı yönlendirme işlevlerinin gerçekleştirilebilmesi için ağ adaptif yapıda olmalıdır.

Algılayıcı elemanlarda meydana gelebilecek enerji tükenmesi hatalı işlem, arıza vb. sıkıntıların elimine edilmesi için yönlendirme işleminde farklı alternatif yolların canlı tutulması çözüm olmaktadır. EARACO algoritması enerji durumlarına ve hatalara bakarak veriyi farklı yollardan iletme yeteneğine sahiptir. Algoritmada, veri parçalara bölünerek uygun yollardan gönderilme işlemi yapılır. Her bir parça baz istasyonuna ulaştığında veriyi gönderen kaynağa onay mesajı iletilir. Bu sayede hatalı yollarda kaybolan veri tekrar gönderilir ve garantili veri iletimi gerçekleştirilmeye çalışılır. Bu şekilde yönlendirme işleminde farklı yolları canlı tutarak ve onay mesajlarını kullanarak veri iletimi daha güvenli hale gelmektedir. Şekil 5.2'de görüleceği üzere kaynak algılayıcı elemandan hedef baz istasyonuna giden bazı yollar diğer yollardan daha kısa olabilmektedir. Bu yollardan kısa olanları, veri iletimde toplam harcanan enerjiyi azaltacağından tercih edilmelidir. Ancak bu yollar üzerinde bulunan algılayıcılarda enerji azaldığında veya hatalar olduğunda diğer yollardan veri gönderilmelidir. Başka bir ifadeyle enerjisi bol olan, kısa güzergahlı ve hatasız yollara gönderilen paket sayısı diğer yollara nazaran daha fazladır. Önerilen EARACO algoritmasıyla bu yönde bir yol seçim yaklaşımı mümkündür. Yaklaşım da enerji seviyeleri değerlendirilmekte ve fazla enerjiye sahip algılayıcılar üzerinden veri aktarımı ağırlıklı olarak tercih edilir. Yaklaşım da, ayrıca yol uzunlukları da değerlendirilmekte ve kısa olan yollara veri gönderiminde öncelik verilir.



Şekil 5.2. KAA'larda çoklu yollu veri iletim örneği

Çoğu KAA yapıları durağan olmalarına karşın eğer algılayıcı elemanların hareket etme durumları söz konusu ise KKO ile önerilen yaklaşımda ağ işlevi olumsuz bir şekilde etkilenmemektedir. Ancak, feromon maddelerinin olması gerektiği düzeylere gelebilmeleri için belirli bir süre kurulum süresine ihtiyaç duyulur. Yol durumlarına göre feromon miktarının dengelenmesi işlemi KKO algoritması işleyişi ile birlikte gerçekleşir.

KAA'larda haberleşme bant genişliği oldukça düşüktür. Dolayısıyla geliştirilen yönlendirme algoritmasının haberleşmede kullandığı kontrol parametre sayısı ve boyutu mümkün olduğunca az olmalıdır. Detayları bölümün devam eden kısımlarında açıklanan EARACO algoritmasında az sayıda kontrol parametresinin kullanılması ve ihtiyaç duyulan bant genişliği gereksiniminin düşürülmesi amaçlanmıştır.

#### 5.1.1. KAA Yapıları için KKO Yaklaşımının Uyarlanması

EERACO yöntemi KKO algoritmasını yönlendirme işleminde optimum güzergahın bulunması için kullanmaktadır. Algoritma çalışırken her bir yapay karınca ajanı ağ üzerinde uygun bir yol bulmaya çalışır. Karınca ajanlar, tek kaynaktan tek hedef elemana sekmeli olarak hareket ederek veri paketini merkeze (baz istasyonuna,  $d$ ) ulaştırırlar. Bir karınca ajanı algılayıcı eleman  $s$ 'den hareket etmekte ve komşu  $r_i$  algılayıcılar üzerinden hedef eleman  $d$ 'ye ulaşmaktadır. Hareket edilen her bir komşu eleman  $r$  seçimi, Eşitlik 5.1'den elde edilen  $P_k(r, s)$  değerine göre yapılmaktadır.

$$P_k(r,s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r,s)]^\alpha \cdot [\eta(r,s)]^\beta}{\sum_{r \in R_s} [\tau(r,s)]^\alpha \cdot [\eta(r,s)]^\beta}, & k \notin \text{tabu}' \text{ durumunda} \\ 0 & \text{farklı durumlarda} \end{cases} \quad (5.1)$$

Eşitlikte  $\tau(r,s)$  feromon değerini,  $\eta(r,s)$  enerji durumunu dikkate alan sezgisel değeri,  $R_s$  muhtemel komşu alıcı elemanları ifade etmektedir. Gönderici eleman  $r$  için  $\text{tabu}'$  daha önce alınan paket numaralarını işaret etmektedir.  $\text{tabu}'$  listesinde olan bir paket daha önceden iletildiği anlamına gelmekte ve tekrar iletilmemektedir. İletilen her bir paket numarası bu listeye eklenmektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri ise feromon izi ve sezgisel değerin formülde etkisini belirleyen bağıl ağırlıklandırma değerleridir. Feromon izleri, her bir eleman arası bağlantılara  $\text{arc}(r,s)$  iliştilmiştir. EARACO yönteminde baz istasyonu sabit olarak ele alındığı için her bir karınca ajanının son ulaşacağı hedef eleman her turda aynıdır. Enerji durumlarını dikkate alan sezgisel ifade Eşitlik 5.2'de verilmiştir.

$$\eta(r,s) = \frac{(I - e_r)^{-1}}{\sum_{n \in R_s} (I - e_n)^{-1}} \quad (5.2)$$

Eşitlikte  $I$  başlangıç enerjisini,  $e_r$  ise  $r$  elemanının kalan enerjisini ifade etmektedir. Bu eşitlik ile verinin gidebileceği alternatif komşu elemanların enerjilerine göre bağıl bir değerlendirme yapılabilmektedir ve yol uzunlukları da dikkate alınmaktadır. Uzun yollarda daha az feromon maddesi bulunmaktadır. Çünkü karıncalar turlarını tamamladıktan sonra yollara Eşitlik 5.3 ve 5.4'deki ifadeye göre feromon bırakmaktadırlar.

$$\Delta \tau^k(t) = 1 / J_w^k(t) \quad (5.3)$$

$$\tau(r,s)(t) \leftarrow \tau(r,s)(t) + \Delta \tau(r,s)(t), \quad k = 1, \dots, m \quad (5.4)$$

Eşitlikte  $\Delta \tau^k$ ,  $k$ . karınca için  $w$ . turda yola bırakılan feromon miktarı;  $J_w^k$  ise turun tamamlanması süresince toplam ziyaret edilen algılayıcı eleman sayısıdır. Burada yolun

toplam uzunluğu eleman sayısı olarak değerlendirilmektedir. Feromon değerleri algılayıcı elemanlar üzerindeki hafızalarda tutulmaktadır. Her bir algılayıcı eleman komşularına olan bağlantılarına ait feromon bilgilerini saklamaktadır. Her bir tur sonrasında  $k$  karıncası tarafından kullanılan bu bağlantılara Eşitlik 5.3’de hesaplanan  $\Delta\tau^k$  kadar feromon ilave edilmektedir. Bu işlem baz istasyonundan kaynağa onay mesajı iletilirken gerçekleştirilmekte ve yol boyunca bütün bağlantılar için aynı olmaktadır. Bağlantılarda zamanla artan feromon miktarları sürekli bir pozitif geri beslemeye neden olmaktadır. Sisteme kontrollü bir negatif geri beslemenin ilave edilmesi amacıyla Eşitlik 5.5 kullanılarak yollardaki feromon maddesinin buharlaşması sağlanmaktadır. Eşitlikte buharlaşma miktarını kontrol etmek amacıyla  $\rho \in (0,1)$  parametresi kullanılmaktadır [111].

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) \quad (5.5)$$

EARACO algoritmasının kullandığı parametrelerden,  $e_r$  (enerji durumları) ve  $\tau$  (feromon iz değerleri) algılayıcı eleman hafızalarında tutulmakta,  $J_w^k$  (yol uzunluğu) ve karınca ajanını tanımlayan indis değeri  $S\_N$  (sıra numarası olarak) iletim halinde olan veri paketi üzerinde bulunmaktadır. Performans sonuçlarının alınması için yapılan benzetim koşullarında,  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\rho$  parametreleri için Dorigo tarafından önerilen 1, 5 ve 0.5 değerleri kullanılmıştır [111].

### 5.1.2. Protokol İşlevi

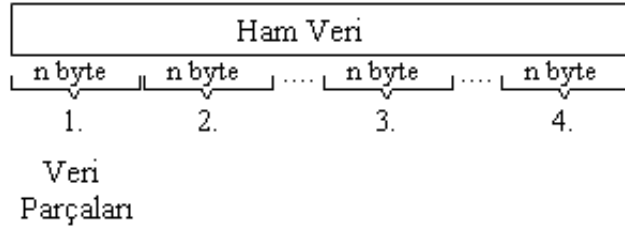
Bu bölümde protokol işleyişinin adımları açıklanmaktadır. Protokol işlevi “Veri Yayınlanması”, “Onaylama Metodu” ve “Enerji Seviyelerinin Bidirimi” olmak üzere üç adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

#### 5.1.2.1. Veri Yayınlanması

Çevresinde gerçekleşen bir olayla ilgili veri göndermek isteyen bir algılayıcı öncelikle bu veriyi parçalara böler (her bir parça boyutu daha önceden sisteme paket boyutu olarak belirtilmiştir). Veriyi gönderen algılayıcı elemanın çevresindeki komşu elemanlar birer tekrarlayıcı eleman gibi davranarak birbirleri üzerinden baz istasyonuna veriyi

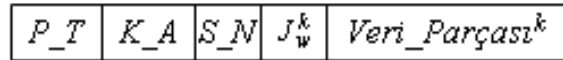
ulaştırırlar. Veri ilk çıktığı algılayıcı elemandan gönderilmeden önce  $N$  adet parçaya ayrılmaktadır. Önerilen yaklaşım gereği her veri parçasını bir yapay karınca ajanı temsil ettiği için  $N$  tamsayısı aynı zamanda karınca sayısını da ifade etmektedir.

Olay hakkında bilgi içeren veri ilgili kaynak algılayıcı eleman tarafından oluşturulmakta ve ham veri (raw data) ismini almaktadır. Ham veri, kaynak eleman kimliği, olay tanımlayıcısı, zaman ve olay hakkında diğer bilgileri içermektedir. Ham veri oluşturulduktan sonra kaynak eleman tarafından Şekil 5.3'deki gibi  $N$  adet parçaya ayrılmaktadır. Her parçanın büyüklüğü diğer bir ifadeyle  $N$  sayısı ham verinin büyüklüğüne ve WSN haberleşme yongasının tampon bellek büyüklüğüne göre belirlenmektedir.



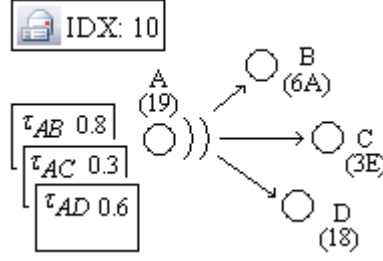
Şekil 5.3. Ham veri parçaları

Ham verinin parçalara ayrılmasından sonra her bir parça Şekil 5.4'de verildiği üzere yönlendirme parametrelerini içeren bir başlık bilgisiyle çerçevelenmektedir. Başlık bilgileri içerisinde Paket içeriğinde  $P\_T$ , paket tanımlayıcı;  $K\_A$ , algılayıcı eleman adresi;  $S\_N$ , paket sıra numarası;  $J_w^k$ ,  $k$ . yol uzunluğunu gösteren parametre yer almaktadır.



Şekil 5.4. Veri paketi içeriği

Şekil 5.5'de bir algılayıcı elemanın örnek olarak verilen bir yönlendirme işlemine katılımı gösterilmektedir.



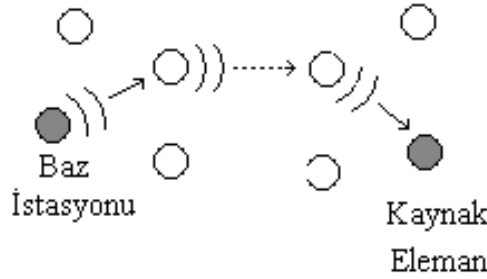
Şekil 5.5. Yönlendirme işlemi örneği

Şekil 5.5’deki örnekte A elemanı ajan numarası (yapay arı kimliğini gösteren indeks numarası) “10” olarak verilen bir paketi almıştır ve bu paketi transfer edeceği bir sonraki hedef elemanı seçme kararını oluşturmaktadır. Veri paketinin gönderileceği bir sonraki hedef Eşitlik 5.1’de elde edilen  $P_k(r, s)$  değerine göre belirlenmektedir. Şekil 5.5’deki örneğimizde A-B arasındaki feromon miktarı diğerlerinden daha fazla olduğu için B elemanının (6A olarak tanımlanan) bir sonraki hedef olarak seçilme ihtimali daha yüksektir. B, C ve D elemanlarının enerji seviyeleri de bu seçim işleminde etkili olmaktadır. B elemanının seçilmesi durumunda,  $K\_A$  alanı “6AHex” olarak güncellenmekte ve paket gönderilmektedir. C ve D elemanı da yayınlanan bu paketi duymaktadır. Ancak  $K\_A$  alanının kendilerine ait olmadıklarını algılar algılamaz paketi almayı iptal etmektedirler. B elemanı paketi alırken  $K\_A$  alanının yanı sıra  $S\_N$  alanını da kontrol etmektedir. Bu kontrol bu paketin daha önce alınıp alınmadığının kontrol işlemidir. Eğer B elemanı  $S\_N$  numarasını kendi tabu listesinde bulursa paket alımı iptal edilmektedir. Diğer durumda paket alımı gerçekleştirilip  $J_w^k$  değeri bir artırılmaktadır. Bu aşamadan sonra B elemanı bir sonraki hedef eleman seçimi yapmakta ve bir önceki adımda gerçekleştirilen işlemleri tekrarlamaktadır.

KKO yaklaşımında karınca sayısının belirlenmesi için paket büyüklüklerinin ve bir turda gönderilen paket sayılarının bilinmesi gerekmektedir. Paket büyüklüğü ve sayısı uygulamadaki olayların sayısı ve olay hakkındaki verinin büyüklüğüne bağlı olmaktadır. Bu durumda veri paketi büyüklüğü ve paket sayısına bağlı olan karınca sayısı uygulama türüne göre sistem kurulumunda belirlenir. Benzetim çalışmalarında bir olay hakkında bilgi içeren ham veri için 50 yapay karınca ajanı tahsis edilmiş ve veri paketi parçalarının büyüklüğü 1Mb olarak alınmıştır.

### 5.1.2.2. Onaylama Metodu

Kaynak eleman ve komşu elemanlarca yapılan yayınlama işleminden sonra baz istasyonu veriyi parçalar halinde almaktadır. Farklı yollardan veri parçalarını toplamamanın amacı güvenli veri akışının sağlanmasıdır. Eğer bir yoldaki aksaklıktan dolayı veri paketi gidemezse farklı bir yoldan gönderilmesi mümkün olacaktır. Bozuk yollardaki paket kayıplarının önüne geçmek için onaylama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu durumda baz istasyonu paketi alınca ilgili paket için kaynağa onay mesajı yayınlamaktadır (Şekil 5.6). Onay mesajlarının yayınlanmasıyla birlikte bu yol için feromon maddesi güncellenmesi işlemi de yapılmaktadır. Güncelleme işlemi Eşitlik 5.3'deki  $J_w^k$  değerine göre yapılmaktadır. Onay mesajına bu eşitlikten elde edilen feromon maddesinin ilave değeri Şekil 5.7'de verildiği üzere yerleştirilmektedir. Mesaj içeriğinde  $C\_ID$  mesaj tipi tanımlayıcısı,  $S\_N$  paket numarası (aynı zamanda yapay karınca ajanın indis numarası),  $\Delta\tau^k$  ise  $k$ 'nci karınca için ilave feromon maddesi miktarını temsil etmektedir.



Şekil 5.6. Onay mesajının iletimi

|         |        |         |                |
|---------|--------|---------|----------------|
| $C\_ID$ | $S\_N$ | $N\_ID$ | $\Delta\tau^k$ |
|---------|--------|---------|----------------|

Şekil 5.7. Onay mesajının içeriği

Onay mesajını alan eleman öncelikle  $S\_N$  alanını kontrol etmektedir. Eğer hafızasında (tabu listesi) bu değer bulunuyorsa onay mesajının bağlı olduğu paketin daha önce kendisi tarafından gönderildiği sonucunu çıkarmakta ve komşusuna olan yoldaki feromon miktarını güncellemektedir. Güncelleme işlemi Eşitlik 5.4'de verilen formül

kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Daha sonra onay mesajı tekrar yayınlanmakta ve ilgili paketin geldiği güzergaha ters yönde kaynağa kadar ulaşarak feromon maddeleri güncellenmektedir. Kaynak tarafından alınamayan bir onay mesajı için veri paketi tekrar gönderilmektedir.

#### **5.1.2.3. Enerji Seviyelerin Bildirilmesi**

Komşu elemanların enerji seviyeleri yapay karınca ajanlarının kaliteli yolları seçme işleminde kullanılmaktadır. Bu değerler Eşitlik 5.1 için gerekli olmaktadır. Enerji seviyeleri başlangıçta ve enerji seviyesinde meydana gelen değişimler neticesinde yayınlama yapılarak komşu elemanlara iletilmektedir.

### **5.2. Benzetim Sonuçları**

Bu bölümde EARACO algoritmasının performans sonuçları çeşitli KAA yapıları üzerinde test edilmiş ve KAA'lar için geliştirilen karınca tabanlı bir yaklaşım olan EEABR algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ağ enerjisinin uzun süreli kullanılmasında başarılı sonuçlar üreten EEABR algoritmasının diğer algoritmalarla olan performans karşılaştırmaları ise [38] numaralı referansta yer almaktadır. Performans sonuçlarının alınması için MATLAB ortamında ayırık tabanlı ve paralel yapıda çalışan bir benzetim programı geliştirilmiştir. OSI ağ katmanı protokolleri olan EARACO ve EEABR yönlendirme algoritmalarının performans analizinde aynı alt katman (fiziksel ve veri bağlantı) parametre değerleri kullanılmıştır. Parametre değerleri yaygın olarak kullanılan MICAz donanımına [112] aittir ve Tablo 5.1'de verilmektedir. Bu donanımın alıcı ve verici ünitesine ait enerji tüketimi için Eşitlik 3.10 kullanılmaktadır.

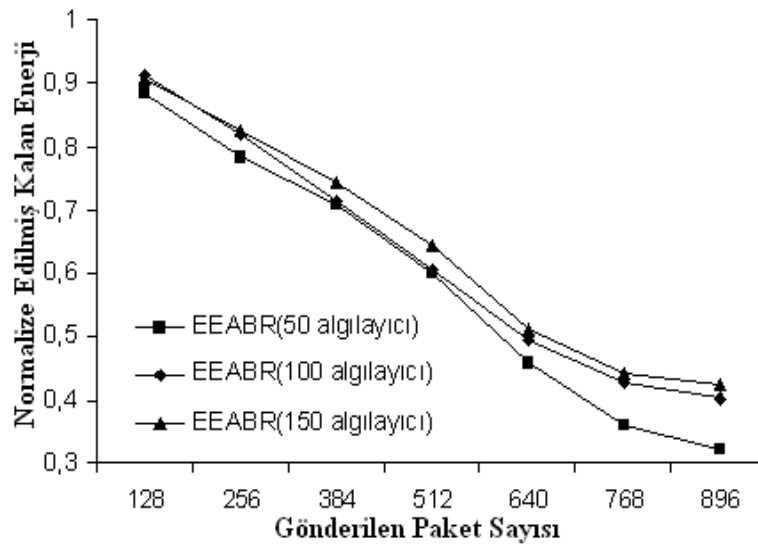
Sonuçlar farklı yoğunlukta rasgele yerleştirilmiş algılayıcılara sahip KAA'lar üzerinden alınmıştır. 200x200 m<sup>2</sup>' lik alanda 50, 100 ve 150 adet algılayıcının oluşturduğu KAA yapılarında EARACO ve EEABR algoritmaları ayrı ayrı koşturulmuş ve sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir. EEABR algoritmasının farklı sayılarda algılayıcılar içeren KAA yapıları için kullanılması durumunda ağın sahip olduğu ortalama enerji Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Şekil üzerinde görüleceği üzere EEABR algoritması ile az

yoğunluklu (birim alan başına nispeten daha az sayıda algılayıcı içeren) KAA'larda enerji tüketimi daha hızlı olmaktadır. Şekil 5.9'da az yoğunluklu (200x200 m<sup>2</sup> alanda 50 algılayıcı) KAA ile daha fazla yoğun (200x200m<sup>2</sup> alanda 150 algılayıcı) olan KAA arasında, kalan enerji durumlarının yüzde olarak farkları yer almaktadır. Şekil 5.9'dan, gönderilen paket sayısı arttıkça aradaki farkın üstel olarak arttığı görülmektedir.

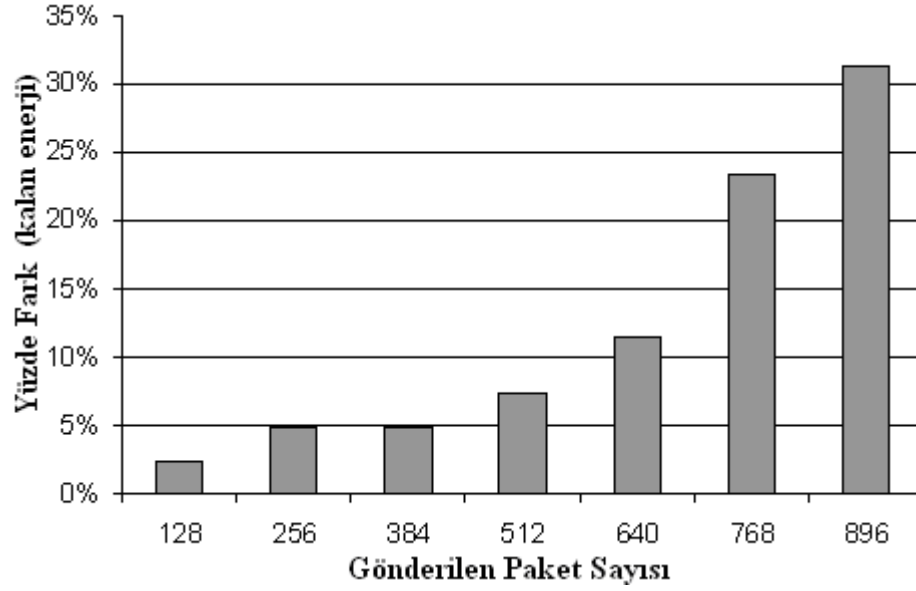
Tablo 5.1. MICAz modülünün parametre değerleri

| Parametre Adı              | Değeri              |
|----------------------------|---------------------|
| Frekans                    | 2.4GHz              |
| Veri İletim                | 250 Kbps            |
| RF Gücü                    | -10 dBm             |
| Alıcı Hassasiyeti          | -94 dBm             |
| İletim Modunda Akım Çekimi | 11mA                |
| Alıcı Moda Akım Çekimi     | 19.7mA              |
| Enerji Kaynağı             | 2 x (1250mAH, 1,5V) |
| Paket Büyüklüğü            | 1Mb                 |

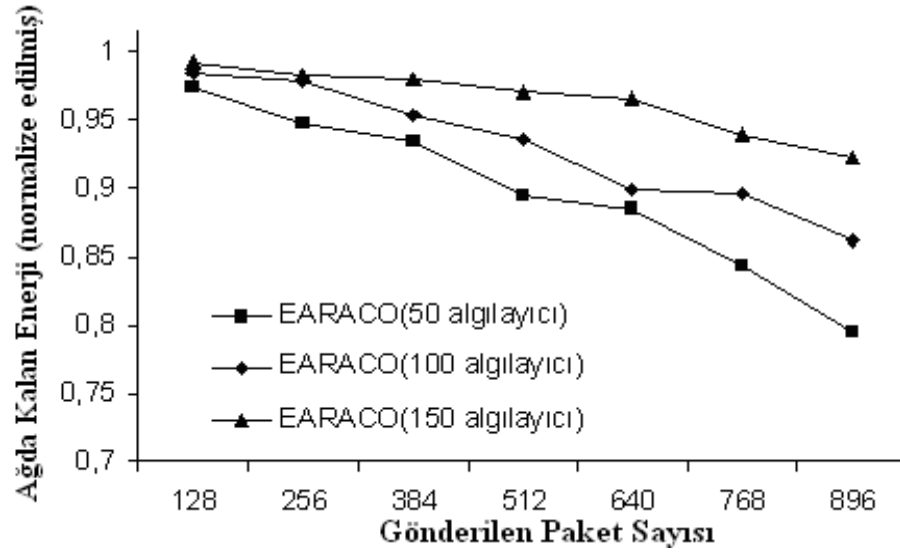
EEABR için sonuçları verilen bu benzetim koşullarının aynı şartlar için EARACO algoritmasının kullanılmasıyla alınan sonuçları Şekil 5.8 - 5.13'de verilmiştir. Şekil 5.8 – Şekil 5.11, 200x200 m<sup>2</sup> alanda farklı yoğunluklarda (alan üzerine 50, 100 ve 150 eleman yerleştirilerek) ağ yapıları için alınan verileri göstermektedir.



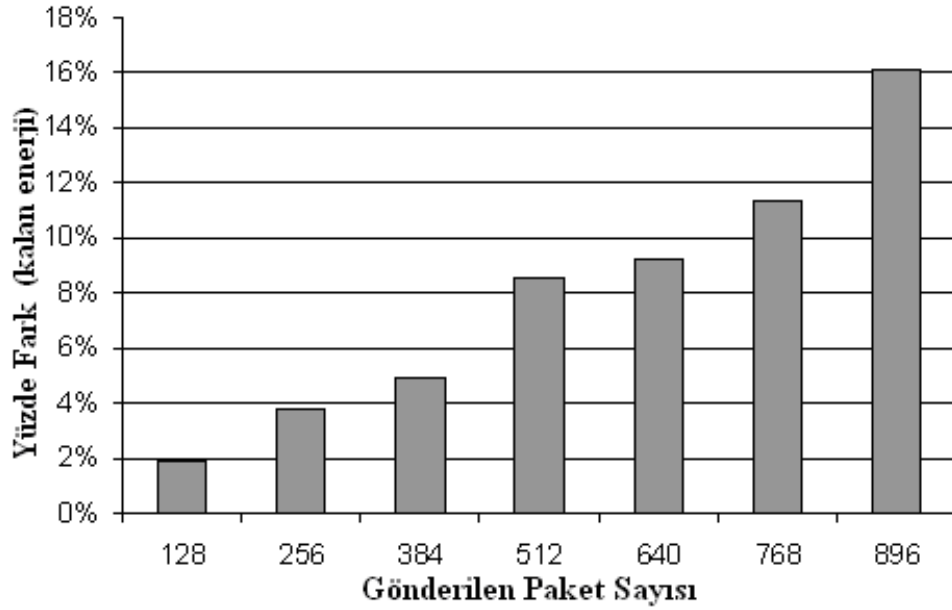
Şekil 5.8. Farklı algılayıcı ağlarda iletim sonrası kalan ortalama enerji seviyeleri



Şekil 5.9. EEABR algoritması kullanan farklı yoğunluktaki KAA'ların iletim sonrası kalan ortalama enerji seviyelerinin farkları



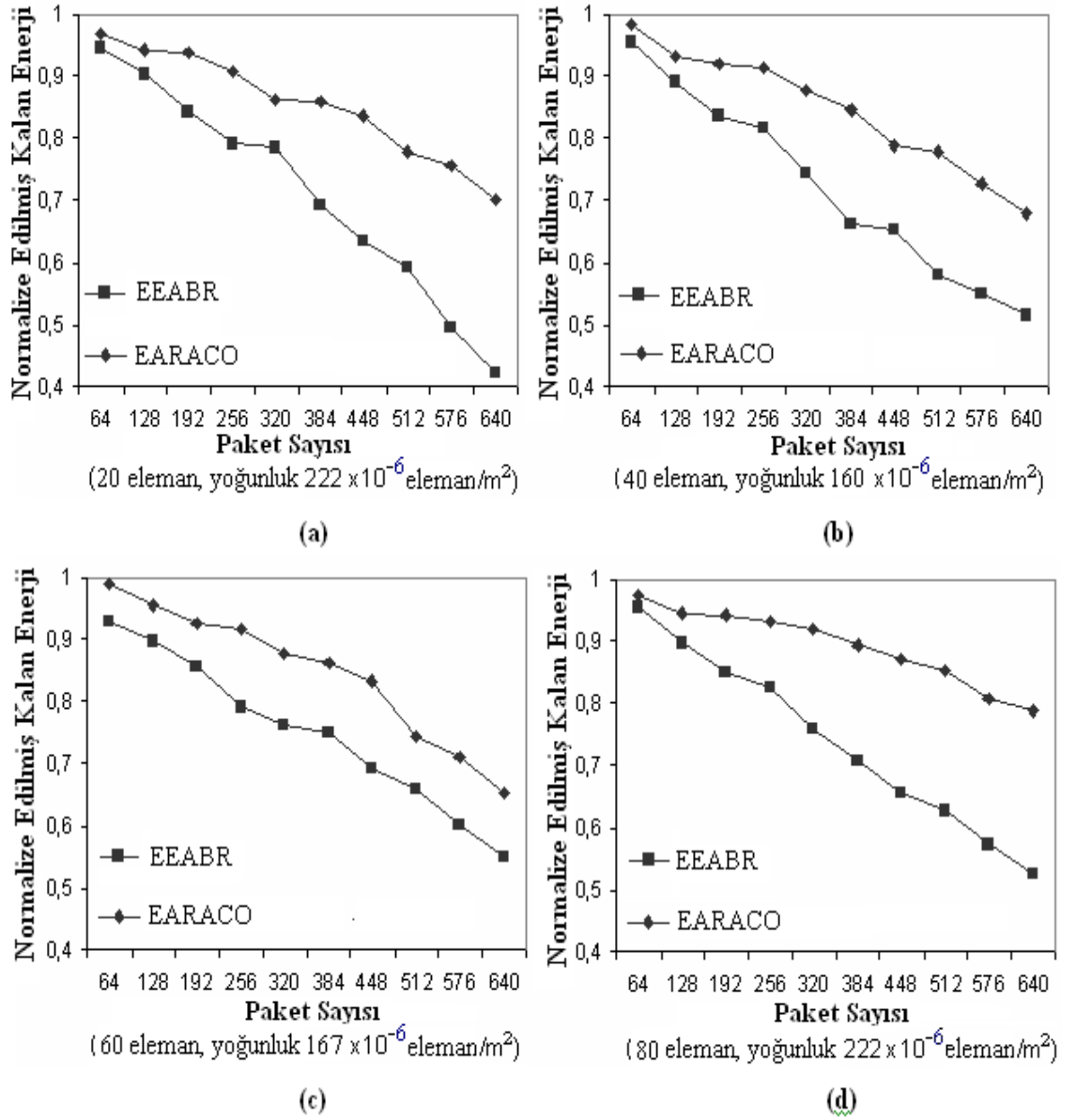
Şekil 5.10. Farklı algılayıcı ağlarda iletim sonrası kalan ortalama enerji seviyeleri



Şekil 5.11. EARACO algoritması kullanan iki farklı yoğunluktaki KAA'nın iletim sonrası ağda kalan ortalama enerji seviyelerinin birbirine göre farkları

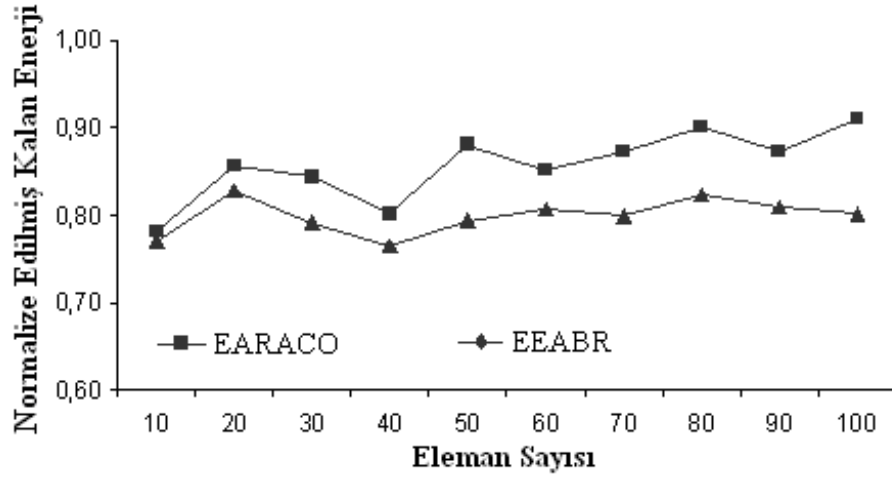
EARACO ve EEABR algoritmalarının farklı yoğunluklardaki ağ yapıları için enerji kullanımına ilişkin grafikler Şekil 5.12 ve 5.13'de verilmiştir. Sonuçlar, 200x200 m<sup>2</sup> (10 eleman), 300x300 m<sup>2</sup> (20 eleman), 400x400m<sup>2</sup> (30 eleman), 500x500 m<sup>2</sup> (40 eleman) ve 600x600 m<sup>2</sup> (50, 60 70, 80 ve 100 eleman) ağ yapıları için elde edilmiştir.

Şekil 5.12'ye bakıldığında baz istasyonunca alınan paket sayısı arttıkça EARACO algoritmasının performansının EEABR algoritmasına kıyasla arttığı görülmektedir. Geliştirilen enerji eşitliği ile önerilen veri yayınlaması ve onaylama metotlarının kullanılmasıyla alınan paket sayısına göre daha az enerji tüketilerek yapıya uyarlanan KKO protokolünün başarısı etkin bir şekilde artmaktadır. Ayrıca EARACO protokolünün daha yoğun algılayıcı eleman içeren ağlarda EEABR protokolüne kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.



Şekil 5.12 Farklı sayılarda eleman içeren ağlar üzerinde kalan enerji

Şekil 5.13 ise farklı sayılardaki ağ yapıları için 256 veri paketi iletiminden sonra ağ üzerinde kalan enerjiyi gösteren sonuç yer almaktadır. Şekilden, iki protokolün enerji seviyeleri arasındaki farkın ağ üzerindeki eleman sayısı fazlaştıkça arttığı ve bu artışın %10' a kadar yükseldiği görülmektedir.



Şekil 5.13 256 Paket alımından sonra farklı sayılarda eleman içeren ağlar üzerinde kalan enerji

### 5.3. EARACO Üzerinde Yapılan İyileştirme

EARACO protokolünde veri paketinin güzergahının belirlenmesinde iki faktör etkili olmaktadır. Bunlardan birincisi, yollardaki feromon miktarı, diğeri ise yol üzerindeki algılayıcı elemanların sahip oldukları enerji seviyeleridir. Başlangıçta tüm yollardaki feromon miktarına sabit bir değer atanmaktadır. Algoritma işleyişi sürecinde bu değerler, veri paketlerinin kaynaktan hedefe doğru yolculuklarıyla beraber yol uzunluklarına göre değişim göstermektedir. Bu değişim yolun uzunluğuna bağlı olarak belirlenen ilave feromon miktarıyla ve geri beslemeyi sağlamak amacıyla feromon buharlaşmasıyla sağlanmaktadır. Eşitlik 5.3, yolun uzunluğuna bağlı olarak ilave edilecek feromon değerini vermektedir. Burada yol uzunluğu kaynaktan hedefe ulaşmak için üzerinden geçilen eleman sayısı olarak alınmıştır. Her eleman belli bir mesafedeki komşuluğa veri gönderebilmektedir. Dolayısıyla bu sayı ( $J_w^k$ ) bize kaynak hedef arasındaki mesafe hakkında dolaylı bir fikir vermektedir. KKO algoritmasında kullanılan  $J_w^k$  sayısı yerine bu eşitlikte doğrudan kat edilen toplam mesafenin kullanılması yolun kalite değerinin belirlenmesinde daha kullanışlı bir yaklaşım olacaktır. Bu durumda ilave feromon miktarının belirlenmesinde Eşitlik 5.6 kullanılacaktır.

$r$  gönderici elemanları,  $s$  KKO algoritmasının belirlediği alıcı elemanları,  $R_s$  ise  $r$ 'nin komşuluğu olmak üzere Eşitlik 5.6 aşağıdaki gibi verilmektedir.

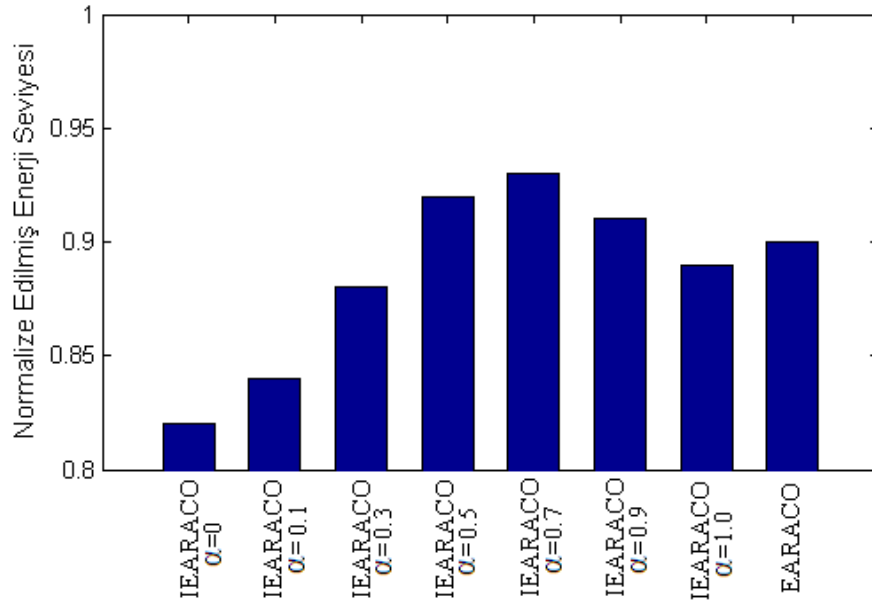
$$\Delta\tau^k(t) = \frac{1}{\sum_{r \in R_s} d(r, s)} \quad (5.6)$$

Ayrıca Eşitlik 5.1 de yer alan  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri, yol seçim işleminde feromon miktarı ve sezgisel ifadelerin etkisini belirleyen ağırlıklardır.  $\alpha$  değerinin  $\beta$ 'ya kıyasla yüksek tutulması seçim işleminde feromon miktarının sezgisel ifadeye göre daha önemli olduğu anlamına gelmektedir. Benzer şekilde  $\beta$ 'nın yüksek değerleri için sezgisel ifade daha etkili rol oynamaktadır. Şekil 5.14' de  $\alpha$  ve  $\beta$ 'nin  $[0,1]$  aralığında farklı değerleri (Tablo 5.2) için alınan sonuçlar yer almaktadır. Sonuçların alınmasında 150 algılayıcı elemana sahip ve donanımsal özellikleri bir önceki bölümde verilen KAA yapıları kullanılmıştır. Eşitlik 5.1'de en iyi parametre değerlerini kullanan KKO yaklaşımı IEARACO (An Improved version of Energy Aware Routing using Ant Colony Algorithm for WSNs) olarak adlandırılmıştır.

Tablo 5.2. Ağırlıklandırma parametrelerinin değerleri

| $\alpha$ | $\beta=1-\alpha$ |
|----------|------------------|
| 0        | 1                |
| 0,1      | 0,9              |
| 0,3      | 0,7              |
| 0,5      | 0,5              |
| 0,7      | 0,3              |
| 0,9      | 0,1              |
| 1        | 0                |

Şekil 5.14, IEARACO ( $\alpha = 0.7$ ) protokolünün EARACO protokolüne yakın değerlerde performans üretmesine rağmen ağ ömrünü daha uzun sürelerce devam ettirecek ölçüde kısmen daha az enerji sarfiyatında bulunduğunu göstermektedir.



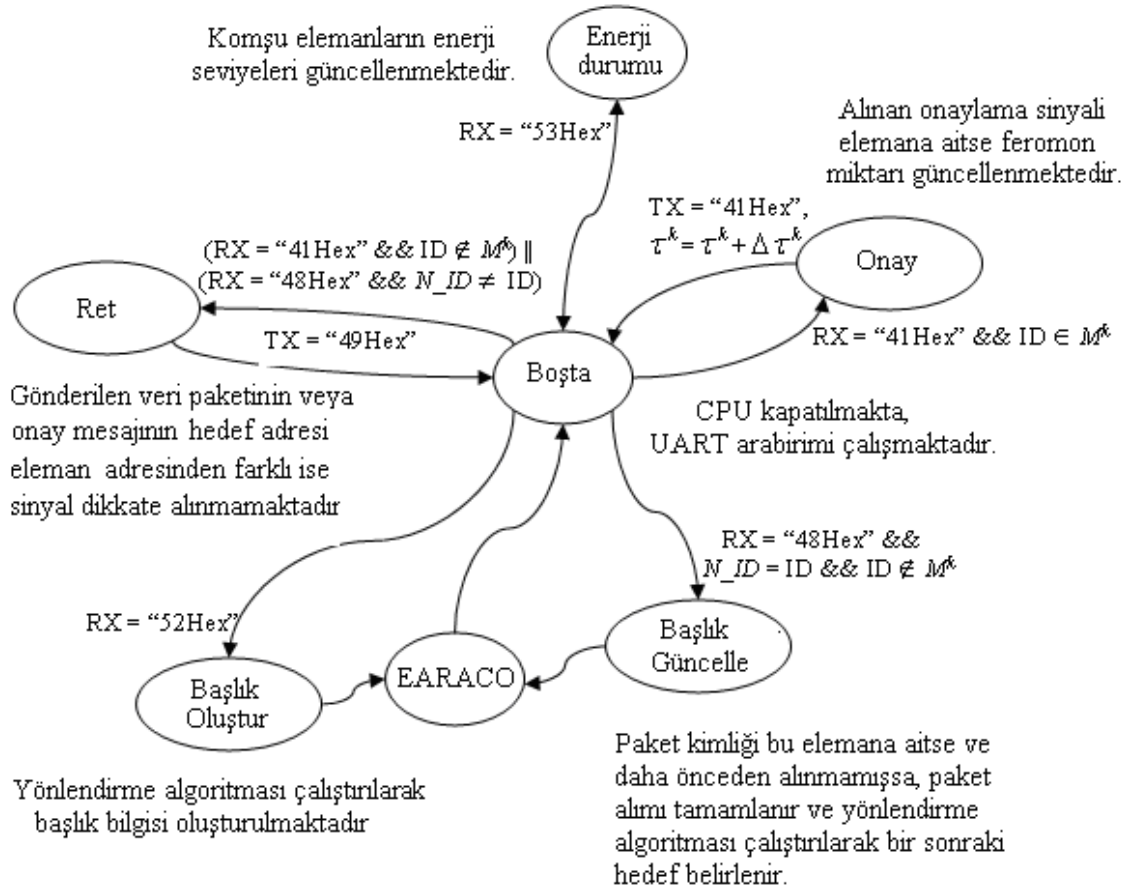
Şekil 5.14. 1K Paket iletiminden sonra ağ üzerinde kalan enerji

#### 5.4. EARACO Protokolünün Yönlendirme Yongası Uygulaması

Geliştirilen yönlendirme yongası algılayıcı elemanın ana işlemcisi ile basit bir haberleşme protokolü kullanmaktadır. Protokolün durum diyagramı Şekil 5.15’de verilmiştir. Yedi adet durumda işleyişini gerçekleştiren yonganın durumlar arası geçişleri ve her bir durum için verilen açıklamalar şekil üzerinde detaylı olarak yer almaktadır. Tablo 5.3’ de ise yönlendirme yongasının temel özellikleri verilmektedir.

Tablo 5.3. Yönlendirme yongasının özellikleri

| Parametre İsmi            | Değer         |
|---------------------------|---------------|
| Açılma (Power Up)         | 64ms          |
| Başlangıç konfügürasyonu  | 139 $\mu$ s   |
| Komşuluk güncelleme       | 7,5ms         |
| CPU Hızı                  | 5 MIPS        |
| Çalışma sıcaklığı aralığı | -40°C - 125°C |
| Çalışma gerilimi          | 2V - 5.5V     |
| Pin sayısı                | 8             |
| Paket tipi                | Soic-8        |



Şekil 5.15. Haberleşme protokolünün durum diyagramı

Önerilen EARACO yönlendirme protokolü sadece 4 pin içeren 30 mm<sup>2</sup> boyutunda bir donanıma (SOIC) gömülmüştür. Bu boyutta bir donanım küçük yapıda algılayıcı eleman tasarımları için oldukça kullanışlı bir çözüm olmaktadır. Yönlendirme yongası 9600 bant hızında UART arabirim haberleşmesini gerçekleştirmek üzere RX (alıcı hat) ve TX (verici hat) terminallerine sahiptir. Yönlendirme yongası kullanan devre Proteus simülasyon programında [113] test edilmiş ve performans sonuçları Tablo 5.4’de verilmiştir.

Bölüm 5.1.2’de bahsedildiği üzere protokol işlemleri “veri yayınlaması”, “onaylama” ve “enerji seviyelerinin bildirilmesi” olmak üzere üç grupta ele alınmaktadır. Ana işlemcinin yönetiminde bu işlemler yönlendirme yongası tarafından yapılmaktadır.

Table 5.4. Yönlendirme yongasının yanıt zamanları

| Durum                                                              | Yanıt Zamanı |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| Paket başlığının oluşturulması (EARACO algoritması çalıştırılarak) | 25ms         |
| Paket başlığının güncellenmesi (EARACO algoritması çalıştırılarak) | 25ms         |
| Onay (Baz istasyonundan)                                           | 625 $\mu$ s  |
| Onay (Komşu elemanlardan)                                          | <5 $\mu$ s   |
| Ret                                                                | 140 $\mu$ s  |

Yonga EARACO algoritması için dahili bir ROM belleğe, algoritma işletimi için bir işlemciye ve KKO parametreleri için bir RAM hafızaya sahiptir. Yönlendirme yongasıyla haberleşmek için kullanılan sinyaller ve bunların tanımlamaları Tablo 5.5’de yer almaktadır.

Table 5.5. Yönlendirme yongasının haberleşmesinde kullanılan sinyaller

| Sinyal                   | Sinyal Alanları                                    | Alan Tanımları                                                                           |
|--------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Paket başlığı oluştur    | $C\_ID$ (52Hex)                                    | Komut tanımlayıcısı                                                                      |
| Paket başlığını güncelle | $C\_ID$ (48Hex), $N\_ID$ , $k$ , ve $J_w^k$        | Komut tanımlayıcısı, eleman tanımlayıcısı, ajan numarası ve ziyaret edilen eleman sayısı |
| Ret                      | $C\_ID$ (49Hex)                                    | Komut tanımlayıcısı                                                                      |
| Onay                     | $C\_ID$ (41Hex), $k$ , $N\_ID$ , ve $\Delta\tau^k$ | Komut tanımlayıcısı, ajan numarası, eleman tanımlayıcısı ve ilave feromon miktarı        |
| Enerji durumu            | $C\_ID$ (53Hex), $N\_ID$ , ve $E\_LE$              | Komut tanımlayıcısı, eleman tanımlayıcısı ve enerji seviyesi                             |

### 5.5. Sonuç ve Değerlendirme

Birçok alanda uygulama imkanına sahip olan kablosuz algılayıcı ağlar üzerinde enerji tasarruflu etkin yönlendirme algoritmalarının kullanımı, bu türdeki ağ yapılarının daha uzun ömürlü olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Klasik bilişim ağ haberleşmesinde güzel alternatif çözümler sunan karınca optimizasyonunu baz alan yönlendirme

tekniklerinin, KAA'lar üzerinde uygulanması etkili sonuçlar vermektedir. Bu bölümde, KAA'lara özgü nitelikleri (sınırlı enerji kaynağı, düşük haberleşme bandı) dikkate alan karınca koloni optimizasyonu tabanlı yeni bir strateji olan EARACO algoritmasının yapısı açıklanmış, performans sonuçları alınmış ve bilinen bir başka karınca koloni optimizasyonu tabanlı algoritma olan EEABR ile karşılaştırılmaları yapılmıştır. Farklı türlerde KAA'lar için yapılan benzetim koşullarından EARACO'nun ağ ömrünü artıracak şekilde performanslı sonuçlar ürettiği görülmektedir.

## 6. BÖLÜM

### **KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KÜMELEME TABANLI YÖNLENDİRME İŞLEMLERİNDE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI KULLANILARAK GELİŞTİRİLEN MODEL**

Önceki bölümlerde ifade edildiği gibi algılayıcı elemanlar genelde çok sayıda olacak şekilde bölgeye dağıtmakta ve zor çevresel şartlar altında çalışabilmeleri beklenmektedir. Bu zorluklarla birlikte, donanımsal olarak kısıtlı kapasitelere sahip algılayıcı elemanlar üzerinde sağlıklı, dirençli, hata toleranslı, basit yapıda (az hafıza gereksinimli ve kolay uyarlanabilir) hızlı işletilebilir, ve en önemlisi düşük enerji tüketimli protokollere ihtiyaç duyulmaktadır. Protokoller aynı zamanda etkin ve verimli bir haberleşmeyi de gerçekleştirmelidirler. [102] nolu referansda verildiği üzere algılayıcı elemanların haberleşmeleri enerji harcamasını belirleyen en önemli etkidir ve harcanan enerji miktarı gönderici ve alıcı arasındaki mesafeye bağlıdır.

Tezin bu bölümünde periyodik veri transferi gerçekleştiren kümeleme tabanlı KAA yapıları için ABC ve PSO algoritması kullanarak maksimum ağ ömrünü sağlamayı amaçlayan yeni protokoller geliştirilmiştir. Bu tür yaklaşımların kullandığı yapılar [39] ve [40]'da yer almaktadır. Yeni protokolleri geliştirmek için kullanılan KAA modeli üçüncü bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Geliştirilen protokollerin performans analizleri için kümeleme tabanlı KAA yapıların benzetim sonuçlarının alınmasına yönelik oluşturulan MATLAB platformundan faydalanılmıştır.

## 6.1. Yapay Arı Koloni Algoritması Kullanılarak Geliştirilen KAA Yönlendirme Protokolleri

Yapay Arı Koloni (ABC) Optimizasyonu kullanarak geliştirilen KAA yönlendirme protokolleri yer belirleme sistemleri (GPS) bulundurmeyen algılayıcı elemanların oluşturduğu ağ yapıları için önerilmiştir. LEACH protokolü baz alınarak geliştirilen protokollerle maksimum veri transferini sağlayacak şekilde ağ ömrünü artırmaya yönelik çözümler elde edilmiştir. Geliştirilen yönlendirme yaklaşımlarıyla kümeleme tabanlı KAA yapılarında esnek bir uygulama imkanı sunan LEACH protokolünün dezavantajlarının giderilmesi de amaçlanmıştır.

### 6.1.1. Önerilen Kümeleme Yöntemi

ABC algoritması kullanılarak geliştirilen yaklaşımda küme başkanlarının seçimi analitik olarak geliştirilen bir uygunluk fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Uygunluk fonksiyonunun elde edilmesinde öncelikle haberleşme enerjisi dikkate alınmıştır. Eşitlik 3.2 ve 3.4'den görüleceği üzere haberleşme mesafesi harcanan enerjiyi etkileyen önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır (Eşitlik 3.2, Eşitlik 6.1(a) olarak, Eşitlik 3.4 ise Eşitlik 6.1(b) olarak yeniden verilmiştir). Kısa mesafeli ( $d < d_{sınır}$ ) olarak karşılıklı haberleşen iki algılayıcı elemanın antenlerine düşen sinyal şiddeti Eşitlik 6.1(a)'da yer almaktadır. Bu değer ancak belli bir algılama değerinden ( $RX^{hassasiyet}$ ) büyük olduğu durumda alıcı gelen sinyali yorumlayabilmektedir (Eşitlik 6.1(c)). Eşitlikteki  $RX^{hassasiyet}$  değeri donanımsal bir parametre olup ilgili algılayıcı donanımının algılama hassasiyeti hakkında bilgi vermektedir.

$$P_a(d) = \frac{P_g \cdot A_g \cdot A_a \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot d)^2 \cdot L} \quad (a)$$

$$P_a(d) = P_g \cdot \frac{h_g^2 \cdot h_a^2}{d^4} \cdot A_a \cdot A_g \quad (b)$$

$$RX^{hassasiyet} \leq P^a(d) \quad (c)$$

(6.1)

Eşitlik 3.2’de verilen  $P^a(d)$  değeri Eşitlik 6.1(c)’de yerine konulursa Eşitlik 6.2 ve 6.3 elde edilir.

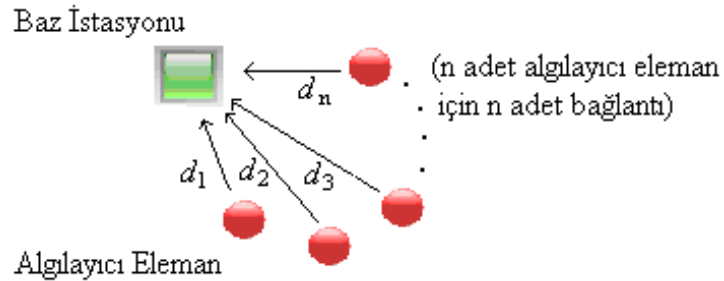
$$RX^{hassasiyet} \leq \frac{P^g \cdot A^g \cdot A^a \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} \quad (6.2)$$

$$\alpha = \frac{RX^{hassasiyet} \cdot (4\pi)^2 \cdot L}{A^g \cdot A^a \cdot \lambda^2} \quad \text{olmak üzere;}$$

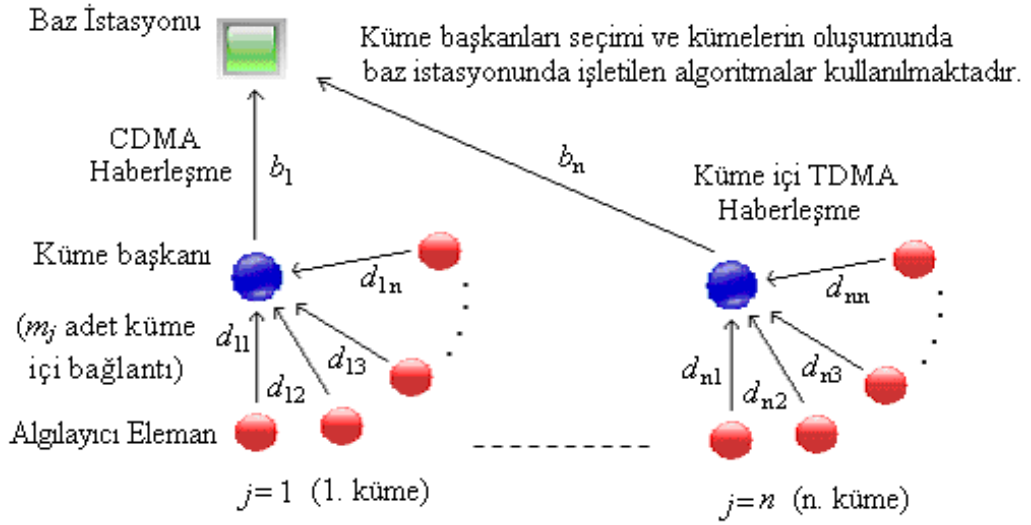
$$\alpha \cdot d^2 \leq P^g \quad (6.3)$$

Eşitlik 6.3,  $d$  mesafedeki bir alıcıyla iletişim yapılabilmesi için gerekli olan minimum sinyal şiddetini ifade etmektedir. Eşitlikten görüldüğü üzere haberleşen elemanlar arasında enerji harcaması uzaklığın karesiyle doğru orantılıdır.

Bu bölüm içerisine yer alan benzetim sonuçlarının alınmasında doğrudan veri iletimi yapan (Şekil 6.1) ve kümeleme yapılarak veri toplama işlemini gerçekleştiren protokoller (Şekil 6.2) kullanılmıştır. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 üzerinde baz istasyonu kare, küme başkanları büyük daire ve diğer algılayıcı elemanlar küçük daireler ile gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Doğrudan haberleşme kullanılarak yapılan veri toplama işlemi



Şekil 6.2. Kümeleme yapılarak veri toplama işlemi

Şekil 6.1 herhangi bir aracı olmadan baz istasyonuna doğrudan veri gönderimini, Şekil 6.2 kümeleme metoduyla yapılan metotla veri toplama işlemini örnek olarak göstermektedir. Şekil 6.2 üzerinde büyük daireler küme başkanı olarak seçilen algılayıcı elemanları, küçük daireler ise periyodik veri transferi yapan algılayıcı elemanları temsil etmektedir. Ağ, bir baz istasyonu ve algılayıcı elemanlardan oluşan yapılardan meydana gelmektedir. Her bir küme, her turda değişen bir küme başkanına ve değişken sayıda algılayıcı elemanlara sahiptir. Küme başkanları ve elemanların seçimi işletilen algoritma vasıtasıyla yapılmaktadır. Şekilde  $n$  küme sayısını,  $m_j$  ise  $j$  indisli kümenin bağlantı sayısını ifade etmektedir. Bir turda veri toplama işlemi için haberleşme iki adımda gerçekleşmektedir. İlk adımda kümelerdeki algılayıcı elemanlar ilgili küme başkanlarına verilerini göndermekte ve ikinci adımda küme başkanları topladıkları verileri baz istasyonuna iletmektedir.

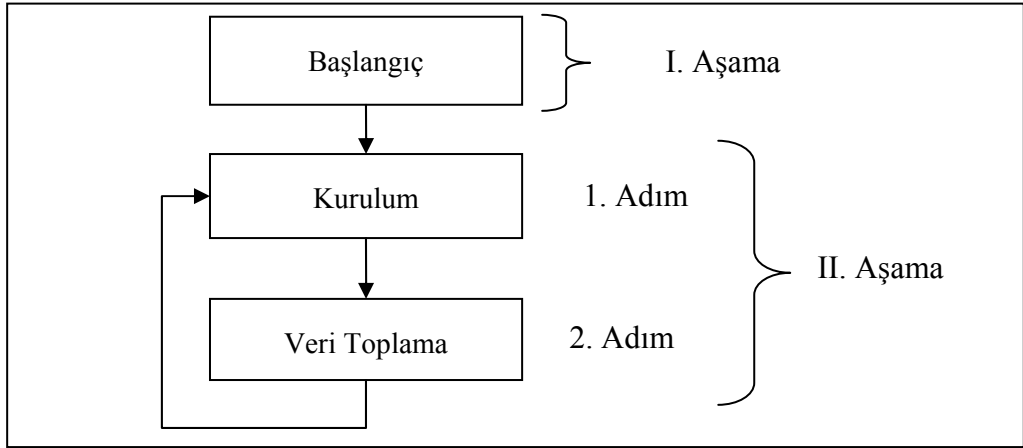
### 6.1.2. Geliştirilen Modelin İşleyiş Aşamaları

LEACH algoritmasında algılayıcı elemanlar kümeler halinde organize olurken dağıtık (distributed) yapıda bir algoritma kullanırlar [103, 104]. Tez çalışmasında önerilen yaklaşımda ise yapı kısmen dağıtık olmasına rağmen temelde merkezi bir işlev sonucunda küme organizasyonu sağlanmaktadır. Algılayıcı elemanların işlemci kapasiteleri sınırlı olduğu için merkez olarak baz istasyonunda yoğunluklu hesaplamalar gerektiren algoritmalar işletilmektedir.

Çoğu KAA yapılarında baz istasyonu donanımı algılayıcı elemanların donanımlarına kıyasla daha güçlü yapıdadır. Ağ işlevinin önemli bir kısmının baz istasyonunca icra edilmesi esas işlevi algılama olan algılayıcı elemanlar üzerindeki yükün azaltılmasına yardımcı olacaktır.

Bu tez çalışmasında önerilen algoritmalar iki aşamada işletilmektedir (Şekil 6.3). İlk aşama başlangıç aşaması olup algılayıcı elemanlar bölge üzerine dağıtıldıklarında bir defaya mahsus olmak üzere çalıştırılır. Bu aşamada önerilen ağ protokolünün işletilebilmesi için gerekli ön bilgiler toplanmakta ve elemanlar arası oluşturulabilecek karşılıklı bağlantılar belirlenir. İkinci aşamada ise ağın bölge üzerinden periyodik bilgi toplama işlemi gerçekleştirilmeye başlanmaktadır. Bu aşama iki adımdan oluşur: ilk adımda (kurulum) küme başkanları ve elemanları belirlenir. İkinci adımda (veri toplama) ise bölge üzerindeki elemanlardan algılanan veriler baz istasyonuna küme başkanları aracılığı ile aktarılmaktadır. Veriler TDMA MAC protokolü kullanılarak alınmakta ve sonra bu veriler birleştirilip baz istasyonuna CDMA MAC protokolüyle gönderilmektedir. Veri toplama adımından sonra ağ bir sonraki tur için yeni bir kurulum adımını gerçekleştirmekte ve ağın işlevi bu şekilde döngüsel olarak devam etmektedir.

Başlangıç aşamasında, ağın periyodik veri toplama işlevi için gerekli olan bilgiler baz istasyonuna algılayıcı elemanlar tarafından gönderilir. Bu bilgilerin elde edilmesi için elemanlar bölgedeki diğer tüm elemanlara tanıtım mesajları yayınlar. Her bir algılayıcı eleman, bu mesajların içeriğine ve sinyal şiddetine bakarak ağdaki diğer algılayıcı elemanlar ve kendisine olan uzaklıkları hakkında bilgi sahibi olur. Uzaklık bilgisi, gönderilen sinyal ve alınan sinyalin şiddet değerlerinin hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Alınan sinyal şiddeti algılayıcı anteni üzerindeki güç hesabından, gönderici sinyal şiddeti ise alınan mesajın içeriğinden elde edilmektedir. Bir algılayıcı eleman, kendisine gelen diğer algılayıcı elemanların tanıtım mesajlarını değerlendirerek kendisinin diğerlerine olan uzaklığını bir tablo içerisine kaydetmektedir (Tablo 6.1). Tablodan görüldüğü üzere,  $n$  elemanlı bir ağ yapısı için tablonun boyutu maksimum  $[4 \cdot (n - 1) + 2]$  bayt olacaktır. Algılayıcı elemanlar tarafından oluşturulan bu uzaklık tabloları CSMA MAC haberleşmesi ile baz istasyonuna iletilmektedir.



Şekil 6.3. Algoritma işleyişinin ana hatlarını gösteren akış diyagramı

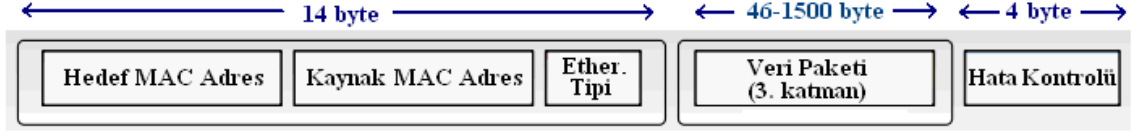
Tablo 6.1. Algılayıcı elemanların karşılıklı uzaklıkları

| Mesajı alan algılayıcı elemanın kimliği (2-bayt/16-bit) | Mesajı gönderen algılayıcı elemanın kimliği (2-bayt/16-bit) | Uzaklık (2-bayt/16-bit) |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|
| ---                                                     | -- --                                                       | -- --                   |
|                                                         | -- --                                                       | -- --                   |
|                                                         | .                                                           | .                       |
|                                                         | -- --                                                       | -- --                   |

Başlangıç aşamasında yer alan bu işlemler ağ üzerinde dağıtık yapıda gerçekleştirirler. Bu şekilde yapılan  $n$  elemanlı bir tanıtım mesajlaşma türünde bir algılayıcı elemana gelen tanıtım mesajlarının sayısı  $n-1$  olacaktır. Önerilen algoritmaların ağ katmanında (OSI 3. katman) oluşturduğu bir tanıtım mesajının yapısı Şekil 6.4’de verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere MAC çerçevesinin (frame) bit uzunluğu (veri paketinin uzunluğu+18bayt)’dır. Gönderilen tanıtım mesajının MAC’daki (OSI 2. katman) boyutu ise kullanılan MAC protokolü (Ethernet Tip II) gereği minimum 64-bayt’dır [115, 116] (Şekil 6.5).

| Kaynak adres (16-bit) | Hedef adres (16-bit) | Mesaj tipi (8-bit) | Gönderilen sinyal gücü (8-bit) |
|-----------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|
|-----------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|

Şekil 6.4. Tanıtım mesajı yapısı



Şekil 6.5. Tanıtım mesajının MAC katmanda oluşturulan çerçevesi (MAC frame)

Tanıtım mesajında kaynak adres kendisini tanıtmak amacıyla mesajı yayınlayan algılayıcı elemanın ağ adresini, hedef adres ise bu mesajın ağdaki tüm elemanlara iletilmesini ifade eden “yayın” modunu gösterir değeri içerir. Şekil 6.6’da algılayıcı elemanların birbirlerine olan karşılıklı uzaklıklarının elde edilmesi için işletilen algoritmanın akış diyagramı verilmiştir.

Ağ üzerinde diğer elemanlardan gelen tanıtım mesajlarını alırken harcanan toplam enerji ifadesi Eşitlik 6.4’de verilmiştir. Eşitlik, baz istasyonu da dahil olmak üzere  $n$  adet vericiden her bir algılayıcı elemana mesaj ulaşacak şekilde düzenlenmiştir. Mesajları alan toplam algılayıcı eleman sayısı ise ağdaki elemanların sayısına ( $n$ ) eşittir. Başlangıç aşamasının ağ üzerinde işletilmeye başlanması baz istasyonunun ağa tanıtım mesajını göndermesiyle gerçekleşir. Eşitliklerde  $E_{Al}$  alma enerjisini,  $E_{Vr}$  ise yayınlama (verme) enerjisini ifade etmektedir.

$$\sum E_{Al} = n^2 \cdot E_{Al} \quad (6.4)$$

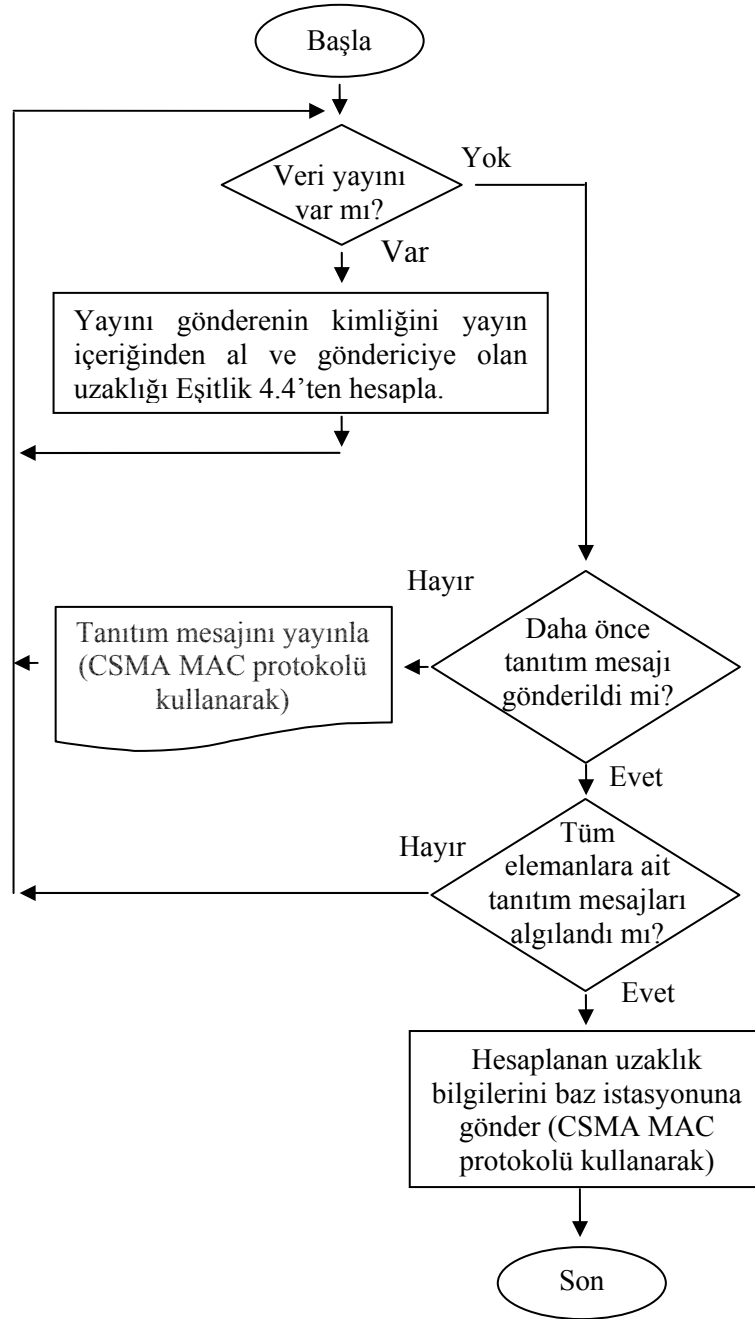
$n$  adet elemanın kendisi ağa tanıtım amacıyla gönderdiği mesajların toplam gönderme enerjisi ile ilgili ifade Eşitlik 6.5’de yer almaktadır.

$$\sum E_{Vr} = n \cdot E_{Vr} \quad (6.5)$$

Her bir eleman ağda yayınlanan bu mesajları alacaktır. Ağda  $n$  adet eleman bulunduğu göre mesaj alımı için toplamda  $n^2 \cdot E_{Al}$  enerji harcanacaktır. Bu durumda alma ve gönderme enerjilerinin toplamı:

$$\begin{aligned} E_{tanitim\_mesaji} &= n^2 \cdot E_{Al} + n \cdot E_{Vr} \\ &= n \cdot (n \cdot E_{Al} + E_{Vr}) \end{aligned} \quad (6.6)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 6.6. Algılayıcı elemanların birbirlerine olan karşılıklı uzaklıklarının hesaplanmasına ait akış diyagramı

Eşitlik 6.7’de tanıtım mesajının iletilmesi için gerekli toplam enerji yer almaktadır.

$$\begin{aligned}
 E_{\text{tanıtım\_mesajı}} &= n \cdot (n \cdot E_{\text{elek}} \cdot k + E_{\text{elek}} \cdot k + E_{\text{yuk}} \cdot k \cdot d^2) \\
 &= n \cdot k \cdot [(n+1) \cdot E_{\text{elek}} + E_{\text{yuk}} \cdot d^2]
 \end{aligned}$$

(6.7)

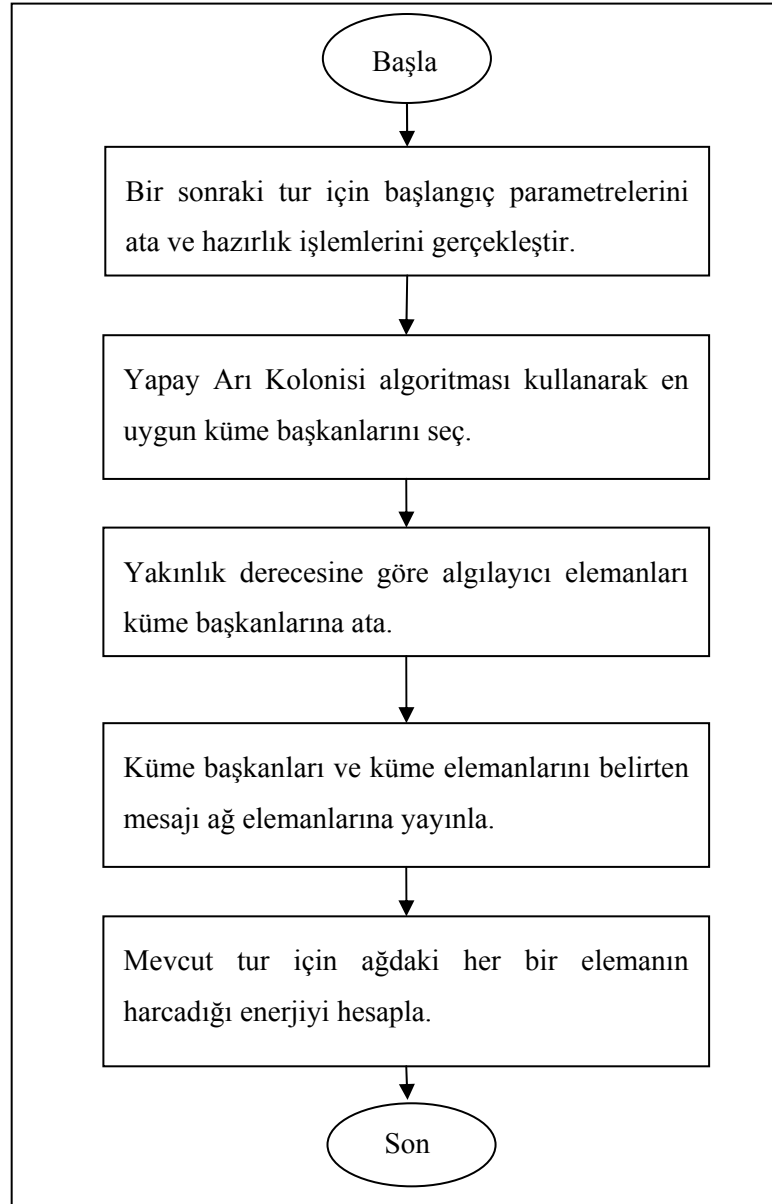
Ayrıca, her bir eleman diğer elemanların kendisine olan uzaklıklarını içeren tabloyu baz istasyonuna göndermek için Eşitlik 6.8 ile tanımlı enerjiyi harcamaktadır.

$$\begin{aligned}\sum E_{Vr} &= n \cdot E_{Vr} \\ &= n \cdot k \cdot \left[ E_{yuk} \cdot d^2 + (n-1) \cdot E_{elek} \right]\end{aligned}\quad (6.8)$$

Sonuç itibarıyla başlangıç aşamasında harcanan enerji, Eşitlik 6.7 ve 6.8’de ifade edilen değerlerin toplamıdır.

Eşitliklerde  $n$  ağ üzerindeki toplam algılayıcı eleman sayısını,  $E_{yuk}$  verici ünitesinin kuvvetlendirici devresine ait parametreyi,  $E_{elek}$  verici ve alıcı ünitelerinin elektronik devrelerine ait parametreyi,  $d$  ağ üzerinde karşılıklı iki eleman arasında olabilecek maksimum mesafeyi (dikdörtgensel bir ağ bölgesi için bölgenin köşegen uzunluğunu),  $k$  ise Eşitlik 6.7 için tanıtım mesajı bit uzunluğunu (64-bayt) ve Eşitlik 6.8 için tabloları içeren mesajın bit uzunluğunu  $([4 \cdot (n-1) + 2] + 18)$  bayt ifade etmektedir. Benzetim çalışmaları bölümünde verilen parametreler kullanılarak oluşturulan ağ yapılarında başlangıç aşaması için harcanan enerji algılayıcı eleman başına 0.056 Joule olarak bulunmaktadır. Çok küçük ölçeklerdeki (5-10mm<sup>2</sup>) bataryaların birkaç yüz joule enerji kapasitesine sahip oldukları düşünülürse başlangıç aşaması için ihtiyaç duyulan enerjinin oldukça az miktarda olduğu görülecektir [117, 118].

Kurulum adımının amacı ağ üzerinde küme başkanlarının seçimi ve optimum küme yapısının oluşturulmasıdır. Bu işlem Yapay Arı Koloni algoritması aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Adımın işleyişinin başlaması ile birlikte Yapay Arı Kolonisi algoritmasının çalışmasına yönelik parametre değerleri belirlenmekte, kullanılacak olan uygunluk fonksiyonu seçilmekte ve algoritmalar işletilmeye hazır hale getirilecek şekilde hafıza organizasyonu ve işlemci tarifelemesi yapılmaktadır. Hazırlık sürecinde yapılan bu işlemler arasında yer alan parametre değerlerinin atanmasında Tablo 6.2’deki değerler kullanılmaktadır. Önerilen algoritmalarda kurulum adımında gerçekleştirilen bu işlemler ana hatlarıyla Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7. Kurulum adımında yer alan işlemleri gösteren akış diyagramı

Boyut parametresi çözüm uzayının boyutunu ifade etmektedir. Ele aldığımız problem için benzetim çalıştırmalarında boyut değeri 5 olarak alınmıştır. Bu değer ağın 5 ayrı kümeye ayrılacağını ve küme başkanlarının kimliklerinin belirleneceği anlamına gelmektedir. 100 algılayıcı elemanlı bir ağ için küme başkanlarının kimlikleri [1,100] arasındaki tamsayılarla ifade edilmekte ve bu değer aralığı da Yapay Arı Koloni algoritmasına giriş olarak verilmektedir. İterasyon sayısı algoritmanın çözüme ulaşmak için gerçekleştirdiği maksimum adım sayısını, popülasyon büyüklüğü ise bir

iterasyonda elde edilen uygun çözümlerin oluşturduğu popülasyon sayısını ifade etmektedir.

Algoritmanın veri toplama adımında küme başkanları bağlı oldukları algılayıcı elemanlardan verileri TDMA MAC protokolü ile toplanır. Küme başkanlarınca toplanan bu veriler baz istasyonuna gönderilmeden önce “veri birleştirme” işlemine tabi tutulur. Baz istasyonu ne kadar veri alırsa bölge üzerinde o ölçüde bilgi sahibi olur. Veri toplama ve birleştirme işleminde belirli bir bölgeye ait bir olay hakkında o bölgedeki algılayıcı ağlardan veriler alınmaktadır. Olay hakkında en etkili veri, olaya en yakın olan algılayıcı elemanın verisi olduğu için birleştirme işlemi olarak en kuvvetli sinyali seçme yöntemi kullanılabilir. Gelen veri sinyallerinin birleştirme işleminden sonra mutlaka bir veri kaybı söz konusudur. Veri toplama işleminin yapıldığı küme içerisindeki elemanlar arası uzaklık ne derece küçükse (diğer bir ifadeyle bölge üzerindeki eleman sayısı ne derece fazlaysa) veri kaybı o ölçüde az olacaktır. Bu ise uygulamaya ve gözlenen olaylara bağlı bir parametredir.

Tablo 6.2. ABC algoritmasında kullanılan parametre değerleri

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| <b>Boyut</b>                | 5       |
| <b>Değer aralığı</b>        | [1,100] |
| <b>Popülasyon büyüklüğü</b> | 30      |
| <b>İterasyon sayısı</b>     | 60      |

### 6.1.3. ABC Algoritması için Önerilen Uygunluk Fonksiyonu

Kümeleme yöntemiyle haberleşen KAA yapılarında bir tur için gerekli olan enerji harcamasının hesabında Eşitlik 6.3’den faydalanılmaktadır. Bir paketin iletilmesi için gerekli olan süre “transfer zamanı” olarak tanımlanmakta ve  $t$  ile gösterilmektedir. Eşitlik 6.3 kullanılarak hesaplanan bir kümenin veri aktarımında gerekli olan enerji, Eşitlik 6.9’da verildiği gibi  $\alpha$  ve mesafenin karesine bağlıdır.

$$E = \sum_i^m (P_i^g \cdot t) \geq \alpha \cdot (b^2 + \sum_i^m d_i^2) \cdot t,$$

$w = \alpha \cdot t$  olarak alınır,

$$E \geq w \cdot (b^2 + \sum_i^m d_i^2) \quad (6.9)$$

Eşitlikte  $i$  üye indeksini,  $m$  kümenin eleman sayısını,  $d_i$   $i$ 'nci algılayıcı elemanın küme başkanına olan uzaklığını,  $b$  küme başkanının baz istasyonuna olan uzaklığını ve  $\alpha$  ise Eşitlik 6.3'de verilen sabit parametrelerin etkisini ifade etmektedir (Şekil 6.1 ve 6.2).

Bir turda bütün kümelerin harcaması gerektiği toplam transfer enerjisi ise Eşitlik 6.10 ile tanımlanmaktadır. Eşitlikten görüleceği üzere gerekli olan toplam enerji kümeler içi mesafelerin kareleri toplamıyla küme başkanlarının baz istasyonuna olan mesafelerinin kareleri toplamına bağlıdır.

$$\sum_{j=1}^n E \geq w \cdot \sum_{j=1}^n \left( b_j^2 + \sum_{i=1}^{m_j} d_{ij}^2 \right) \quad (6.10)$$

Geliştirdiğimiz yaklaşımda ağ üzerinde enerji sarfiyatının minimumda tutulması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda uygun küme başkanlarının seçimi önem kazanmaktadır. Seçim işleminde enerji sarfiyatına bağlı olan üye elemanlarının küme başkanları adaylarına ve küme başkanları adaylarının merkeze olan mesafelerin kareleri dikkate alınmıştır. Bununla birlikte seçim işleminde başkan adaylarının enerji seviyeleri de önem arz etmektedir. Bir başkan adayının enerji seviyesi, kümedeki elemanlardan bilgileri toplamada ve bu bilgileri merkeze iletmede yeterli gelmiyorsa bu aday küme başkanı olarak seçilmemelidir. Küme başkanlarının seçiminde kümelerin organizasyonu için gerekli olan enerji miktarları da (kısıtlama fonksiyonu olarak) dikkate alınmaktadır. ABC algoritmasında kullanılmak üzere küme başkanlarının uygunluk durumunu ifade eden fonksiyon ve bahsedilen kısıtlamalar Eşitlik 6.11 ve Eşitlik 6.12'de verilmektedir.

$$f^{mesafe} = \left[ w \cdot \sum_j^n \left( b_j^2 + \sum_i^{m_j} d_{ij}^2 \right) \right]^{-1} \quad (6.11)$$

Kısıtlamalar için kullanılan bağıntı:

$$\begin{aligned}
E_j &\geq (m_j \cdot E_{al} + E_{vr_j}), \\
E_{al} &= E_{elek} \cdot k, \\
E_{vr_j} &= E_{elek} \cdot k + E_{yuk} \cdot k \cdot b_j^2
\end{aligned} \tag{6.12}$$

Bağıntıda  $w$  çarpan olmak üzere (Eşitlik 6.3'den elde edilmektedir)  $i$  üye indeksini,  $j$  küme indeksini,  $k$  paket büyüklüğünü (bit sayısı olarak),  $n$  küme başkanı sayısını,  $m_j$   $j$ 'nci kümenin eleman sayısını,  $d$  uzaklığı,  $b_j$   $j$ 'nci küme başkanının baz istasyonuna uzaklığını,  $E_{al}$  alma enerjisini,  $E_{vr}$  transfer enerjisini,  $E_{elek}$  alıcı/verici devresinin harcadığı enerjiyi ve  $E_{yuk}$  ise verici kuvvetlendirici katsayısını ifade etmektedir. Eşitlik 6.12'den alma enerjisinin uzaklıktan bağımsız olarak bütün elemanlar için aynı olduğu görülür. Küme başkanlarının seçim işlemi LEACH algoritmasına göre farklıdır. LEACH algoritması küme başkanları seçiminde 4'ncü bölümde verilen rasgele tabanlı bir metod kullanırken önerilen protokolde başkanlık durumlarının uygunluk kriterlerinin incelendiği bir yaklaşım kullanılmaktadır. Geliştirilen yaklaşımda elemanların birbirlerine olan uzaklıklarının elde edilmesi gerekmektedir. Bu ise, ağ ilk oluşturulduğunda elemanların ağa tanıtım mesajları göndermesiyle ve her bir elemanın bu mesajın şiddetine bakarak diğer elemanlara olan uzaklıklarını hesaplamasıyla sağlanmaktadır. Bu işlem için Eşitlik 6.13 kullanılır. Daha sonra uzaklık bilgileri baz istasyonuna iletilmekte ve baz istasyonu Eşitlik 6.11 ve 6.12'yi kullanarak üzerinde çalıştırdığı ABC algoritması sayesinde optimum düzeyde küme başkanlarının seçim işlemini yapmaktadır. Baz istasyonu daha sonra bu sonucu ağa iletmektedir.

$$s = c \cdot (P^g)^{1/2} / 4\pi f \text{ olmak üzere } d(i, j) = s \cdot [P^a(i, j)]^{1/2} \tag{6.13}$$

Eşitlikte  $i$  ve  $j$  haberleşen elemanların indis numaralarını,  $c$  ışık hızını,  $P^g$  veri iletim gücünü (bütün ağa yayın yapabilecek seviyede her bir eleman için sabit bir değerde alınmaktadır),  $P^a$  alınan sinyal gücünü,  $f$  ise haberleşme frekansını temsil etmektedir [39].

Bu bölümde önerilen uygunluk fonksiyonu (Eşitlik 6.11) ile çalıştırılan yönlendirme algoritmasına, Yapay Arı Koloni algoritmasına dayalı Kümeleme tabanlı Kablosuz

Algılayıcı Ağ yönlendirmesi (Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm – “CWA”) ismi verilmiştir.

#### 6.1.4. CWA Algoritmasının Performans Sonuçları

Bu bölümde CWA algoritması ile ilgili benzetim sonuçları alınmış ve performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, doğrudan veri iletimi (direct transmission) metodu ve yaygın hiyerarşik yönlendirme metotlarından olan LEACH Algoritması ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada 100 adet algılayıcı eleman 500x500 m<sup>2</sup>'lik alana rasgele dağıtılmış ve baz istasyonu bu alanın hemen dışına X=250 m, Y=575 m noktasına yerleştirilmiştir. LEACH algoritması için yazarlar, “ağın %5'i küme başkanı olmalıdır” şeklinde tavsiyede bulunmaktadır [25,26]. Bu tavsiyeye uygun olarak  $P$  parametresi 0,05 değerine set edilmiştir. Bu nedenle, eşit sayıda küme başkanını kullanmak üzere CWA algoritmasının da parametre sayısı 5 (100 eleman için) olarak alınmıştır.

Aynı şartlarda sonuçların alınabilmesi için Bölüm 3'de verilen radyo modeli ve bu model'de Eşitlik 3.8 - Eşitlik 3.10 ile verilen eşitlikler kullanılmaktadır. Eşitlikte  $k$  adet bit (1 paket) için alıcı/verici devrelerin enerji harcaması olan  $E_{elek}$  ve vericinin kuvvetlendirme işlemi için gerekli enerjisi harcaması olan  $E_{yuk}$  Tablo 6.3'de verildiği değerlerde alınmıştır. Kanal iletimdeki güç kaybının mesafenin( $d$ ) karesiyle orantılı olduğu görülmektedir. Haberleşme hızı( $f$ ) ise 1024 bit/s alınmıştır. Benzetim koşurmalarında algılayıcı elemanların enerji seviyeleri rasgele düzende olmak üzere %80' ini için 0.2 Joule, %20' si için 0.5 Joule alınmıştır.

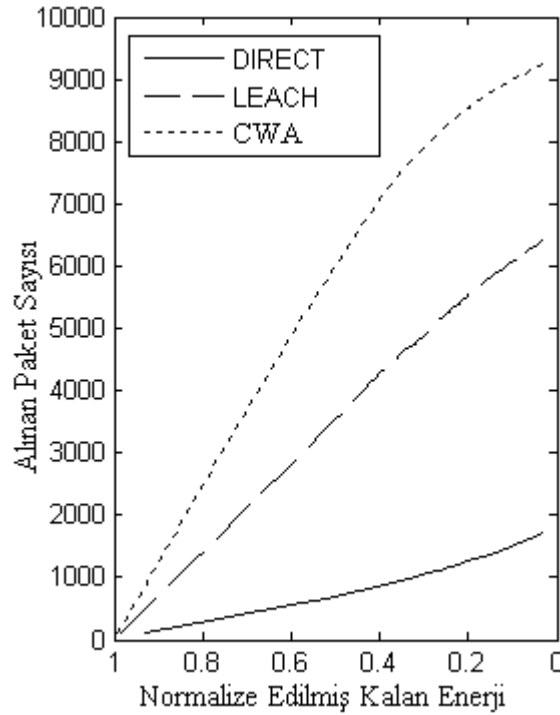
Tablo 6.3. CWA Benzetim koşurmalarında kullanılan parametre değerleri

| $E_{elek}$ | $E_{yuk}$                | $k$      | $f$        |
|------------|--------------------------|----------|------------|
| 50nJ/bit   | 100pJ/bit/m <sup>2</sup> | 1024 bit | 1024 bit/s |

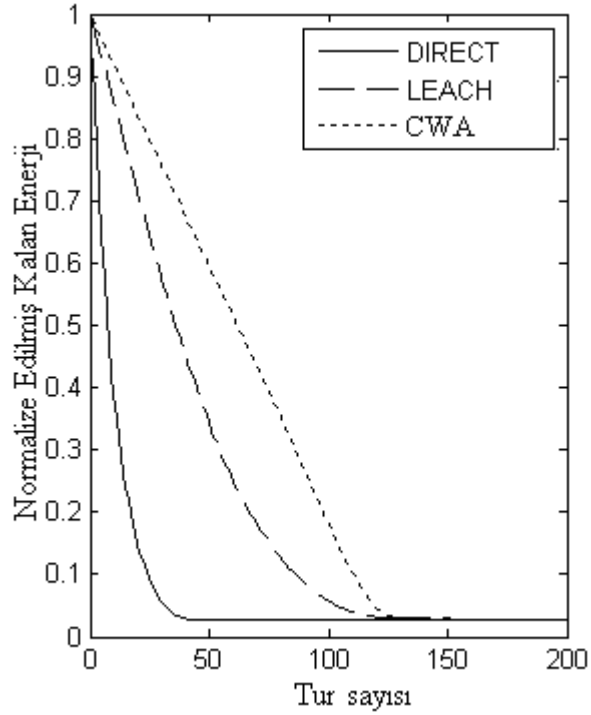
Eşitliklerden görüleceği üzere alma enerjisi az maliyetli bir operasyon değildir. Bu yüzden iletim enerjisinin yanında alma enerjisi de minimize edilecek şekilde yaklaşım gerçekleştirilmelidir.

KAA yapısında bütün algılayıcı elemanların baz istasyonuna iletilmek üzere veri ihtiva ettiği düşünülmüştür. Bu işlem daha çok gözlem (monitoring) uygulamaları için uygun olmakta ve olay-bazlı (event-driven) çalışan yapılar için uygundur. Ağ üzerinde veriler periyodik olarak toplanmakta ve küme başkanları aracılığı ile baz istasyonuna gönderilmektedir. Şekil 6.8 alınan paket sayısının ağ üzerinde kalan enerjiye göre değişim grafiğini göstermektedir. Şekilden CWA algoritmasının karşılaştırılan diğer iki algoritmaya göre mevcut enerjiyle ağı daha performanslı olarak kullandığı görülmektedir. Ağ enerjisi yarıya düştüğünde alınan paket sayısı LEACH algoritmasıyla alınan paket sayısının 1,7 katı olmaktadır. Şekil 6.9’da ise ağ enerjisinin tur sayısına göre değişim grafiği yer almaktadır. Bu grafikten de önerilen yaklaşımın ağın işlevini daha çok tur sayılarıyla devam ettirdiği görülmektedir [39].

Bu bölümde hiyerarşik yapılarda kablosuz algılayıcı ağlar için kümeleme teknikleri kullanarak Yapay Arı Koloni Algoritmasına dayalı yeni bir yaklaşım (CWA protokolü) geliştirilmiş ve bu yaklaşıma ait temel performans sonuçları alınmıştır. Yaklaşım üzerinde yapılan iyileştirmelerle birlikte daha ayrıntılı sonuçlar devam eden bölümde verilmektedir.



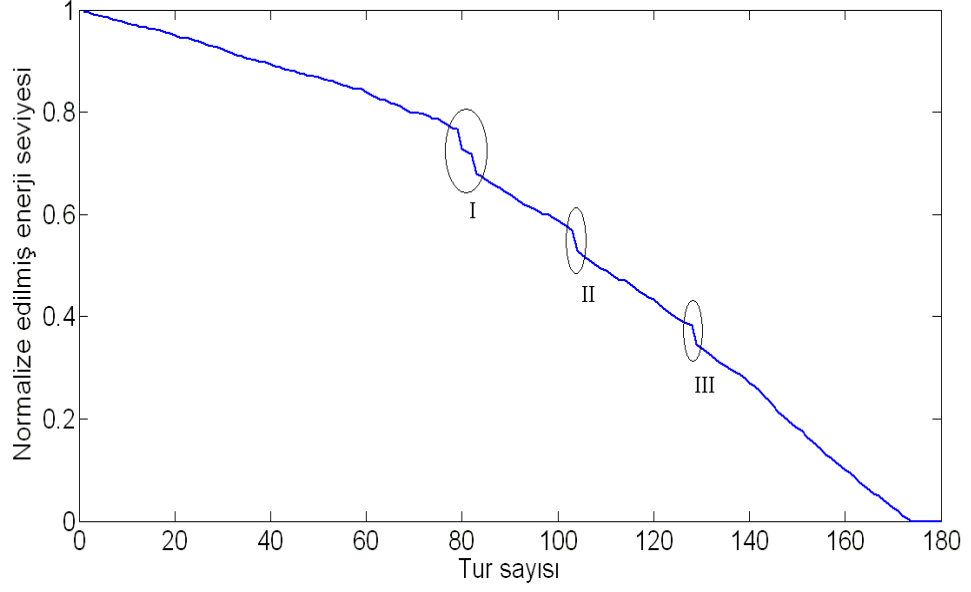
Şekil 6.8. Alınan paket sayısına göre ağ üzerinde kalan enerji



Şekil 6.9. Tur sayısına göre ağ üzerinde kalan enerji

#### 6.1.5. Uygunluk Fonksiyonu Üzerinde Yapılan İyileştirmeler

Bu bölümde uygunluk fonksiyonu olarak algılayıcı elemanların enerji durumlarını da dikkate alacak şekilde iyileştirme yapılmasının olabirirliliği araştırılmıştır. Burada ana fikir, enerjileri azalan algılayıcı elemanların “küme başkanı” olarak seçilme ihtimallerinin azaltılmasına yani zamanla azalma eğiliminde olan enerji kaynakların seviyelerinin küme başkanlığı seçiminde dikkate alınmasına dayanır. Şekil 6.10’da CWA algoritması kullanılarak işletilen ağ yapısında yer alan bir algılayıcı elemanın enerji tüketim grafiği verilmektedir (kullanılan parametre değerleri performans sonuçlarını içeren bölümde sunulmuştur). Şekil üzerinde I, II ve III ile gösterilen bölgelerde bu elemanın küme başkanı olarak seçilme ihtimalinin diğer bölgelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Enerjinin tükenmeye yaklaştığı bölgelerde algoritma, diğer elemanların enerji seviyelerini de dikkate alarak bu elemanın başkan olarak seçilmemesi yönünde karar alabilir. Bu sayede ağ üzerindeki enerjisi azalmış elemanların daha uzun süre işlevlerini devam ettirmelerinin sağlanması hedeflenmektedir.



Şekil 6.10. Enerji tüketim grafiği

#### 6.1.6. Uygunluk Fonksiyonunda Enerji Kriterinin Kullanımı

Bölüm 6.1.5’de verildiği üzere küme başkanları bir tur boyunca kümedeki diğer elemanlardan çok daha fazla enerji tüketmektedirler. Bu durumda enerji seviyeleri yüksek olan elemanların başkan olarak seçilmesi ağ ömrünü artırmaya yönelik bir çözüm olacaktır. Bir tur için çözüm kümesi olarak seçilen küme başkalarını ele aldığımızda, en az enerjili küme başkanının enerji seviyesi belli bir eşik seviyesinden yüksek ise bu seçim işleminin uygun bir çözüm olacağı algoritmanın değerlendirme kriterinin temelini oluşturmaktadır. İyi bir çözüm için uygunluk fonksiyonu değerinin 1’e yakın bir değer olması beklenmektedir. Küme başkanı olarak seçilen elemanlardan enerji seviyesi en düşük olanı önerilen değerlendirme kriteri gereği, bu çözüm kümesinin kalite seviyesini verecektir. Eşitlik 6.14 kriterin uygunluk fonksiyonunun enerji ile ilgili kısmını ifade etmektedir (Burada  $E_j^{anlık}$  j’nci elemanın normalize edilmiş anlık enerji seviyesini göstermektedir).

$$C = \begin{cases} f^{enerji} \geq \theta & \text{if } \min_{j=1}^m (E_j^{an}) \geq \sigma \\ f^{enerji} < \theta & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (6.14)$$

Burada  $E_j^{an}$   $j$ 'nci elemanın normalize edilmiş anlık enerji seviyesini,  $\sigma$  ve  $\theta$  eşik seviyelerini,  $f^{enerji}$  ise uygunluk değerini göstermektedir. Eşitlikte bataryanın kritik enerji seviyesini göstermek üzere (eşik seviyesi) yüzde doksanın boşaldığı anı gösteren  $\sigma = \%10$  değeri alınmakta ve bu ana kadar uygunluk fonksiyonunun da  $\%100$  ile  $\%90$  ( $\theta$ ) arasında sonuç üretmesi amaçlanmaktadır.

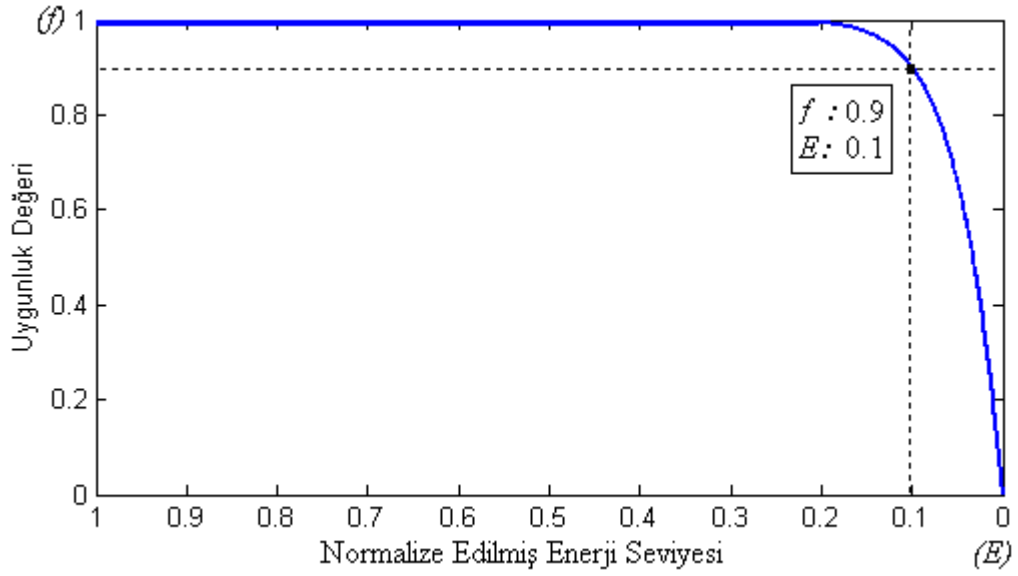
Elemanların enerji seviyelerinin uygunluk durumunun belirlenmesi için kullanılan bağıntı (Eşitlik 6.15) aşağıda yer almaktadır. Bu bağıntı elemanların küme başkanı olarak seçilebilirliğini ifade etmektedir. Eşitlikte  $i$  ağdaki elemanların indeksini,  $j$  küme başkanlarının indeksini,  $n$  ağdaki eleman sayısını ve  $m$  uygunluk değeri hesaplanacak olan kümedeki elemanların sayısını göstermektedir. Eşitlikte, küme başkanları olarak seçilen elemanlar içerisinde kriterimiz gereği enerjisi en az olanın durumu dikkate alınarak uygunluk değeri hesaplanmaktadır.

$$\tau = -\varphi \cdot \frac{\min_{j=1,..,m} (E_j^{an})}{\max_{i=1,..,n} (E_i^{an}) - \min_{j=1,..,m} (E_j^{an})}, \quad (6.15)$$

$$f^{enerji} = 1 - e^{\tau}$$

Şekil 6.11, Eşitlik 6.15 kullanılarak  $[0,1]$  aralığı için üretilen uygunluk değerini göstermektedir. Şekilden, enerji seviyesi  $\%100$  (1) iken uygunluk durumunun 1, sıfıra yaklaştıkça ise uygunluk durumunun hızla sıfıra doğru azaldığı görülmekte ve bu eğrinin konvekslik derecesi (dışbükey)  $\varphi$  parametresiyle ayarlanmaktadır.

Önerilen yaklaşımda bataryasının yüzde doksanı boşalana kadar bu elemanın başkan olarak seçilebilirliğinin yüksek tutulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda enerji seviyesinin  $\%10$ ' dan büyük değerleri için fonksiyon çıkışının  $\%90$ ' dan büyük değer üretmesini sağlayan  $\varphi$  parametresi değeri Eşitlik 6.15'den 20,72 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.11. Enerji durumunu gösteren uygunluk fonksiyonu eğrisi

Algılayıcı elemanların haberleşme enerjilerinin yanı sıra enerji seviyelerini de dikkate alarak geliştirilen uygunluk fonksiyonunu kullanan algoritma, “Yapay Arı Kolonisi Algoritmasına dayalı kümeleme tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağ algoritmasının iyileştirilmiş versiyonu (an Improved version of Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm – ICWA)” olarak isimlendirilmiştir.

#### 6.1.7. ICWA Algoritmasının Performans Sonuçları

Küme başkanlarının seçimi işleminde algılayıcı elemanların enerji seviyelerinin de dikkate alınmasına yönelik geliştirilen ICWA algoritmasının performans sonuçlarının alınmasında Eşitlik 6.11, 6.12 ve 6.15’de yer alan bağıntılar kullanılmıştır. Performans karşılaştırmalarında LEACH algoritmasının yanı sıra PSO algoritması kullanılarak geliştirilen modellerde kullanılmıştır. Algoritmaların işletilmesinde referans alınan parametreler için Tablo 6.4’de verilen değerler alınmıştır. Kanal iletimdeki güç kaybı için boş uzay modeli kullanılmış ve haberleşme hızı ile işlemci özellikleri parametreleri için yaygın olarak kullanılan bir algılayıcı olan MICAz donanımı referans olarak alınmıştır [51]. Bu donanımın desteklediği haberleşme hızı  $f=250$  Kbit/s ve veri boyutu için  $k=512$ Kbit parametre değerleri kullanılmıştır. Benzetim koşullarında kullanılan algılayıcı elemanların enerji seviyeleri için küçük ölçekli bataryaların sağlayabileceği bir kapasite değeri olan 100 Joule değeri kabul edilmiştir [117-119]. Daha gerçekçi bir

ağ modellemesi yapmak amacıyla başlangıç enerjileri farklı değerlerde alınmıştır. Ağın elemanları üzerinde bulunan enerji kaynakları farklı kapasitelerde enerji içerebilmektedirler. Bunun sebepleri arasında aşağıda belirtilen etkenler söylenebilir:

- Enerji seviyelerinin ağ içerisindeki farklı görev almalarından dolayı zamanla farklılıklar arz ederek azalması,
- Enerji kaynaklarına ilave olarak çevresel ortamdan alınan enerjilerin farklı olması (örneğin güneş enerjisinden faydalanılan elemanların farklı şiddetlerde güneş ışığı almaları),
- vb.

Farklı enerji kapasitelerinin oluşturulması amacıyla rasgele düzende olmak üzere elemanların %20'sinin 100 Joule, %80'inin ise 40 Joule enerji kaynaklarına sahip olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 6.4. ICWA/ICWAQ Benzetim koşuturmalarında kullanılan parametre değerleri

| $E_{elec}$ | $E_{amp}$                | $K$     | $f$        |
|------------|--------------------------|---------|------------|
| 50nJ/bit   | 100pJ/bit/m <sup>2</sup> | 512Kbit | 250 Kbit/s |

Benzetim ortamında 100 adet algılayıcı eleman 500x500 m<sup>2</sup> alanda rasgele dağıtılmıştır. Baz istasyonu X = 250m Y= 575m pozisyonuna yerleştirilmiştir. Karşılaştırmalarda kullandığımız algoritmalar gözlem (monitoring) uygulamaları için uygun olmakta ve bu tür yapılarda veriler periyodik olarak toplanmakta ve küme başkanları aracılığı ile baz istasyonuna gönderilmektedir.

Performans karşılaştırmalarında, geliştirilen protokoller ile doğrudan, LEACH [26] ve PSO-F1 [40] protokollerinin ürettiği sonuçlar verilmiştir. PSO-F1 protokolünün kullandığı uygunluk fonksiyonu F1 olarak gösterilmiş olup Eşitlik 6.16'da verilmektedir.

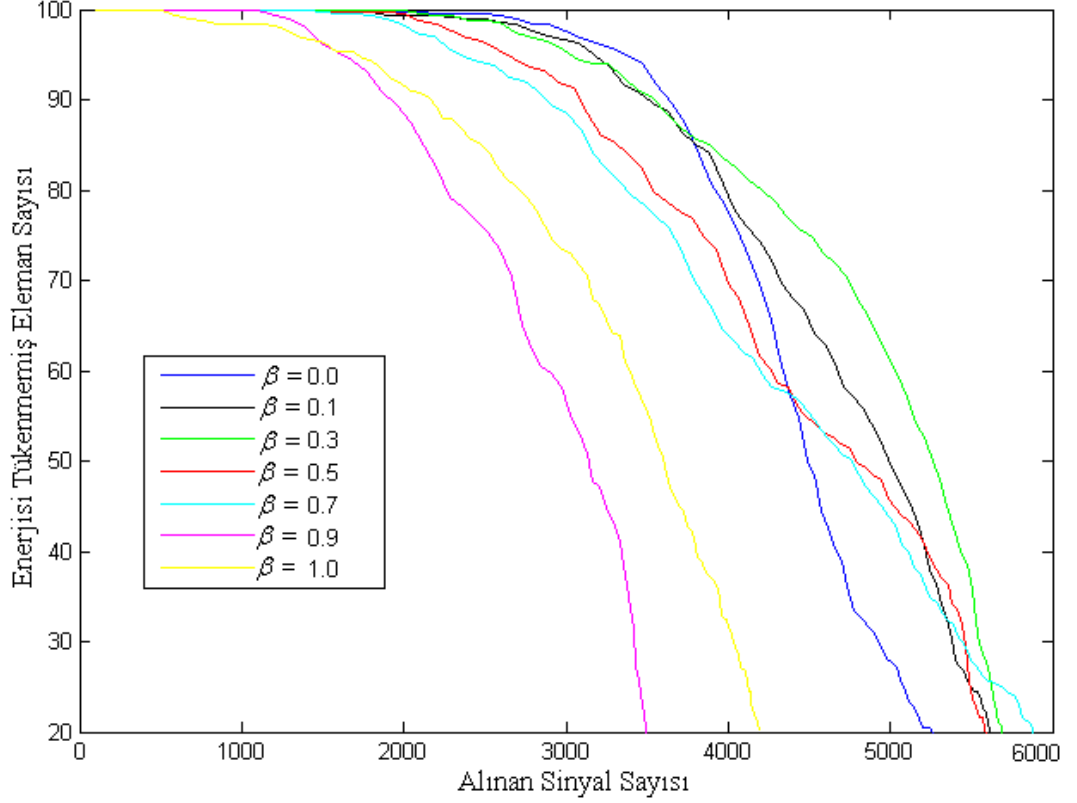
$$\begin{aligned}
F1 &= \beta \cdot f_1 + (1 - \beta) \cdot f_2, \\
f_1 &= \left[ \max_{j=1, \dots, n} \left( \sum_i^{m_j} (d(N_i, CH_j)^2 / m_j) \right) \right]^{-1}, \\
f_2 &= \sum_j^z E_j / \sum_i^n E_i.
\end{aligned} \tag{6.16}$$

KAA yapıları kullanılarak bölge üzerinden veri toplama işleminde, kaliteyi belirleyen bir kriter olarak alınan toplam sinyal sayısını kullanabiliriz. KAA yapılarında ağın ömrü çok önemli bir parametredir. Ağ ömrü enerjiyi verimli kullanabildiği ölçüde artmaktadır. Bu doğrultuda kalite kriterimizin hedefi, maksimum ağ ömrünü sağlayacak ölçüde toplam alınan sinyal sayısı olarak düşünülebilir.

ICWA protokolü Bölüm 6.1.6'da verildiği üzere enerji seviyelerini dikkate alan uygunluk fonksiyonunu (Eşitlik 6.15 ile tanımlı) kullanmaktadır. Kullanılan uygunluk fonksiyonu Tablo 6.5'de yer almaktadır. Bu eşitlik iki ayrı uygunluk fonksiyonundan oluşmakta ve  $\beta$  ağırlıklandırma parametresi ile birleşik uygunluk fonksiyonuna etki etmektedirler.  $\beta$ 'nın  $[0,1]$  aralığında 7 farklı değeri için ICWA protokolünün ürettiği sonuçlar Şekil 6.12 ve 6.13'de verilmiştir. Sonuçlar on ayrı ağ yapısı için elde edilmiş olup bunların ortalaması alınarak verilmiştir. Şekil 6.12'de gösterilen sonuç için elemanların %80'inin enerjileri tükenene kadar, Şekil 6.13'de gösterilen sonuç için ise ağ üzerindeki toplam enerjinin %80'i tükenene kadar ICWA protokolü işletilmiştir.

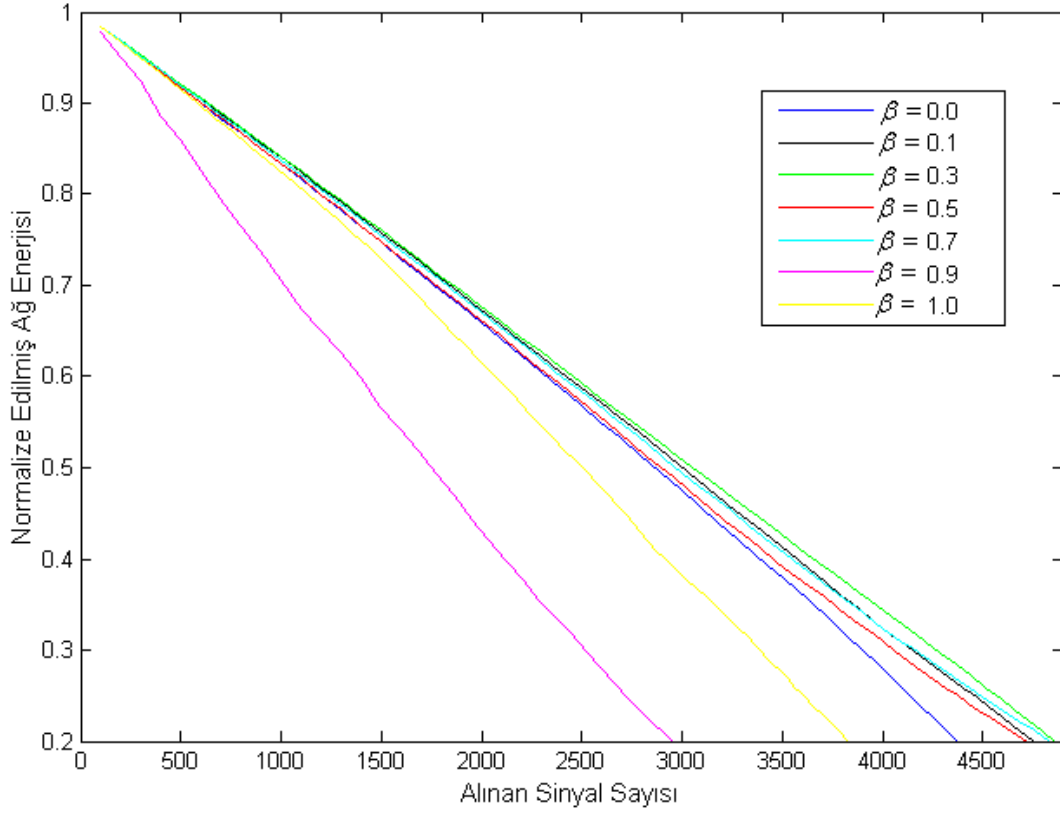
Şekil 6.12 alınan sinyal sayısına bağlı olarak ağ üzerinde yaşayan algılayıcı eleman sayısını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere  $\beta = 0,3$  değerini kullanan yapının çıkışı eğrisi diğer eğrilerin altında en az seviyede kalmaktadır. Başka bir ifade ile altında oluşan en fazla alan bu eğride gözlenmektedir. Ağın ömrü süresince genel bir çerçeveden bakıldığında,  $\beta$  parametresinin bu değerinin kullanılmasıyla zamanla ölen algılayıcı eleman sayısının diğerlerine kıyasla daha minimum seviyede tutulduğu görülmektedir.  $\beta$ 'nın değerinin sıfır alınması halinde uygunluk fonksiyonuna sadece  $f^{mesafe}$  etki etmektedir. Bu ise ICWA protokolünün CWA protokolü gibi çalışması anlamına gelir. Şekil 6.13'den  $\beta$  değerinin daha küçük değerleri için alınan sinyal sayısının azaldığı ve performans sonucunun kötüleştiği yorumu yapılabilir.

Birleşik uygunluk fonksiyonu ( $f^{ICWA}$ ) her iki uygunluk fonksiyonuna ( $f^{mesafe}$  ve  $f^{enerji}$ ) bağlı olmakla birlikte, enerji seviyelerini dikkate alan fonksiyonun ( $f^{enerji}$ ) algılayıcı elemanların yaşam durumlarında kısmen daha etkili olduğu görülmektedir. Yaşama sürelerindeki artış ise baz istasyonuna iletilen sinyal sayısındaki artışa neden olduğu için Şekil 6.13’de verilen grafikte de görüldüğü gibi ağın daha fazla sayıda sinyal göndermesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, Şekil 6.13  $\beta = 0,3$  değerinin ağ üzerindeki enerjinin daha fazla sinyal göndermeyi sağlayacak şekilde tasarruflu kullanıldığını da göstermektedir.



Şekil 6.12. Farklı  $\beta$  değerleri için enerjisi tükenmemiş eleman sayısı

Şekil 6.12’de  $\beta = 0$  değerini kullanan yapı ağ işleyişi başlangıcında kısmen başarılıdır. Ancak ağ işleyişinin devam eden kısımlarında çok fazla miktarda enerji tüketimine neden olmaktadır.



Şekil 6.13. Farklı  $\beta$  değerleri için ağ üzerinde kalan enerji

#### 6.1.8. Uygunluk Fonksiyonunda Servis Kalitesi Kriterinin Kullanımı

Bilgisayar ağları haberleşmesinde servis kalitesi önemli bir kavramdır. Servis kalitesi parametreleri arasında gecikme (delay), titreşme (jitter), elverişli bantgenişliği (bandwidth) vb. parametreler yer almaktadır [39, 83, 85]. Bu parametreler üzerinde OSI referans katmanlarının birçoğu etkili olmaktadır [114-116]. Geliştirilen protokolün servis kalitesine etkisini incelemek amacıyla yönlendirme algoritmasının doğrudan etkili olduğu gecikme (delay) parametresi ele alınmıştır. Alınan sinyallerin kaynaktan hedefe minimum sürede ulaşması “gecikme” parametresinin minimum değerde tutulmasıyla sağlanabilir. Benzetim sonuçlarında, gecikme parametresinin etkisi belirli zamanlarda o ana kadar alınan toplam paket sayısı verileriyle gözlenmektedir.

Kümeleme yöntemiyle veri transferi yapan KAA yapılarında bir tur, küme başkanlarının üye elemanlarından topladığı sinyalleri birleştirme işlemine tabi tuttukten sonra baz istasyonuna iletmesiyle tamamlanmaktadır. Küme içi haberleşmede TDMA MAC protokolü kullanan yapılar için bir turda harcanan zaman üye elemanlarının en fazla

olduğu kümenin harcadığı zamandır. Verinin iletilmesi için gerekli transfer zamanı paket uzunluğu ( $k$ , bit sayısı), iletim hızı ( $f$ , birim zamanda iletilen bit sayısı) gibi fiziksel ve MAC katmanında yer alan parametrelere de bağlıdır. Bu parametreler dışında yönlendirme katmanında yer alan parametreler (küme sayısı, küme elemanları sayısı, haberleşme metodu, vb) ele alındığında Eşitlik 6.17’de verilen uygunluk fonksiyonu önerilmektedir. Eşitlikte  $i$  küme indeksini,  $m_i$   $i$ ’nci kümenin eleman sayısını ve  $n$  ise küme sayısını göstermektedir. Gönderilen her bir paket için bir transfer zamanına ihtiyaç duyulduğu göz önüne alınırsa,  $i$ ’nci kümenin ihtiyaç duyduğu toplam zaman,  $m_i$  adet transfer zamanı ile paketin baz istasyonuna iletilmesi için gerekli olan bir transfer zamanının toplamına eşittir. Önerilen uygunluk fonksiyonunda maksimum transfer zamanına ihtiyaç duyan kümenin toplam transfer sayısı esas alınmıştır.

$$f^{servis\_kalitesi} = \left[ \max_{i=1,\dots,n} (m_i + 1) \right]^{-1} \quad (6.17)$$

Algılayıcı elemanların haberleşme enerjileri, enerji seviyeleri ve servis kalitesi parametresi dikkate alınarak geliştirilen uygunluk fonksiyonunu kullanan algoritma “Servis kalitesini dikkate alarak Yapay Arı Kolonisi Algoritmasıyla geliştirilen kümeleme tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağ algoritmasının iyileştirilmiş versiyonu (an Improved version of Cluster based Wireless sensor network routings using Artificial bee colony algorithm considering Quality of service– ICWAQ) olarak isimlendirilmiştir.

#### 6.1.9. Uygunluk Fonksiyonlarının Birleştirilmesi

Yapay Arı Koloni algoritmasına bir çözümün kalitesi ile ilgili bilgi olarak  $[0,1]$  aralığında kalite değerinin gönderilmesi gerekmektedir. Şu ana kadar önerilen uygunluk fonksiyonlarının bu değer üzerinde etkili olmaları amaçlanarak tek bir uygunluk fonksiyonunu oluşturacak şekilde birleştirilebilir.

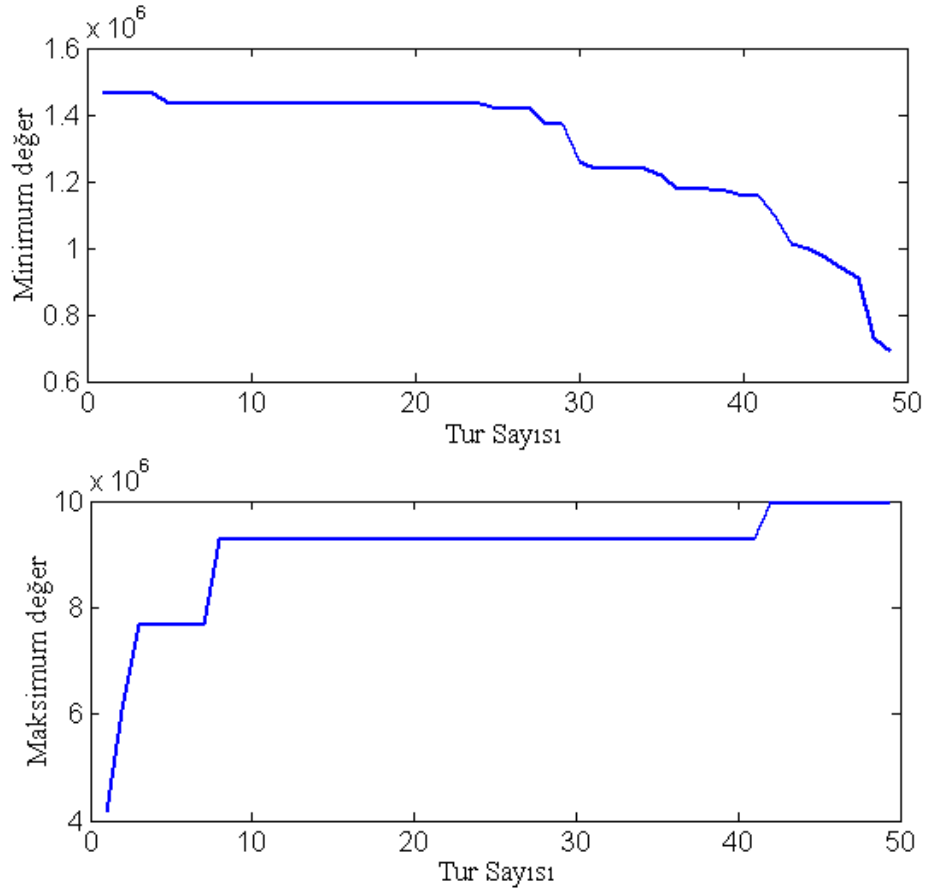
ICWA protokolünde kullanılan fonksiyonların (Eşitlik 6.11 ve 6.15)  $\beta$  ağırlıklandırma parametresi kullanılarak birleştirilmesiyle elde edilen bağıntı Eşitlik 6.18’de verilmektedir.

$$f^{ICWA} = \beta \cdot f^{mesafe} + (1 - \beta) \cdot f^{enerji} \quad (6.18)$$

ICWAQ protokolünde kullanılan Eşitlik 6.17'deki servis kalitesini dikkate alan uygunluk fonksiyonu da  $\delta$  ağırlıklandırma parametresiyle bu ifadeye etki ettirilirse sonuçta elde edilen uygunluk fonksiyonu Eşitlik 6.19'da verildiği gibi olacaktır. Uygunluk fonksiyonları ağırlıklandırma parametreleriyle birleştirilmeden önce normalizasyon işlemine tabi tutulmaktadır.

$$f^{ICWAQ} = \delta \cdot f^{ICWA} + (1 - \delta) \cdot f^{servis\_kalitesi} \quad (6.19)$$

Eşitliklerde kullanılan  $\beta$  ve  $\delta$  ağırlıklandırma parametreleri olup  $[0, 1]$  aralığında değerleri alan sabitlerdir. Bu parametrelerin değerleri, algoritma için en iyi performansı üretecek şekilde seçilmelidir. Uygunluk fonksiyonlarının birleştirmesinden önce Eşitlik 6.11 için yapılan normalizasyon işleminde ihtiyaç duyulan minimum ve maksimum değerler, algoritma çalışırken ağ ömrü boyunca elde edilen sınır değerleri ifade etmektedir. Bu değerler Şekil 6.14'de gösterilmektedir. Tablo 6.5'de ise protokollerin kullandığı uygunluk fonksiyonları verilmektedir.



Şekil 6.14.  $f^{mesafe}$  uygunluk fonksiyonunun aldığı değerler

Tablo 6.5. Algoritmaların kullandığı uygunluk fonksiyonları

| Protokol                     | Fonksiyon Adı | Fonksiyon İçeriği                                                                                                                                                                                                                                                         | Eşitlik No |
|------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| PSO-F1,<br>ABC-F1            | F1            | $F = \beta \cdot f_1 + (1 - \beta) \cdot f_2$ $f_1 = \left[ \max_{j=1, \dots, n} \left( \sum_i^{m_j} (d(N_i, CH_j)^2 / m_j) \right) \right]^{-1}$ $f_2 = \sum_j E_j / \sum_i E_i$                                                                                         | (6.16)     |
| ABC-F2(CWA)                  | F2            | $F = \left[ w \cdot \sum_j^n \left( \sum_i^{m_j} d_{ij}^2 + b_j^2 \right) \right]^{-1}$                                                                                                                                                                                   | (6.11)     |
| PSO-F3,<br>ABC-F3(ICWA)      | F3            | $F = \beta \cdot f^{mesafe} + (1 - \beta) \cdot f^{enerji}$ $f^{mesafe} = \left[ w \cdot \sum_j^n \left( \sum_i^{m_j} d_{ij}^2 + b_j^2 \right) \right]^{-1}$ $f^{enerji} = 1 - e^{\tau}$                                                                                  | (6.18)     |
| PSO-F4,<br>ABC-F4<br>(ICWAQ) | F4            | $F = \delta \cdot f_3 + (1 - \delta) \cdot f_4$ $f_1 = \left[ w \cdot \sum_j^n \left( \sum_i^{m_j} d_{ij}^2 + b_j^2 \right) \right]^{-1}$ $f_2 = 1 - e^{\tau}$ $f_3 = \beta \cdot f_1 + (1 - \beta) \cdot f_2$ $f_4 = \left[ \max_{i=1, \dots, n} (m_i + 1) \right]^{-1}$ | (6.19)     |

Bu bölümde uygunluk fonksiyonu üzerinde yapılan iyileştirmelere ek olarak küme başkanı olarak seçilen elemanların oluşturduğu kümenin iyilik derecesini gösteren yeni bir değerlendirme kriteri tanımlanmıştır.

#### 6.1.10. ICWAQ Algoritmasının Performans Sonuçları

ICWAQ protokolü Bölüm 6.1.7’de verildiği üzere uygunluk fonksiyonu olarak Eşitlik 6.11, 6.12 ve 6.15 ile verilen tanımlamaları kullanmaktadır. Bu eşitlikler ICWA uygunluk fonksiyonuna ek olarak servis kalitesi ile ilgili uygunluk fonksiyonu da

içermektedir. Daha önceden elde edilen sonuçlar doğrultusunda mevcut ağ yapısı için ICWA protokolü  $\beta$ 'nın değerini 0,3 olarak almaktadır. Servis kalitesinin uygunluk fonksiyonu da  $\delta$  ağırlıklandırma parametresi ile birleşik uygunluk fonksiyonuna etki etmektedir.  $\delta$ 'nın  $[0,1]$  aralığında 7 farklı değeri için ICWAQ protokolünün ürettiği sonuçlar Şekil 6.15 ve 6.16'da verilmektedir. Sonuçlar on ayrı ağ yapısı için elde edilmiş ve bunların ortalaması alınarak çizilmiştir. ICWAQ protokolü, Şekil 6.15'de gösterilen sonuç için elemanların %80'inin enerjileri tükenene kadar, Şekil 6.16'da gösterilen sonuç için ise ağ üzerindeki toplam enerjinin %80'i tükenene kadar çalıştırılmıştır. Şekil 6.15 alınan sinyal sayısına bağlı olarak ağ üzerinde yaşayan algılayıcı eleman sayısını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere  $\delta = 0,9$  değerini kullanan yapının çıkışı eğrisi, diğer eğrilerin altında en az seviyede kalan eğridir.  $\delta$  için bu değer alınmasıyla, ağ üzerinde yaşayan eleman sayısının giderek azalmasına rağmen diğer eğrilerden daha fazla sinyal alınımı sağlanmaktadır. Ayrıca ağın genel ömrü süresince, zamanla ölen algılayıcı eleman sayısının diğerlerine kıyasla daha az seviyede tutulduğu görülmektedir.  $\delta$  değerinin sıfır alınmasıyla uygunluk fonksiyonuna sadece  $f^{mesafe}$  ve  $f^{enerji}$  bileşenleri etki ettirilmektedir. Bu ise ICWAQ protokolünün ICWA protokolü gibi çalışması anlamına gelir. Şekil 6.16'dan  $\delta$  değerinin daha küçük veya daha büyük değerleri için alınan sinyal sayısının azaldığı ve performans sonucunun kötüleştiği yorumu yapılabilir. Şekil 6.17'de ise  $\delta = 0,9$  için oluşan eğrinin maksimum ağ ömrünü sürdürecekt ölçüde diğerlerinden daha fazla servis kalitesi sunan eğri olduğu görülmektedir. Grafik üzerinde yer alan  $\delta = 1,0$  değerinin alınması ise ICWAQ protokolünün ICWA olarak işletilmesi anlamına gelir. Bu grafik üzerinde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise  $\delta = 0,9$  değeri kullanan ICWAQ protokolünün ICWA protokolü üzerinde servis kalitesi sunduğudur. Başka bir ifade ile ICWAQ protokolü ile daha kısa zamanda daha fazla sayıda sinyal gönderilebilmektedir.  $\delta$ 'nın 0,3 ve 0,5 değerleri için ağda belirli bir süre daha fazla servis kalitesi alınabilmesine rağmen ağ ömrü çok daha kısa ömürlü olmaktadır. Grafik üzerinde erken sonlanan eğriler sonlandığı noktalarda ömürlerini tamamlamaktadırlar.

Grafik üzerinden yapılan bu yorumlar neticesinde,  $[0,1]$  aralığında verilen değerler kümesi içerisinde ağ ömrü boyunca en iyi sonuçları üreten  $\beta$  ve  $\delta$  parametrelerinin değerleri Tablo 6.6'da verilmektedir.

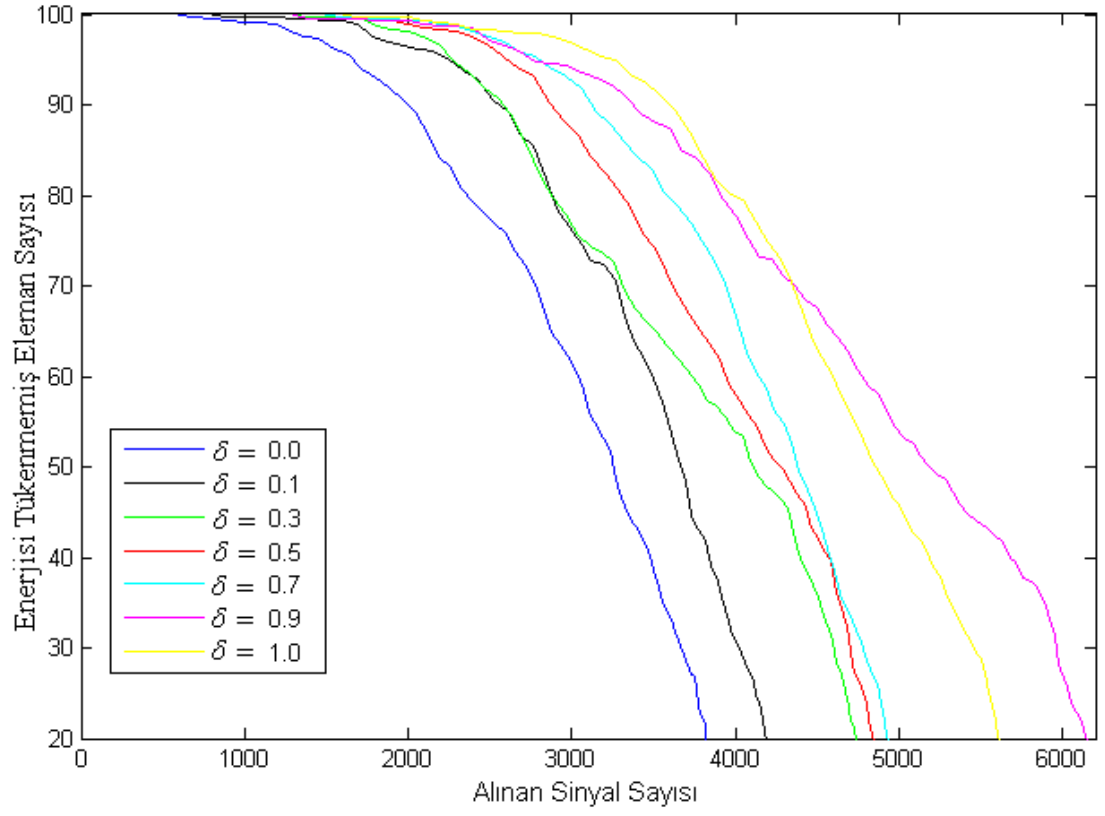
Tablo 6.6. En iyi  $\beta$  ve  $\delta$  değerleri

| Parametre | Değerler Kümesi                 | En İyi Değer |
|-----------|---------------------------------|--------------|
| $\beta$   | [0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1] | 0,3          |
| $\delta$  | [0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1] | 0,9          |

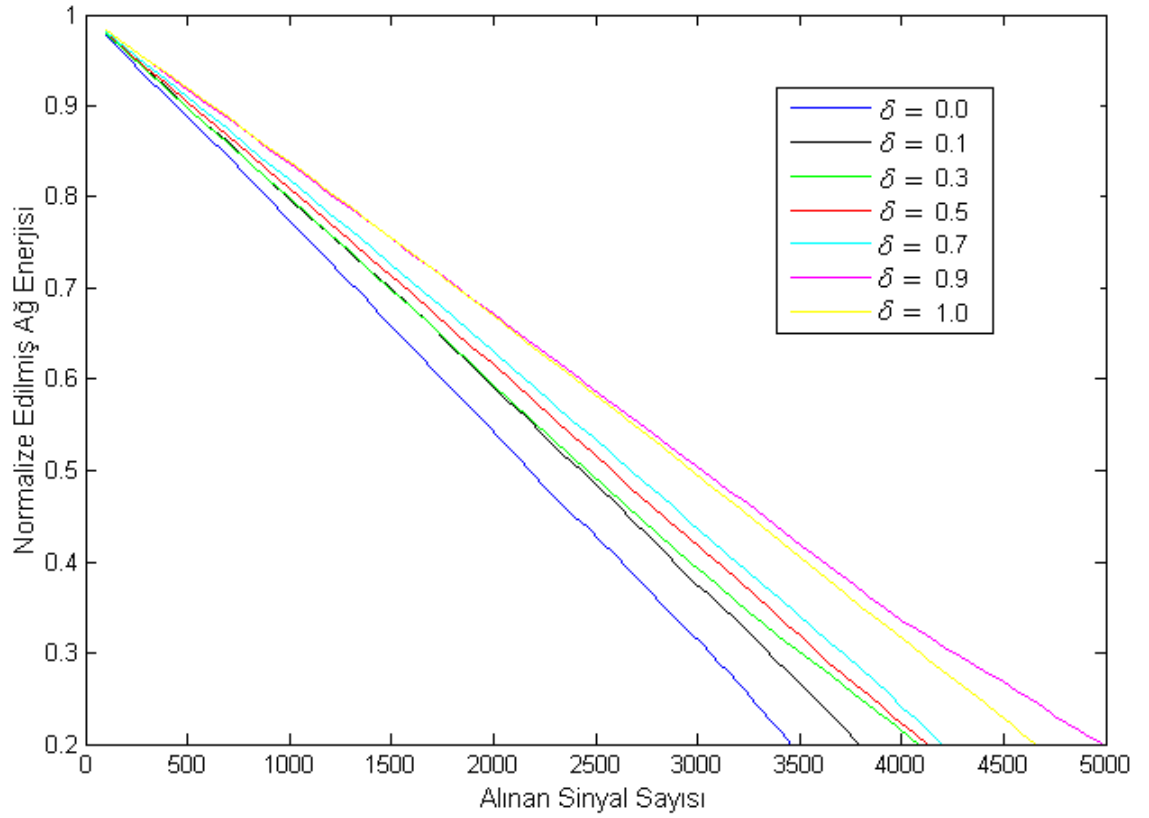
ICWAQ protokolünde birleşik uygunluk fonksiyonu ( $f^{ICWAQ}$ ) üç uygunluk fonksiyonuna ( $f^{mesafe}$ ,  $f^{enerji}$  ve  $f^{servis\_kalitesi}$ ) bağlıdır.  $\delta$  parametresi için en iyi sonuç ürettiği 0,9 değerinin alınması, Şekil 6.16'dan görüleceği üzere haberleşme mesafeleri ( $f^{mesafe}$ ) ve enerji seviyelerini ( $f^{enerji}$ ) dikkate alan fonksiyonların birleşik uygunluk fonksiyonu üzerinde daha etkili olmasına neden olmaktadır.

Geliştirilen ICWAQ algoritmasının diğer algoritmalarla yapılan performans karşılaştırmaları Şekil 6.18 ve 6.19'da yer almaktadır. [26], [40] ve [102] nolu referanslarda yaygın olarak kullanılan kümeleme tabanlı yönlendirme yöntemi olan LEACH ve PSO algoritmasına dayalı bir yönlendirme yöntemi olan PSO-F1 ile ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır. Bu referanslarda ayrıca doğrudan haberleşme, MTE, statik kümeleme, K-ortalama ve GA kullanan protokollerle yapılan performans karşılaştırmaları da verilmektedir. PSO-F1 protokolünün bu referanslarda ve özetle bölüm 4'te verildiği üzere başarılı sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. Bu çalışmada geliştirilen ABC-F1 protokolü PSO-F1 protokolünün kullandığı uygunluk fonksiyonunu kullanan yapıdır. ICWAQ protokolü daha önceden Tablo 6.5'de verilmiş olan F4 uygunluk fonksiyonunu kullanmaktadır. Bu fonksiyonu kullanarak işletilen PSO tabanlı yaklaşım ise PSO-F4 olarak adlandırılmıştır. Tabloda geçen eşitlikler ile ilgili açıklamalar "Eşitlik No" ile verilen sütunun referans ettiği yerlerde verilmektedir.

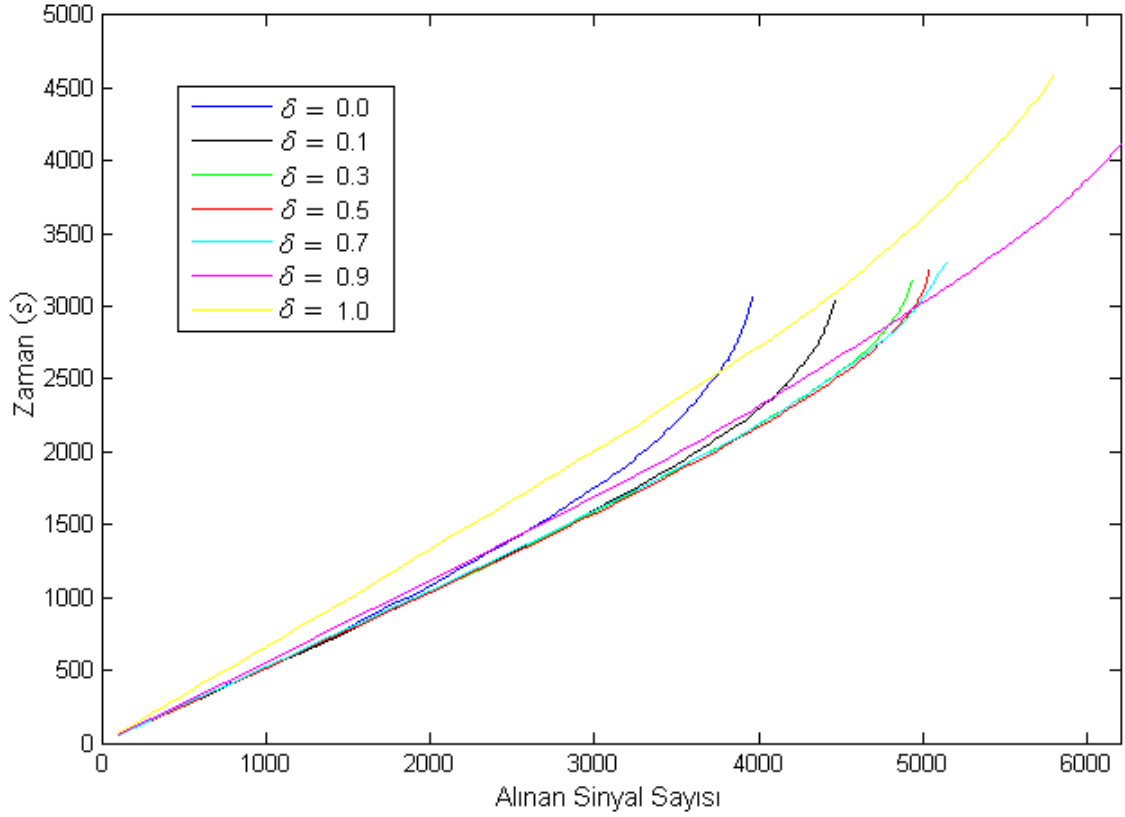
Şekil 6.18'den görüldüğü gibi geliştirilen ICWAQ algoritması KAA işleyişi devam ederken hayatta kalan algılayıcı eleman sayısını maksimumda tutarak diğer protokoller üzerinde bir başarı göstermektedir. Ağ üzerinde hayatta kalan eleman sayısı yarıya düştüğünde ICWAQ protokolü LEACH, PSO-F1, ABC-F1 ve PSO-F4'e kıyasla sırayla 2,28; 1,22; 1,16 ve 1,29 kat sayıda daha fazla sinyal alımını gerçekleştirecek ölçüde performans sağlamaktadır.



Şekil 6.15. Farklı  $\delta$  değerleri için enerjisi tükenmemiş eleman sayısı



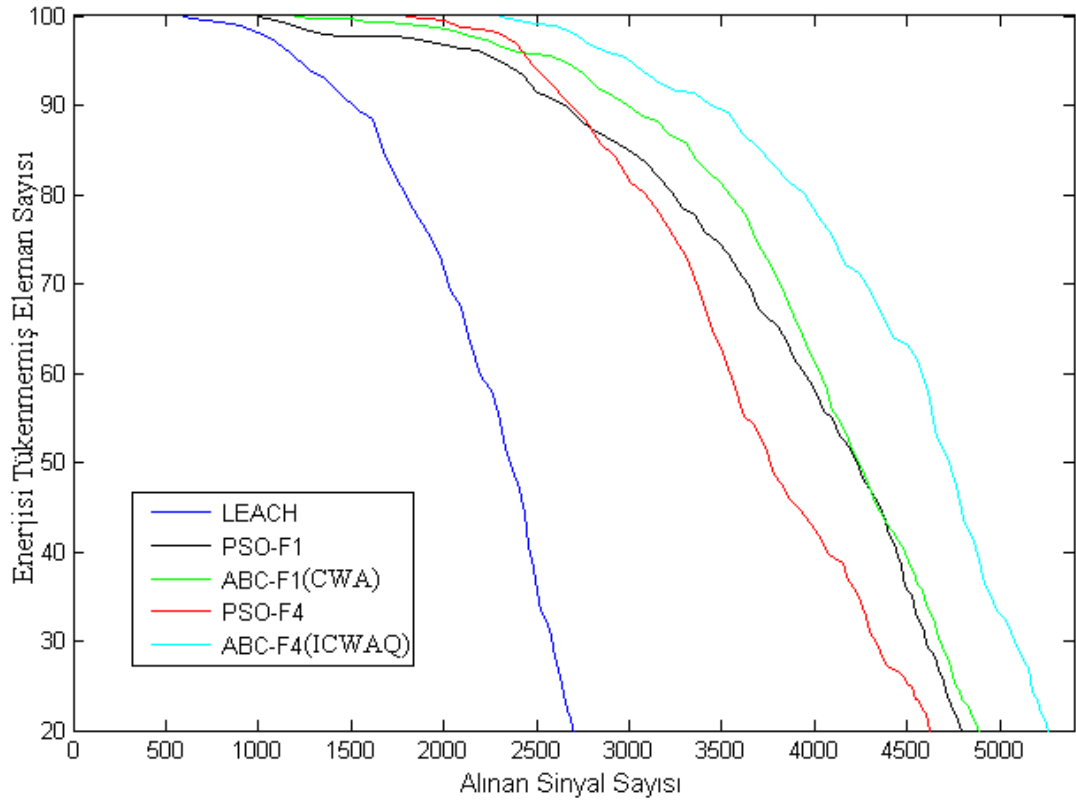
Şekil 6.16. Farklı  $\delta$  değerleri için ağ üzerinde kalan enerji



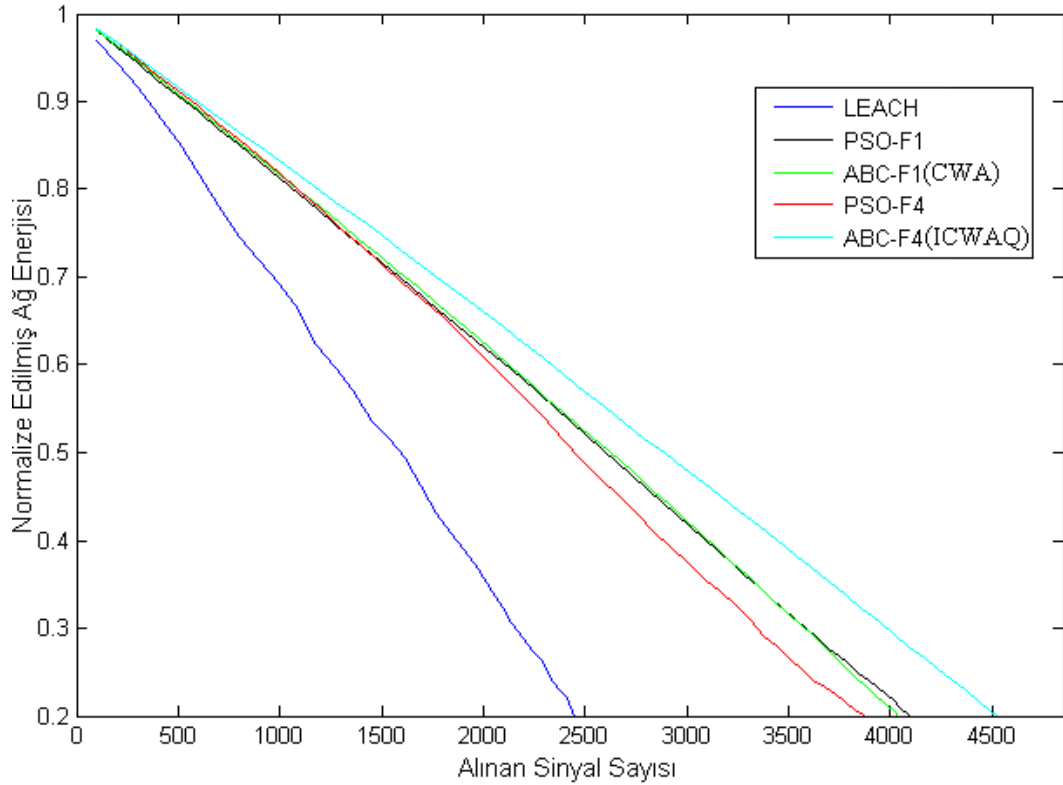
Şekil 6.17. Farklı  $\delta$  değerleri için alınan sinyal sayısına göre geçen süre

Şekil 6.19’da ağ üzerinde kalan enerjiye göre alınan sinyal sayısı grafik üzerinde gösterilmiştir. ICWAQ protokolünün başarısı bu grafik üzerinden de görülmektedir. ICWAQ’ nün başarısı özellikle ağ enerjisinin giderek azalmaya başladığı bölgelerde daha da belirginleşmektedir. Bu durum ağın enerjisi tamamen tükenene kadar protokolün ağ enerjisini optimum seviyede kullanabildiğini göstermektedir. Performans artışı, Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanan ICWAQ protokolünün hayatta kalan algılayıcı eleman sayısını artırarak ağ üzerindeki enerjinin daha tasarruflu kullanılmasıyla elde edilmiştir.

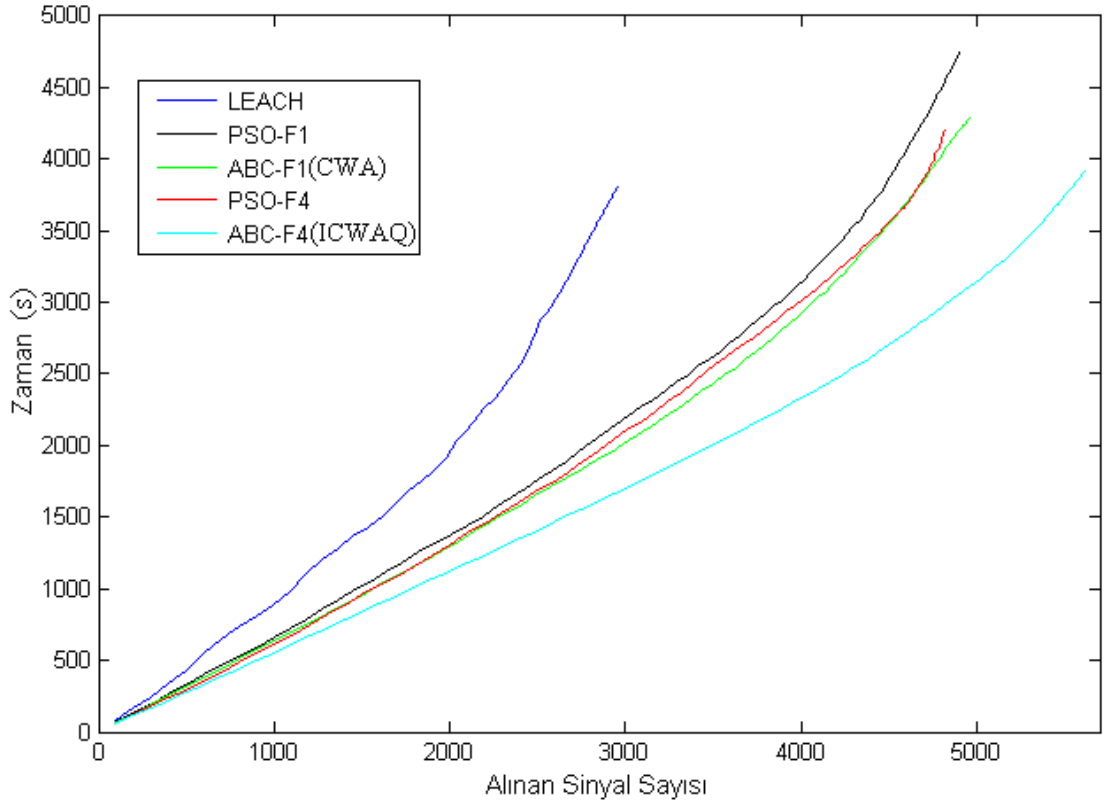
Servis kalitesi dikkate alındığında  $\delta$  parametresinin 0,5 değerinde en kötü sonucu verdiği Şekil 6.17’de görülmektedir.



Şekil 6.18. Farklı protokoller için ağ üzerinde enerjisi tükenmemiş eleman sayısı



Şekil 6.19. Farklı protokoller için ağ üzerinde kalan enerji

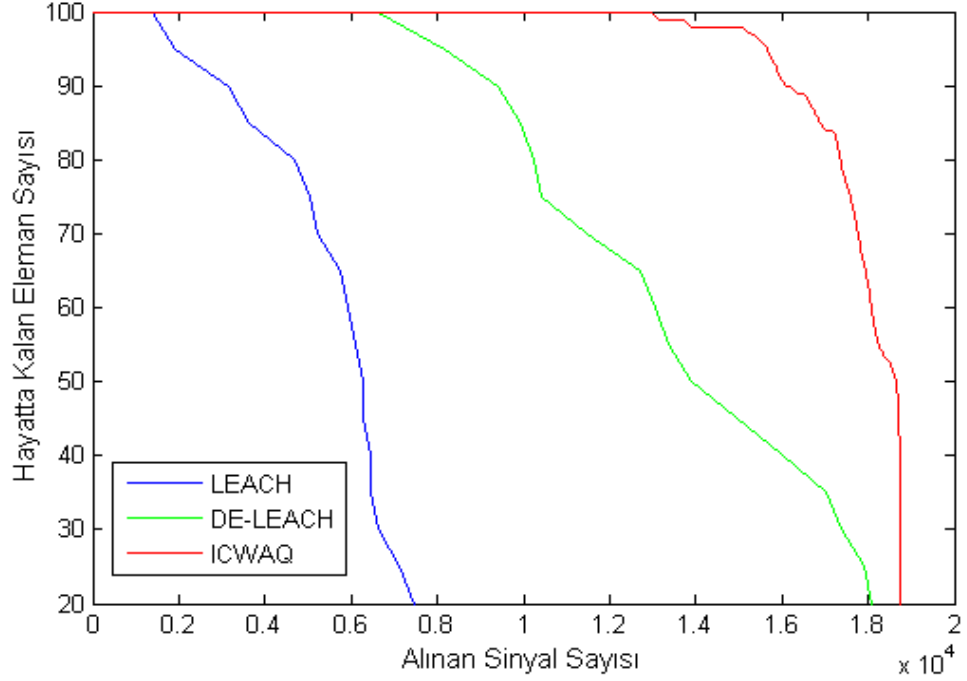


Şekil 6.20. Farklı protokoller için alınan sinyal sayısına göre geçen süre

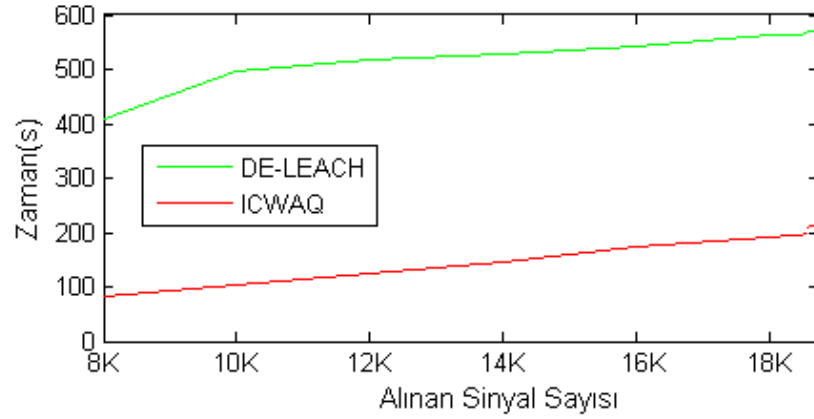
Şekil 6.20 en iyi performans sağlayan  $\delta$  değeriyle (daha önceden elde edilmiş değeri) çalıştırılan ICWAQ protokolünün servis kalitesini gösteren performans grafiğini vermektedir. Grafikten ICWAQ protokolünün diğer protokollere kıyasla daha kısa zamanda daha fazla sinyal alınmasını sağlayacak şekilde başarılı olduğu görülmektedir.

DE-LEACH protokolü Diferansiyel Gelişim (DG) algoritmasına dayalı geliştirilmiş bir yönlendirme metodudur [48]. Bu metodun başarısını ölçmek için referans alınan model ve algoritma için kullanılan parametre değerleri Bölüm 4’de verilmiştir. DE-LEACH protokolünün aynı şartlarda işletilen ICWAQ protokolü ile yapılan performans karşılaştırmaları Şekil 6.21 ve 6.22’de verilmiştir. Şekil 6.21’den ICWAQ protokolünün daha az eleman ölümünü sağlayacak şekilde ağ işleyişini devam ettirdiği görülmektedir. Ağ işleyişi süresince DE-LEACH protokolünün veri transferinde gereksinim duyduğu zamanın ICWAQ’ ye kıyasla daha fazla olduğu Şekil 6.22’de görülmektedir. Alınan sinyal sayılarına göre daha uzun ağ ömrünü gerçekleyen ICWAQ protokolü aynı zamanda daha kısa sürelerde daha fazla veri transferleri gerçekleştirmektedir. Şekil 6.22, ICWAQ ile sinyal alımındaki gecikmelerin DE-LEACH’e göre daha kısa

değerlerde tutulduğunu ve bu sayede daha başarılı servis kalitesinin elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 6.21. Alınan sinyal sayısına göre hayatta kalan eleman sayısı

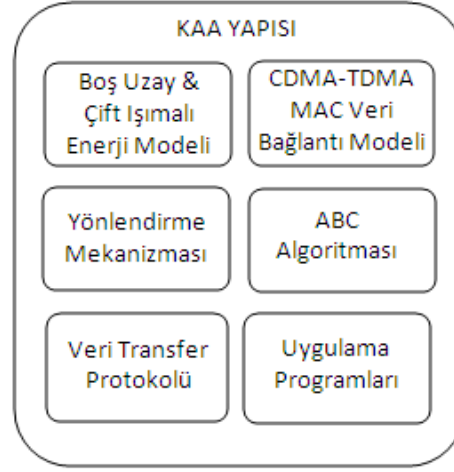


Şekil 6.22. ICWAQ ve DE-LEACH için alınan zaman grafikleri

## 6.2. Yönlendirme Protokollerin Karmaşıklık Analizi

Tez çalışmasında ele alınan KAA yapısının içerdiği temel birimler Şekil 6.23'de yer almaktadır. Bir KAA yapısı bu birimlerin birlikte işletilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu birimler özetle şu şeklide açıklanabilir: Boş uzay ve çift ışımalı modelde sinyaller,

iletim ortamı ve enerji eşitliklerinin elde edildiği fiziksel katmanı içermektedir. MAC veri bağlantı modeli fiziksel katmana erişmek ve kullanmak ile ilgili kuralları belirlemektedir. Verilere yönlendirme protokolünün belirlediği iletim yolunu içeren başlık bilgisi eklenerek paketler oluşturulmakta ve veri bağlantı modelinde kullanılan protokoller aracılığıyla bu paketler transfer edilmektedir. Yönlendirme mekanizması ile veri yolunun belirlenmesinde küme başkanlarından faydalanılmakta ve bu başkanların seçilmesi için ABC algoritması işletilmektedir. Veri transfer protokolü verilerin parçalara bölünmesi ve veri akışının kontrolünü gerçekleştiren birimdir. Uygulama programları ise KAA modeli ile kullanıcı arasında arabirim yazılımlarını içermektedir.



Şekil 6.23. KAA modelinin modülleri

KAA yapısında önerilen yönlendirme protokollerinin gerektirdiği tur zamanı fiziksel katmana, veri bağlantı modeline ve ABC algoritmasının işletildiği programa bağlı olmaktadır.  $\bar{x}$  tur zamanını belirleyen parametreleri içeren vektör olmak üzere  $f(\bar{x})$ , ağ üzerindeki elemanların verilerini küme başkanları aracılığı ile baz istasyonuna ulaştırmak için gerekli olan süreyi,  $g(\bar{x})$  ise protokolün işlevlerini yönlendiren merkezi algoritmanın baz istasyonunda işletilirken ihtiyaç duyulan süreyi temsil etmektedir. Algılayıcı elemanların verileri baz istasyonuna ulaştıktan sonra bir sonraki tura ait yeni konfigürasyon bilgisi ağa iletilmektedir. Dolayısıyla tur zamanı bitiminden önce merkezi algoritma konfigürasyon bilgisini oluşturmaktadır. Yani Eşitlik 6.20 ile verilen bağıntıyı sağlamaktadır. Kullanılan model için yapılan benzetim uygulamalarında  $n(\text{eleman sayısı}) > 85$ ,  $z(\text{küme sayısı}) < 8$ ,  $k(\text{bit sayısı}) > 16$ ,  $t(\text{periyot}) > 2,5 \cdot 10^{-6}$  için bu şartın gerçekleştiği gözlenmektedir (Şekil 6.24-6.25).

$$f(\vec{x}) \geq g(\vec{x}) \quad (6.20)$$

Benzetim sonuçlarının alınmasında [120] ve [121] nolu referanslarda verilen PSOt ve ABC Matlab Toolbox programları 2.4GHz PIV CPU işlemcili PC üzerinde çalıştırılmıştır. Tablo 6.2’de verilen parametre değerleri için işlem süresi  $g(\vec{x}) \in [3s, 4s]$  aralığında gerçekleşmektedir. Ağ üzerinde paralel olarak çalıştırılan  $f(\vec{x})$  ve  $g(\vec{x})$  fonksiyonları için Eşitlik 6.20’de verilen şart ile ihtiyaç duyulan süre  $f(\vec{x}) = \max(f(\vec{x}), g(\vec{x}))$  olmaktadır.  $k$ , adres bitlerinin sayısını ifade eden pozitif bir tamsayı ve  $t$  bir bitlik verinin iletim süresi olmak üzere bir paketi transfer etmek için gerekli süre Eşitlik 6.21’de verilmektedir. Eşitlikte transfer zamanı  $t$  ile doğru orantılı,  $k$  ile üstel olarak doğru orantılı olmaktadır.

$$f(\vec{x}) = f([k, t]) = t \cdot 2^k \quad (6.21)$$

Eşitlik 6.21 ile hesaplan süre iki adet parametreye bağlıdır. KAA yapısına bu eşitliği uyarlayacak olursak bu süreye etki eden diğer parametreleri de dikkate alınması gerekecektir. Bu durumda, küme içerisinde TDMA MAC ve baz istasyonu ile CSMA MAC (Model I) ile haberleşme yapan  $z$  adet küme içeren  $n$  elemanlı bir ağ yapısının transfer zamanı Eşitlik 6.22’de verildiği gibi olacaktır. Ağ içerisinde bir tur için gerekli olan transfer zamanı ( $T$ ) maksimum sayıda eleman içeren kümenin transfer zamanına eşittir. Ağ içerisinde maksimum transfer zamanını gerçekleştirecek şekilde bir küme en fazla  $(n-z)$  adet elemana, en az  $(n-z)/z$  elemana sahip olacaktır. Bu bilgiler ışığında bir tur için gerekli transfer zamanının minimum( $f^{\min}(\vec{x})$ ) ve maksimum( $f^{\max}(\vec{x})$ ) değerleri Eşitlik 6.22’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$f^{\min}(\vec{x}) = t \cdot 2^k \cdot \left( \frac{n-z}{z} + 1 \right), \quad f^{\max}(\vec{x}) = t \cdot 2^k \cdot (n-z+1). \quad (6.22)$$

Ağdaki eleman sayısının küme başkanı sayısına oranının büyük olduğu durumda ( $n \gg z$ )  $f^{\max}(\vec{x})$  sürelerini belirleyen Model I’e ait karmaşıklık fonksiyonu Eşitlik 6.23’de verilmektedir.

$$n \gg z \text{ olmak üzere } O(n, k, t) = t \cdot 2^k \cdot n \quad (6.23)$$

Önerilen ICWAQ protokolü için kullanılan modelde  $n=100$ ,  $z=5$ ,  $k=19$  ( $K=2^{19}=512\text{Kbit}$ ),  $t = 1/f = 1/(250\text{Kbit}/s) \cong 3.9\mu\text{s}$  parametre değerleri alınmaktadır. Verilen  $n$  ve  $z$  değerleri için maksimum küme eleman sayısı  $[19, 99]$  aralığında değerler almaktadır. Bu durumda bir tur için minimum ve maksimum transfer zamanları Eşitlik 6.22 kullanılarak sırayla 40,9s ve 196,3s olarak hesaplanır.

Ağ içerisinde gerçekleşen haberleşmeler TDMA MAC ile yapıldığında (Model II) transfer zamanı Eşitlik 6.24'de verildiği gibi olacaktır. Eşitlik 6.25'de ise FDMA (Frequency Division Multiple Access) MAC haberleşme modeli kullanıldığında (Model III) gerçekleşen transfer zamanı verilmektedir. Bu modelde farklı frekans kanallarından aynı anda iletilen veriler küme başkanları aracılığıyla 2 adımda baz istasyonuna ulaşmaktadır.

Model II için için tranfer zamanı,

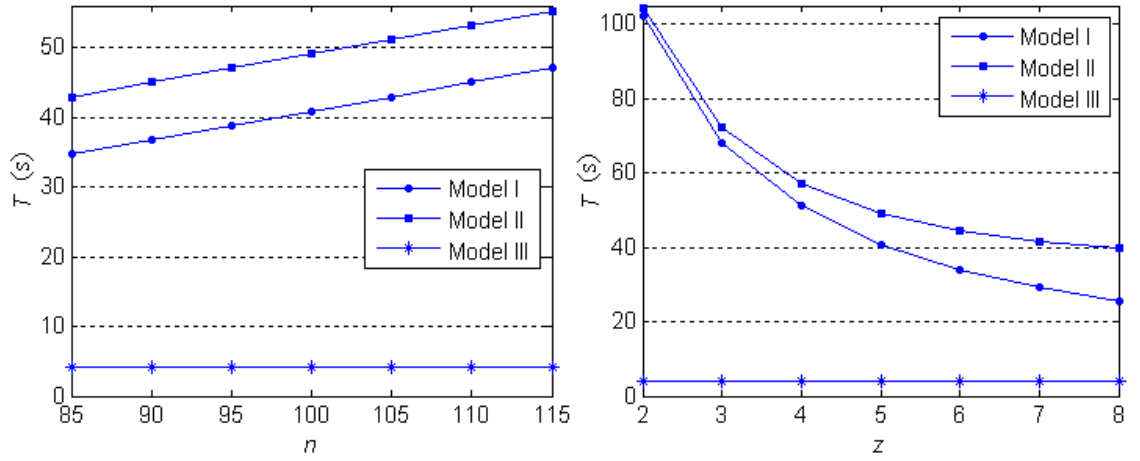
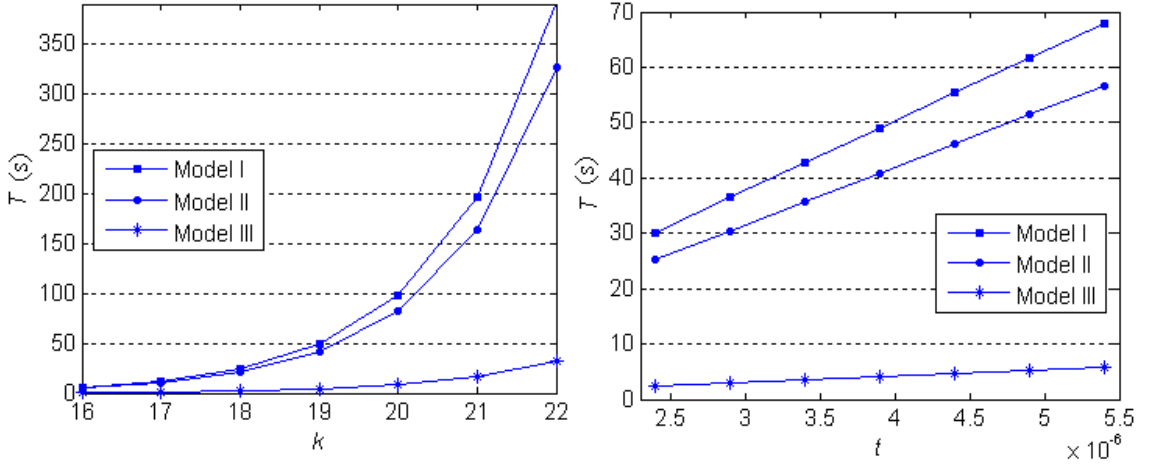
$$f^{\min}(\vec{x}) = t \cdot 2^k \cdot \left( \frac{n-z}{z} + z \right), \quad f^{\max}(\vec{x}) = t \cdot 2^k \cdot (n-z+1). \quad (6.24)$$

ile tanımlıdır ve Model III için için transfer zamanı,

$$f^{\min}(\vec{x}) = f^{\max}(\vec{x}) = t \cdot 2^k \cdot 2 \quad (6.25)$$

şeklinde tanımlıdır.

Şekil 6.24 ve 6.25'de  $k$ ,  $t$ ,  $n$  ve  $z$  komşuluğunda bahsedilen modellere ilişkin minimum transfer zamanlarını gösteren grafikler yer almaktadır. En iyi durumu gösteren minimum transfer zamanlarının elde edilmesi bütün kümeler eşit elemanlara sahip olduğunda gerçekleşmektedir. En kötü durum ise kümelerdeki eleman sayılarının maksimum düzeyde farklı olduğu duruma karşılık gelmektedir. Tablo 6.7'de kullanılan model için en iyi ve en kötü durumda gerçekleşen işlem zamanları yer almaktadır.

Şekil 6.24.  $n$  ve  $z$  komşuluğunda hesaplanan tur zamanlarıŞekil 6.25.  $k$  ve  $t$  komşuluğunda hesaplanan tur zamanları

Tablo 6.7. En İyi ve En Kötü durum analizi

|           | En İyi Durum(s) | En Kötü Durum(s) |
|-----------|-----------------|------------------|
| Model I   | 40,9            | 196,3            |
| Model II  | 49,1            | 196,3            |
| Model III | 4,1             | 4,1              |

Şekiller üzerinden alınan komşuluk değerlerinde önerilen protokoller için kullanılan Model II' nin Model I' den daha kısa transfer zamanını gerçekleştirdiği görülmektedir. FDMA haberleşmeyi kullanan Model III ise diğer iki modele kıyasla oldukça kısa

değerlerde transfer zamanı üretmektedir. Ancak çoklu kanal üzerinden iletişim gerçekleştirebilen FDMA haberleşmesi donanımsal yapı olarak diğer modellere kıyasla maliyetli bir çözüm olmaktadır.

### **6.3. Sonuç ve Değerlendirme**

Bu bölümde periyodik veri transferi yapan kümeleme tabanlı KAA yapıları için CWA, ICWA ve ICWAQ protokolleri geliştirilmiştir. Bu protokollerin diğer protokollerle performans karşılaştırmaları yapılmış ve sonuçlar grafiksel ortamda gösterilmiştir. Geliştirilen protokoller ağ ömrünü maksimumda tutacak şekilde servis kalitesini de dikkate alarak diğer protokollere kıyasla daha performanslı sonuçlar üretmiştir. Bunlara ilave olarak kullanılan KAA modelinin karmaşıklık analizine de yer verilmiştir.

## 7. BÖLÜM

### SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Tez çalışmasında, KAA yapılarına özgü ağ ömrünü maksimum yapmayı amaçlayan optimum yönlendirme protokolleri tasarlanmıştır. Bu protokoller, sürü zekasına dayalı optimizasyon tekniklerinden olan Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) ve Yapay Arı Koloni (ABC) algoritmalarına dayalıdır. Protokollerin oluşturulmasında, olay tabanlı KAA yapıları için KKO algoritması, periyodik veri transferi gerçekleştiren KAA yapıları için de ABC algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen protokollerin başarısı yaygın olarak bilinen benzer yapıdaki diğer protokollerle kıyaslanmış ve sonuçlar grafiklerle analiz edilmiştir. Protokollerin test işlemi için farklı ölçütlerden faydalanılmıştır. İstenilen ölçütlerde ve şartlarda farklı ağ senaryoları dahilinde test işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve sonuçların istenilen formatlara göre alınabilmesi için MATLAB platformunda bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. KAA uygulamalarının çok sayıda algılayıcı elemanı destekleyecek ölçüde yapılması gerekmektedir. Fazla eleman sayısına sahip KAA yapılarında, yönlendirme protokolleri üzerinde geliştirilen protokoller farklı senaryolar için test edilebilmektedir. Hazırlanan benzetim programıyla önerilen yaklaşımların bu yapılar için kullanılabilirliği ve performans sonuçları elde edilen test verilerine göre incelenebilmektedir.

Enerji tasarruflu etkin yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi KAA ağ yapılarının daha uzun ömürlü olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Birçok bilgisayar haberleşmesi uygulamalarında etkin çözümler sunan KKO algoritması, KAA'lara özgü

nitelikleri dikkate alarak geliştirilen uyarılama EARACO ve IEARACO protokolleri olarak adlandırılmıştır. Olay tabanlı KAA uygulamaları için geliştirilen EARACO ve IEARACO protokollerinin yapısı ve işleyişi açıklanmış, performans sonuçları alınmış ve farklı KKO tabanlı protokollerle karşılaştırılmıştır. Alınan test verilerinden bu protokollerin farklı yoğunluklardaki KAA yapılarında enerji tasarrufunda bulunarak etkin ve verimli sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.

Periyodik veri transferi gerçekleştiren KAA'lar olay tabanlı çalışan ağ yapılarından farklı veri aktarımı işleyişine sahip olmaktadır. Bu tür yapılarda kullanılan yönlendirme işlemleri için kümeleme teknikleri kullanarak ABC algoritmasına dayalı yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar CWA, ICWA ve ICWAQ protokolleri olarak isimlendirilmiştir. CWA protokolü, maksimum düzeyde ağ ömrünü sağlayacak şekilde enerji tasarrufunu dikkate almaktadır. ICWA protokolü, enerji tasarrufuyla birlikte ağ içerisinde yaşayan algılayıcı eleman sayısını da maksimumda tutacak şekilde geliştirilmiştir. ICWAQ protokolü ise enerji tasarrufunu, yaşayan eleman sayısını maksimumda tutmayı ve servis kalitesini artırmayı amaçlayacak ölçüde diğer protokoller üzerinde iyileştirmeler yapılarak oluşturulmuştur. Bu protokoller yaygın olarak kullanılan diğer protokollerle karşılaştırılmış ve test verileri ayrıntılı olarak şekiller üzerinde gösterilmiştir. Tablo 7.1'de KAA yapılarına ilişkin geliştirilen protokoller özetle yer almaktadır.

Tablo 7.1. KAA yapılarına özgü geliştirilen protokoller

| <b>KAA Yapısı</b>                                   | <b>Protokol</b>  |
|-----------------------------------------------------|------------------|
| Olay tabanlı KAA                                    | EARACO, IEARACO  |
| Periyodik veri transferi yapan kümeleme tabanlı KAA | CWA, ICWA, ICWAQ |

Alınan performans sonuçları geliştirilen protokollerin ağ enerjisini optimum seviyede kullanabildiğini göstermiştir. Performans artışı, ağ üzerindeki enerjinin daha tasarruflu kullanılması sağlanarak elde edilmiştir. Grafiklere dökülen test verilerinden önerilen protokollerin diğer protokollere kıyasla daha kısa zamanda daha fazla sinyal alınmasını sağlayacak şekilde başarılı olduğu görülmektedir. Tez çalışmasında son olarak, önerilen

protokollerin karmaşıklık analizi yapılmış ve işlem zamanları hesaplanmıştır. Sonuçlar farklı modeller üzerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

Geliştirilen protokollerin performansının diğer protokollerle karşılaştırılması esas alınmıştır. Ancak diğer protokollerin yapısına ilişkin ayrıntılı bilgi edinilmesi ve bu protokollerin performans sonuçlarının alınması tez çalışması süresince zorlanılan bir süreç olmuştur. Protokollere ilişkin çok sayıda kaynağın derlenmesi ve bu alanda çalışan diğer araştırmacıların deneyimlerinin paylaşılması ile bu güçlükler giderilmiştir.

Tez çalışması olay tabanlı ve periyodik veri aktarımı kullanan KAA yapıları için geliştirilen yönlendirme metotlarını içermektedir. Bu metotlar sabit bir baz istasyonu ve çok sayıda sabit algılayıcı elemanların bulunduğu ağ yapıları için oluşturulmuştur. Birden çok sayıda baz istasyonu ve hareketli algılayıcı yapılar içeren KAA'lar için yönlendirme protokolleri planlanan gelecek çalışmalarımız içerisinde yer almaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Akyildiz, I., Su, W., and etc., Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks, Elsevier, 2002.
2. Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D., Wireless sensor network survey, Computer Networks, Elsevier, 2008.
3. Cerpa, A., and etc, Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology, ACM SIGCOMM'2000, Costa Rica, 2001.
4. Halweil, B., Study finds modern farming is costly, World Watch, 14(1), 9–10, 2001.
5. Jaikao, C., and etc, Diagnosis of sensor networks, IEEE International Conference on Communications ICC'01, Helsinki, Finland, 2001.
6. Kahn, J., Katz, R., Pister, K., Next century challenges: mobile networking for smart dust, Proceedings of the ACM MobiCom'99, 271–278, Washington, USA, 1999.
7. Mohammad I. and Imad M., Handbook of Sensor Networks: compact wireless and wired sensing systems, CRC Press, ISBN:0-8493-1968-4, London, 117-140, 2005.
8. Yu, L., Wang, N., Meng, X., Real-time forest fire detection with wireless sensor networks, International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 1214 - 1217, 2005.
9. Youssef, M., and etc, A Novel Earthquake Warning System Based on Virtual MIMO-Wireless Sensor Networks, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE 2007, 932 - 935, 2007.
10. Ferreira, A., Goldman, A., Monteiro, J., Performance evaluation of routing protocols for MANETs with known connectivity patterns using evolving graphs, Wireless Networks, 16(3), 627-640, 2010.
11. Wireless Sensornets Laboratory, Department of Computer Science, Western Michigan University, <http://www.cs.wmich.edu/wsn/>, 2010.
12. Abbasi, A., Younis, M., A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks, Computer Communications, Elsevier, 2007.
13. Akkaya, K., Younis, M., A survey on routing protocols for wireless sensor networks, Ad Hoc Networks, Elsevier, 2005.

14. Dorigo, M., Ant Colony Optimization, <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/ACO.html>, 2009.
15. Karaboga, D., Basturk, B., On The Performance Of Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Applied Soft Computing*, Volume 8, (1), 687-697, 2008.
16. Chung C.M., Ying-Hong W., Chih-Chieh C., Ad hoc on-demand backup node setup routing protocol, 15th International Conference on Information Networking, Proceedings, 933 – 937, 2001.
17. Ökdem, S. ve Karaboğa, D., Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Yönlendirme, *Akademik Bilişim' 07*, Dumlupınar Üniversitesi, KÜTAHYA, 31 Ocak–2 Şubat 2007.
18. Bulusu N., Heidemann J., and Estrin D., GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, Technical report 00-729, Computer Science Department, University of Southern California, 2000.
19. Savvides A., Han C., and Srivastava M., Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors, *Proc. 7th ACM Annu. Int. Conf. Mobile Computing Networking MobiCom*), 166-179, July 2001.
20. Karaboğa D. ve Ökdem, S., Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Güvenli İletişim Teknikleri, *Ulusal Elektronik İmza Sempozyumu*, Ankara, 07-08 Aralık 2006.
21. Lin R., Wang Z., Sun Y., Energy Efficient Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks and Its State-of-Art, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1, 669 – 674, 2004.
22. Hedetniemi S. and Liestman, A., A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks, *Networks*, 18, 1988.
23. Marechal, N., Pierrot, J.-B., Gorce, J.-M., Fine Synchronization for Wireless Sensor Networks Using Gossip Averaging Algorithms, *IEEE International Conference on Communications*, 2008. ICC '08, 4963 - 4967 , 2008.
24. Intanagonwiwat C., Govindan R., and D. Estrin, Directed diffusion for wireless sensor networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, 11(1), 2–16, 2003.
25. Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H., Energy-Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks, *Proc. Hawaaiian Int'l Conf. on Systems Science*, January 2000.
26. Heinzelman, W., Application specific protocol architectures for wireless networks, PhD Thesis, MIT, 2000.

27. Lindsey, S., Raghavendra, C., Pegasus: Power-efficient gathering in sensor networks, Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 3, 9-16, 2002.
28. Huang, Y., Wang, N., and Chen, M., Performance of a Hierarchical Cluster-Based Wireless Sensor Network, Sensor Networks, IEEE International Conference on Ubiquitous and Trustworthy Computing, 2008. SUTC '08, 349-354, 2008.
29. Heinzelman W., Kulik J., and Balakrishnan H., Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conf. (MobiCom'99), 174-185, August 1999.
30. Kulik J., Heinzelman W., and Balakrishnan H., Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks, Wireless Networks, 8, 169–185, 2002
31. Tillett J., Rao R., Sahin F., Cluster-head identification in ad hoc sensor networks using particle swarm optimization, Personal Wireless Communications, IEEE International Conference, 201 – 205, 2002.
32. Heinzelman W. Chandrakasan A. And Balakrishnan H., An Application-Specific Architecture for Wireless Microsensor Networks, To appear: IEEE Transactions on Wireless Communications.
33. Ganesan D., Govindan R., Shenker S., and Estrin D., Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks, ACM SIGMOBILE Mobile Computing Commun. Rev., 5(4), 10–24, October 2001.
34. Chang J. and Tassiulas L., Maximum lifetime routing in wireless sensor networks, Proc. Adv. Telecommun. Inf. Distribution Res. Program (ATIRP2000), College Park, MD, March 2000.
35. Niannian D., Liu, P.X., Chao H., Data Gathering Communication in Wireless Sensor Networks Using Ant Colony Optimization, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 697–702, 2005.
36. Singh, G., Das, S. Gosavi, S., Pujar, S., Ant Colony Algorithms for Steiner Trees: An Application to Routing in Sensor Networks, Recent Developments in Biologically Inspired Computing, Eds., Idea Group Publishing, 181-206, 2004.
37. Zhang, Y., Kuhn, L., Fromherz, M., Improvements on Ant Routing for Sensor Networks, In: Ants 2004 Int. Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, 154-165, 2004.

38. Camilo, T., Carreto, C., Silva, J., Boavida, F., An Energy-Efficient Ant Base Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks, ANTS 2006 - Fifth International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Springer – LCNS series, 4150, 49-59, 2006.
39. Karaboga, D., Okdem, S., Ozturk, C., Cluster Based Wireless Sensor Network Routings using Artificial Bee Colony Algorithm, AIS 2010 - International Conference on Autonomous and Intelligent Systems, June 21-23, Portugal, 2010.
40. Latiff, N.M.A., Sharif, B.S., Performance Comparison of Optimization Algorithms for Clustering in Wireless Sensor Networks, IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Italy, 2007.
41. Yao, Y., and Gehrke, J., The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, in SIGMOD Record, September 2002.
42. Braginsky D., and Estrin, D., Rumor Routing Algorithm For Sensor Networks, International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'01), November 2001.
43. F.Ye, A. Chen, S. Liu, L. Zhang, A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks, Proceedings of the tenth International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 304-309, 2001.
44. Schurgers, C., and Srivastava, M.B., Energy efficient routing in wireless sensor networks", in the MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.
45. Chu, M., Haussecker, H., and Zhao, F., Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for Ad Hoc Heterogeneous Sensor Networks," The International Journal of High Performance Computing Applications, Vol. 16, No. 3, August 2002.
46. Manjeshwar A., and Agarwal, D. P., APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks, Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, IPDPS, 195-202, 2002.
47. Hussain, S., Matin, A., and Islam, O., Genetic algorithm for energy efficient clusters in wireless sensor networks, In Proceedings of the 4th International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG), IEEE Computer Society, Las Vegas, April 2-4, 2007.

48. Xiaofang, L., and etc., A Differential Evolution-Based Routing Algorithm for Environmental Monitoring Wireless Sensor Networks, *Sensors* 2010, 10(6), 5425-5442, 2010.
49. Rahul, C., Rabaey, J., Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 350-355, 1, 17-21, Orlando, 2002.
50. Subramanian L., and Katz, R. H., An Architecture for Building Self Configurable Systems, in the *Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Boston, MA, August 2000.
51. Okdem, S. and Karaboga, D., "Routing in Wireless Sensor Networks Using Ant Colony Optimization", *Proc. 1st NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*, 401-404, Istanbul, June 2006.
52. Okdem, S., Karaboga, D., Routing in Wireless Sensor Networks Using an Ant Colony Optimization (ACO) Router Chip, *Sensors*, 9, 909-921, 2009.
53. Karaboga, D., ve Okdem, S., Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Karınca Koloni Optimizasyonu Kullanılarak Yapılan Optimum Yönlendirme İşlemi, ISBN: 978-9944-89-886-7, 323-330, 12. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 23-26 Aralık 2009.
54. Goodman D., *Wireless Personal Communications Systems*. Reading, MA: Addison-Wesley, Reading, MA, 1997.
55. Raghunathan, V., and etc., Energy-aware wireless microsensor networks, *Signal Processing Magazine, IEEE*, ISSN: 1053-5888, 40-50, 2(19), 2002.
56. Wood, A. D., and Stankovic, J. A., "Denial of Service in Sensor Networks", *Computer*, 35(10), 54-62, 2002.
57. Wood, A. D., Stankovic, J. A., and Son, S. H., "JAM: A Jammed-Area Mapping Service for Sensor Networks", *24th IEEE Real-Time Systems Symposium*, 286-297, 2003.
58. Poisel, R.A., *Modern Communications Jamming Principles and Techniques*, Artech House Publishers, 259-307, 2006.
59. Strasser, M., Capkun, S., Popper, C., Cagalj, M., Jamming-resistant Key Establishment using Uncoordinated Frequency Hopping, *IEEE Symposium on Security and Privacy*, 64-78, 2008.

60. Pathan, A., Hyung-Woo L., Choong S. H., Security in wireless sensor networks: issues and challenges, The 8th International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT, 2, 20-22, 2006.
61. Canbek, G., ve Sağiroğlu, Ş., Bilgisayar Sistemlerine Yapılan Saldırıları ve Türleri: Bir İnceleme, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23(1-2), 1-12, 2007.
62. Niculescu, D., Communication paradigms for sensor Networks, IEEE Communications Magazine, 43(3), 116-122, 2005.
63. Karlof, C., and Wagner, D., Secure routing in wireless sensor networks: Attacks and countermeasures, Elsevier's Ad Hoc Network Journal, Special Issue on Sensor Network Applications and Protocols, 293-315, 2003.
64. Hamid, M. A., Rashid, M-O., and Hong, C. S., Routing Security in Sensor Network: Hello Flood Attack and Defense, IEEE ICNEWS'06, Dhaka, 2-4 January 2006.
65. Cagalj, M., Capkun, S., and Hubaux, J-P., Wormhole-based Anti-Jamming Techniques in Sensor Networks, <http://icawww.epfl.ch/Publications/Cagalj/CagaljCH05-worm.pdf>, 2006.
66. Bandırmalı, N., Ertürk, İ., Yeni Bir Kablosuz Algılayıcı Ağ Veri Bağ Katmanı Güvenlik Protokolü, Politeknik Dergisi, 12(4), 2009.
67. Ünal, M., Akçayol M.A., Kablosuz Ağlarda Güvenli Yönlendirme Protokolleri, Bilişim Teknolojileri Dergisi, 1(3), 2008.
68. Tomur, E., Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Güvenlik ve Servis Kalitesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2008.
69. Ozdemir, S., Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Networks via Homomorphic Encryption, (manuscript in Turkish), Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 23(2), 365-373, 2008.
70. Cisco Networking Academy, Cisco Systems Inc., Network Fundamentals, CCNA Exploration, <http://cisco.netacad.net>, 2008.
71. ITU/BIDB Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, OSI Katmanları, Ağ Derlemeleri, <http://www.bidb.itu.edu.tr>, 2008.
72. Information Sciences Institute, University of Southern California, "The Network Simulator ns-2: Tips and Statistical Data for Running Large Simulations in NS", <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-largesim.html>, 2008.

73. Zeng, X., Bagrodia, R., Gerla, M., GloMoSim: a Library for Parallel Simulation of Large-scale Wireless Networks, Proceedings of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulations -- PADS '98, Alberta, Canada, May 26-29, 1998.
74. Ptolemy Project Group, Heterogeneous Modelling and Design, UC Berkeley, EECS, <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu>, 2008.
75. Bajaj, L., Takai, M., Ahuja, R., Tang, K., Bagrodia, R., and Gerla, M., GloMoSim: A scalable network simulation environment, Technical Report 990027, Computer Science Department, University of California, Los Angeles, May 1999.
76. PARSEC Research Group, PARSEC, UCLA Parallel Computing Laboratory, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/parsec>, 2008.
77. OPNET Researchers and Developers, OPNET Simulator Platform, OPNET Technologies, Inc., <http://www.opnet.com/>, 2008.
78. Keshav, S., REAL: A network simulator. Technical Report 88/472, University of California, Berkeley, 1988.
79. Monarch Research Group, Monarch Project, Rice University, Computer Science Department, <http://www.monarch.cs.rice.edu/>, 2008.
80. Park, S., Savvides, A., and Srivastava, M., SensorSim: A simulation framework for sensor Networks, In Proc. of the ACM international Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, 2000.
81. Park, S., Savvides, A., and Srivastava, A., Simulating networks of wireless sensors. In Proc. of the 2001 Winter simulation Conference, 2000.
82. TOSSIM Research Group, TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications, UC Berkeley – Computer Science Division, 2003.
83. Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D., Pister, K. S., System architecture directions for networked sensors, In Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, 93–104, Boston, MA, USA, Nov. 2000.
84. Simon, G., Volgyesi, P., Maroti, M., Ledeczi, A., Simulation-based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks, Proc. of the IEEE Aerospace Conference, March 2003.
85. Rappaport, T., Wireless Communications: Principles & Practice, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996.

86. Zeng, X., Bagrodia, R., Gerla, M., Glomosim - Global Mobile System Simulator, <http://www.ccs.neu.edu/course/csg250/Glomosim/glomoman.pdf>, 2010.
87. Smithgall, D., Toward the 60 gm. Wireless Phone, In Proceedings of the 1998 Radio and Wireless Conference – RAWCON-98, 157-159, August 1998.
88. Holland, J.H., Adaption in Natural and Artificial Systems, MAMIT Press, Cambridge, 1975.
89. Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company Inc.ISBN:0-201-15767-5, 1989.
90. Dorigo, M., Di Caro, G. and Gambardella, L.M., Ant Algorithms for Discrete Optimization. *Artificial Life*, 5(2), 137-172, 1999.
91. Dorigo, M., and Di Caro, G., Ant colony optimization a new meta-heuristic, *Congress on Evolutionary Computation*, 1470-1477, July 6-9, 1999.
92. Okdem, S., Disk Planlama İçin Karınca Koloni Algoritmasına Dayalı Yeni bir Metod, Master tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri/Türkiye, 2003.
93. Kennedy, J. and Eberhart, R. C. Particle Swarm Optimization. *Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks*,. (4), 1942-1948, Piscataway, 1995.
94. Xiaohui, H., Particle Swarm Optimization, [www.swarmintelligence.org/ index.php](http://www.swarmintelligence.org/index.php), 2009.
95. Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G., *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York, NY: Oxford University Press, 1999.
96. Karaboga, D., Artificial Bee Colony Algorithm, *Scholarpedia*, 5(3):6915, [http://www.scholarpedia.org/article/Artificial\\_bee\\_colony\\_algorithm](http://www.scholarpedia.org/article/Artificial_bee_colony_algorithm), 2010.
97. Karaboga, D., An Idea Based On Honey Bee Swarm For Numerical Optimization, Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
98. Karaboga, D., Akay, B., A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*, 39, 459-471, 2007.
99. Storn, R., Differential Evolution, A Simple and Efficient Heuristic Strategy for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal Of Global Optimization*, (11), 341-359, 1997.

100. Karaboga D. and Okdem S., A Simple And Global Optimization Algorithm For Engineering Problems: Differential Evolution Algorithm, *Elektrik, Turkish Journal of Electrical & Computer Sciences*, (12), 1, ISSN 1300-0632, 53-60, 2004.
101. Karaboga, D., *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Nobel Yayınevi, Ankara, 2004.
102. Liang Y., Yu, H., PSO-Based Energy Efficient Gathering in Sensor Networks, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3794/2005, 362-369, 2005.
103. Al-Karaki, J.N., Kamal, A.E., Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey. *Wireless Communications, IEEE*, 11, 6-28, 2004.
104. Raghavendra C. S., M. S. Krishna, and Znati T., *Wireless Sensor Networks*, An Edited Book, Kluwer Academic Publishers, ISBN: 1-4020-7883-8, 2004.
105. Blum C., and Dorigo M., Search Bias in Ant Colony Optimization: On the Role of Competition-Balanced Systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9(2):159-174, 2005.
106. Merkle D., and Middendorf M., Modelling the Dynamics of Ant Colony Optimization Algorithms. *Evolutionary Computation*, 10(3): 235-262, 2002.
107. Gutjahr W.J., Mathematical Runtime Analysis of ACO Algorithms: Survey on an Emerging Issue. *Swarm Intelligence*, 1(1), 2007.
108. White, T., Pagurek, B., Toward Multi-Swarm Problem Solving in Networks, 3rd Int. Conf. Multi-Agent Syst., 333–340, 1998.
109. Liu, Z., Kwiatkowska, M.Z, Constantinou, C., A Biologically Inspired QoS Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks., *Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl.*, 426–431, 2005.
110. Schoonderwoerd, R., Holland, O., Bruten, J., Rothkrantz, L., Ant-based Load Balancing in Telecommunications Networks, *Adapt. Behavior*, 5(2), 169–207, 1996.
111. Dorigo, M., *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, Ph.D. thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
112. Crossbow Technology, Inc. “MICAz module datasheet”, [www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/MICAz\\_Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.pdf), 2009.
113. Labcenter Electronics. Proteus Simulation Platform, <http://www.labcenter.co.uk>, 2006.

114. Spurgeon, C., Ethernet: the definitive guide, O'Reilly Series On Designing And Managing Local Area Networks, ISBN:1-56592-660-9,1-498,2000.
115. Plummer, D., Ethernet Address Resolution Protocol: Or converting network protocol addresses to 48.bit Ethernet address for transmission on Ethernet hardware, DSpace at Cambridge (United Kingdom), [www.dspace.cam.ac.uk/handle/1810/13682](http://www.dspace.cam.ac.uk/handle/1810/13682), 2010.
116. Wikipedia, Ethernet, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet>, 2010.
117. GPI International Ltd., Battery Catalog, [www.gpbatteries.com/pic/CR1216\\_DS.pdf](http://www.gpbatteries.com/pic/CR1216_DS.pdf), 2010.
118. GPI International Ltd., Battery Catalog, [www.gpbatteries.com/pic/GPCR1220\\_DS.pdf](http://www.gpbatteries.com/pic/GPCR1220_DS.pdf), 2010.
119. Crossbow Technology, MICAz Datasheet, [www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/MICAz\\_Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.pdf), 2010.
120. Birge, B., PSOt, A Particle Swarm Optimization Toolbox for Matlab, IEEE Swarm Intelligence Symposium Proceedings, April 2003.
121. Karaboga, D., Basturk, B., ABC, Artificial Bee Colony Algorithm Matlab Toolbox, version 2, accessed on <http://bm.erciyes.edu.tr/abc.htm>, accessed in June 2010.

## ÖZGEÇMİŞ

Selçuk Ökdem Sivas'ın Gemerek ilçesi Arpaözü köyünde 1977 yılında doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri'de Fatih İlkokulu ve İbrahim Yüzbaşıoğlu Ortaokulu'nda, lise öğrenimini ise Erzurum Fen Lisesi'nde tamamladı. 1995 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde bir yıllık yabancı dil hazırlık döneminden sonra lisans öğrenimine başladı. 2001 yılında bilgisayar mühendisi ünvanını alarak ilgili bölümden mezun oldu ve aynı yıl içerisinde Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2003 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimini tamamlayan Selçuk ÖKDEM halen Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

### İletişim Bilgileri

**Adres:** Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
38039 Melikgazi/KAYSERİ/TÜRKİYE

**Tel:** (0 352) 437 49 01 – 32527

**E-mail:** okdem@erciyes.edu.tr