

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA YAŞAM SÜRESİ
ENBÜYÜKLEMESİ İÇİN GEZGİN BAZ İSTASYONU
KONUMLANDIRMA ENİYİLEMESİ

ÖMER ÇAYIRPUNAR

DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2015
ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin bütün gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Erdoğan DOĞDU
Anabilim Dalı Başkanı

Ömer ÇAYIRPUNAR tarafından hazırlanan KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA YAŞAM SÜRESİ ENBÜYÜKLEMESİ İÇİN GEZGİN BAZ İSTASYONU KONUMLANDIRMA ENİYİLEMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Esra KADIOĞLU ÜRTİŞ
Birinci Tez Danışmanı

Doç. Dr. Bülent TAVLI
İkinci Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Tansel ÖZYER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Esra KADIOĞLU ÜRTİŞ

Üye : Doç. Dr. Bülent TAVLI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Enver ÇAVUŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet EFE ÖZBEK

TEZ BİLDİRİMİ

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

Ömer ÇAYIRPUNAR

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Bilgisayar Mühendisliği
Birinci Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Esra KADIOĞLU ÜRTİŞ
İkinci Tez Danışmanı : Doç. Dr. Bülent TAVLI
Tez Türü ve Tarihi : Doktora – Ağustos 2015

Ömer ÇAYIRPUNAR

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA YAŞAM SÜRESİ
ENBÜYÜKLEMESİ İÇİN GEZGİN BAZ İSTASYONU
KONUMLANDIRMA ENİYİLEMESİ

ÖZET

Her geçen gün yeni kullanım alanları ortaya çıkan kablosuz algılayıcı ağlar(KAA) yüksek sayıda algılayıcı düğümün genellikle belirli bir alanı izleme ve üzerinde taşıdığı algılayıcılar aracılığı ile çevresinden veri toplama amacıyla kullanıldığı tasarsız ağlardır. Bunu mümkün kılan en önemli etkenler ise hiç şüphesiz yarı iletken, radyo haberleşmesi, ağ ve malzeme bilimi teknolojilerindeki yenilikler ve gelişmeler sayesinde üretim ve maliyet ile ilgili kısıtların kalkması ve dolayısıyla algılayıcı düğümlerin uygun maliyetle çok sayıda üretilip kullanılabilmesi olmuştur.

KAA'da algılayıcı düğümler, yapıları itibariyle genellikle kısıtlı kaynaklara (enerji, haberleşme mesafesi, bant genişliği, hesaplama gücü ve bellek miktarı gibi) sahiptir. Fakat başlangıçtaki enerji miktarı bu kaynaklar arasından en kritik olanı haline gelmiştir. Bu nedenle KAA'da algılayıcı düğümlerin enerji gereksinimlerinin mümkün olduğunca düşük seviyede tutulması en önemli tasarım gereksinimi olmuştur. Dolayısıyla, kablosuz algılayıcı ağlar konusunda günümüze kadar yapılan çalışmalar, harcanan enerjiyi düşürerek, diğer bir deyişle daha enerji verimli çözümler üreterek ağ yaşam süresini arttırmak konusunda yoğunluk kazanmıştır. KAA'da baz istasyonu konumu ağın yaşam süresinde önemli bir etkiye sahiptir ve ağın yaşam süresi algılayıcı düğümlerin yapmış oldukları toplam enerji harcaması ile ters orantılı olarak değişiklik göstermektedir. Çok atlamalı bir haberleşme üzerinden verilerin statik konumlu bir baz istasyonuna aktarılması ile enerji dengelenmesi ve ağ ömründe bir miktar iyileşme sağlanabilmesine rağmen baz istas-

yonuna yakın konumda bulunan düğümler genellikle yoğun-bölge problemi olarak bilinen bir problem sebebiyle enerjilerini düzensiz bir biçimde harcamaktadırlar. Bu düzensizlik nedeniyle de ağ ömründe istenmeyen düşüşler gözlemlenmektedir. Literatürde yoğun-bölge problemi nedeniyle ortaya çıkan bu düzensiz enerji dağılımını gidermek amacıyla gezgin baz istasyonu modeli öne sürülmüştür. Fakat, gezgin baz istasyonunun belirli ağ yapılarında ağ ömrünü önemli ölçüde uzatmasına rağmen bu artışın hareketli tek bir alıcı ile oldukça sınırlı olduğu gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise gezgin bir baz istasyonunun farklı hareket örüntüleri kullanıldığında enerji dağılımına olan etkisi hakkında daha fazla fikir edinilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca eniyilenmiş bir baz istasyonu hareket modeli geliştirilmiş ve bu modelin başarımı bilinegelen hareket örüntüleri ile (rastgele, ızgara ve spiral) karşılaştırılmıştır. Ek olarak yine bu çalışmada eniyilenmiş çoklu gezgin baz istasyonu modeli geliştirilerek alınan sonuçların yoğun-bölge problemine ve enerji dağılımına olan etkilerine daha fazla ışık tutulması amaçlanmıştır. Son olarak, bu çalışmada çoklu gezgin baz istasyonu modeli ile çoklu sabit baz istasyonu modeli arasında bir karşılaştırma yapılarak ikisi arasındaki ödünleşim incelenmiştir. Çalışmalarda en iyi baz istasyonu konumlandırması için özgün bir Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama(KTDP) çerçevesi oluşturulmuştur. Bu model geniş bir parametre uzayında çözdürülerek gezgin baz istasyonu kullanımının ağ yaşam süresine etkileri nitelendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: kablosuz algılayıcı ağlar, gezgin baz istasyonu, baz istasyonu konumlandırma eniyilemesi, hareket örüntüleri, çok baz istasyonlu ağlar, tamsayı programlama, gezgin robotlar.

University : TOBB University of Economics and
Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Computer Engineering
First Supervisor : Asst. Prof. Esra KADIOĞLU ÜRTİŞ
Second Supervisor : Assoc. Prof. Bülent TAVLI
Degree Awarded and Date : Ph.D. – August 2015

Ömer ÇAYIRPUNAR

**MOBILE BASE STATION POSITION OPTIMIZATION FOR
NETWORK LIFETIME MAXIMIZATION IN WIRELESS SENSOR
NETWORKS**

ABSTRACT

The success of widespread deployment of and associated research efforts on the Wireless Sensor Networks (WSNs) is undisputed. Yet, there is still room for exploring and improving many aspects of WSNs as well as fully grasping intricate performance related details of some less-than-completely charted topics. WSNs are ad-hoc networks usually used for monitoring a particular area by a large number of sensor nodes. The most important factor making this possible is indisputably the removal of restrictions on the production costs of the sensor nodes in high quantities due to the help of innovations and developments in semiconductor technologies, wireless communications, networking and materials science.

In WSNs sensor nodes usually have limited resources such as energy, communication distance, bandwidth, computing power and memory size. After the limitations related to the cost and hardware are met by the progress on semiconductor, network, and materials science; energy becomes the most critical resource for WSNs. Therefore, as one of the most crucial design goals of WSNs, network lifetime maximization through efficient utilization of energy is quite necessary. Although it is understood that balancing the energy in multi-hop data relaying towards a static sink prolongs network lifetime, some nodes usually end up with dissipating their energy unevenly and suffer from a problem generally known as the hot-spot problem.

Base station position in WSNs has a significant impact on the network lifetime.

The network's lifetime is inversely proportional to the total energy spent in the sensor nodes. The energy consumption for the communication which forms the largest portion of this energy is directly related to the base station location in the network. Therefore, sink mobility has been proposed in the literature to mitigate the suboptimal energy dissipation and the hot-spot problem. Sink mobility increases the sensor network lifetime, significantly, in certain network configurations. However this increase is shown to be limited if only a single mobile sink is used.

In this study, our goal is to gain some more insight about the performance of base station mobility under different mobility patterns, to counter the sub-optimal energy dissipation. Also, an optimum base station mobility pattern is developed and the results are compared with the already known mobility routines such as grid, random, and spiral mobilities. Additionally, we develop a novel Mixed Integer Programming (MIP) framework to model and characterize achievable WSN lifetime trends for static and dynamic mobile sink trajectories. The effects of base station mobility on the network lifetime are characterized by solving the models within a wide parameter space. Our results shed more light into the energy efficiency characteristics of the optimal multiple sink mobility patterns, the efficacy of multiple sinks as opposed to a single one, and the tradeoff between static versus dynamic sink trajectories.

Keywords: wireless sensor networks, sink mobility, optimal sink location, mobility patterns, multi sink networks, integer programming, mobile robotics.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren kıymetli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Esra KADIOğLU ÜRTİŞ ve Doç. Dr. Bülent TAVLI'ya, yine önemli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi öğretim üyelerine, bana destek olan çalışma arkadaşlarıma, sayısal hesaplamalar için kaynaklarından faydalandığım TÜBİTAK UZAY Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'ne, sağladığı burs imkânları nedeniyle TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ve son olarak benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen eőim Zeynep'e, anneme ve babama teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvi
SEMBOL LİSTESİ	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi	5
1.2 Problem Tanımı	7
1.3 Sınırlılıklar	7
1.4 Varsayımlar	7
1.5 Katkılar	9
2 İLGİLİ LİTERATÜR	11
3 KAVRAMSAL ÇERÇEVE	16
3.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlar	16
3.1.1 Kablosuz Algılayıcı Ağ Kullanım Alanları	18
3.1.2 Kablosuz Algılayıcı Düğüm Donanım Bileşenleri	19
3.1.3 Kablosuz Algılayıcı Ağ Kullanımı Avantajları	25
3.1.4 Kablosuz Algılayıcı Ağ Kısıtları	27
3.1.5 Kablosuz Algılayıcı Ağ Çeşitleri	28
3.1.6 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Araştırmaya Açık Konular	29

3.2	Matematiksel Eniyileme	30
3.2.1	Doğrusal Programlama (DP)	31
3.2.2	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP)	34
3.3	Kullanılan Yazılım Ortamları	36
3.3.1	GAMS	36
3.3.2	MATLAB	36
4	SİSTEM MODELİ	38
4.1	Yaşam Süresi Modeli	39
4.2	Enerji Modeli	40
4.3	Hareket Örüntüleri	41
4.3.1	Rastgele Hareket Örüntüsü	43
4.3.2	Izgara Hareket Örüntüsü	43
4.3.3	Spiral Hareket Örüntüsü	44
4.3.4	Eniyilenmiş Gauss Dağılımlı Hareket Örüntüsü	46
5	MATEMATİKSEL MODEL	50
5.1	Gezgin Baz İstasyonu Hareket Modeli	51
5.1.1	Tek Gezgin Baz İstasyonu Hareket Modeli	52
5.1.2	Çoklu Gezgin Baz İstasyonu Hareket Modeli	54
5.2	Çoklu Sabit Konumlu Baz İstasyonu Hareket Modeli	56
6	BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER	59
7	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
	KAYNAKLAR	88
	EKLER	98
A	Kablosuz Algılayıcı Geliştirme Platformları	99
A.1	MICA2	99
A.2	MICAz	99
A.3	Telos B	100
A.4	IRIS 2.4GHz	101
A.5	IRIS OEM Edition	101
A.6	IMote 2.0	102
A.7	SunSPOT	103
A.8	CRICKET MCS410	103

A.9 Epic	105
ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Yoğun-bölge probleminin örnek bir gösterimi.	6
Şekil 2.1	KAA'da baz istasyonu tasarım alternatifleri.	12
Şekil 3.1	Deniz altı gözetimi için geliştirilmiş bir su altı KAA sistemi [6].	17
Şekil 3.2	Crossbow Firması tarafından geliştirilmiş olan Mica2 Mote KAA düğümü.	20
Şekil 3.3	Kablosuz algılayıcı düğüm bileşenleri.	21
Şekil 3.4	Örnek bir doğrusal programlama problemi için mümkün olabilecek olası çözüm bölgesi ve en yüksek kazanç noktası gösterimi.	34
Şekil 4.1	Gezgin baz istasyonu, algılayıcı düğümler ve duraklama noktalarını gösteren sistem modeli.	39
Şekil 4.2	Deneylerde kullanılan baz istasyonu hareket örüntüsü konum kümesi örnekleri (verilen konum numaralandırmaları kullanım sırasını ifade etmez).	42
Şekil 4.3	9, 25 ve 49 noktalı rastgele hareket örüntüsü konum kümeleri (Y).	43
Şekil 4.4	9, 25 ve 49 noktalı ızgara hareket örüntüsü konum kümeleri (Y).	44
Şekil 4.5	Farklı κ değerleri için çizilmiş spiral eğrileri.	45
Şekil 4.6	Eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsü akış şeması.	46
Şekil 4.7	Eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsünde yinelemeler sırasında standart sapmadaki değişim	47
Şekil 4.8	Eniyilenmiş Gauss dağılımı algoritması standart sapmaları. Şekil 4.8'te verilen her bir veri noktası 50 bağımsız denemenin ortalamasıdır.	49
Şekil 5.1	Tek gezgin baz istasyonu Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama(KTDP) çerçevesi.	52
Şekil 5.2	Hareketli baz istasyonu Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama(KTDP) çerçevesi.	55

Şekil 5.3 Sabit Konumlu Baz İstasyonu Hareket Örüntüsü KTDP çerçevesi.	57
Şekil 6.1 %5 değerinde bir kırılmış kestirici örneği.	60
Şekil 6.2 $200 \times 200 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak ağ yaşam süresindeki değişim (a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	63
Şekil 6.3 $300 \times 300 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak ağ yaşam süresindeki değişim (a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	64
Şekil 6.4 $400 \times 400 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak ağ yaşam süresindeki değişim (a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	65
Şekil 6.5 $200 \times 200 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak atıl kalan algılayıcı düğüm enerjisi değişimi (%), a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	67
Şekil 6.6 $300 \times 300 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak atıl kalan algılayıcı düğüm enerjisi değişimi (%), a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	68
Şekil 6.7 $400 \times 400 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak atıl kalan algılayıcı düğüm enerjisi değişimi (%), a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	69
Şekil 6.8 $200 \times 200 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak seçilen ortalama sanal baz istasyonu sayısı değişimi (N_z , a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	70
Şekil 6.9 $300 \times 300 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak seçilen ortalama sanal baz istasyonu sayısı değişimi (N_z , a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	71
Şekil 6.10 $400 \times 400 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak seçilen ortalama sanal baz istasyonu sayısı değişimi (N_z , a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	72
Şekil 6.11 Çok baz istasyonlu sistemlerde baz istasyonu sayısına bağlı olarak normalleştirilmiş ağ yaşam süresinin değişimi($200 \times 200 m^2$ alanda, a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	75
Şekil 6.12 Çok baz istasyonlu sistemlerde baz istasyonu sayısına bağlı olarak normalleştirilmiş ağ yaşam süresinin değişimi($300 \times 300 m^2$ alanda, a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	76

Şekil 6.13 Çok baz istasyonlu sistemlerde baz istasyonu sayısına bağlı olarak normalleştirilmiş ağ yaşam süresinin değişimi($400 \times 400 m^2$ alanda, a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).	77
Şekil 6.14 Sabit konumlu baz istasyonlarında farklı sayıda baz istasyonu (a) 1, b) 4 ve c) 16) kullanıldığında, ağ sona ermesinden sonra geriye artık olarak kalan düğüm enerjisi(%) dağılımları (50 düğüm, $400 \times 400 m^2$ algılama alanı).	80
Şekil 6.15 Gezgin baz istasyonlarında farklı sayıda baz istasyonu (a) 1, b) 4 ve c) 16) kullanıldığında, ağ sona ermesinden sonra geriye artık olarak kalan düğüm enerjisi(%) dağılımları (50 düğüm, $400 \times 400 m^2$ algılama alanı).	81
Şekil A.1 MICA2 algılayıcı düğümü.	99
Şekil A.2 MICAz algılayıcı düğümü.	100
Şekil A.3 Telos B algılayıcı düğümü.	101
Şekil A.4 IRIS 2.4GHz algılayıcı düğümü.	102
Şekil A.5 IMote 2.0 algılayıcı düğümü.	103
Şekil A.6 SunSPOT algılayıcı düğümü.	104
Şekil A.7 CRICKET MCS410 algılayıcı düğümü.	104
Şekil A.8 Epic algılayıcı düğümü.	105

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Mica2 KAA düğümlerinde her bir güç seviyesi için gönderme enerjisi ($\mu J/bit$) ve gönderim yapılabilecek maksimum uzaklıklar (m) [53, 9]. Veri alımı enerjisi sabittir ($E_{rx} = 0.922\mu J$).	41
Çizelge 6.1 Hedef senaryo parametreleri.	60
Çizelge 6.2 Çoklu baz istasyonu kullanımının KAA yaşam süresine olan etkisi (Izgara tabanlı hareket örüntüsü).	79

KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
KAA	Kablosuz Algılayıcı Ağ
WSN	İngilizce: Wireless Sensor Networks
MIP	İngilizce: Mixed Integer Programming
MEMS	Mikroelektromekanik Sistemler
RF	Radyo Frekans Haberleşmesi
PSO	Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemi
GA	Genetik Algoritma
SOSUS	İngilizce: Sound surveillance System
DARPA	İngilizce: Defense Advanced Research Projects Agency
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi
MİB	Merkezi İşlem Birimi
DSP	Dijital Sinyal İşlemcisi
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
ASIC	Uygulamaya Özel Tümlşik Devre
ADC	Analog Dijital Çevirici
DP	Doğrusal Programlama
TP	Tamsayı Programlama
KTP	Karma Tamsayı Programlama
KTDP	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
$G = (V, A)$	Düğümlerin ve veri akışlarının oluşturduğu ağı ifade eden yönlü çizge
V	Baz istasyonu dahil ağdaki düğümlerin kümesi
A	Düğüm arasındaki veri akışlarının kümesi
W	Baz istasyonları hariç ağdaki algılayıcı düğümlerin kümesi
Y	Sanal baz istasyonları kümesi
Z	Baz istasyonu tarafından ziyaret edilen konumlar kümesi
U_1	$W \cup 1.$ baz istasyonu
U_2	$W \cup 2.$ baz istasyonu
U_k	$W \cup k.$ baz istasyonu
A_k	Her bir U_k kümesi içindeki veri akışı kümesi
N	Toplam düğüm sayısı
N_y	Sanal baz istasyonu sayısı
N_w	Algılayıcı düğüm sayısı
N_z	Baz istasyonu tarafından ziyaret edilen konum sayısı
f_{ij}^k	$i.$ düğümden $j.$ düğüme taşınan ve hedefi $k.$ baz istasyonu olan toplam veri paketi sayısı
s_i	$i.$ düğüm tarafından her turda üretilen veri miktarı
e_i	$i.$ düğümün harcamış olduğu enerji
d_{ij}	$i.$ düğüm ile $j.$ düğüm arasındaki uzaklık
$R_{max}(l)$	$l.$ güç seviyesi için gerçekleştirilebilecek maksimum haberleşme mesafesi
<i>batarya</i>	Her düğümde bulunan toplam batarya enerjisi (İki AA battarya eşdeğeri 25.0 Kj)
<i>SinkCount</i>	Seçilebilecek maksimum eş zamanlı baz istasyonu sayısı
P_s	İletişim paketi boyutu
$E_{tx}^M(d_{ij})$	$i.$ düğümden $i.$ düğüme 1 bitlik veri gönderimi için gerekli olan minimum enerji miktarı
E_{rx}	1 bitlik veri alımı için gerekli olan enerji
L_{rnd}^k	$k.$ baz istasyonunun veri aldığı toplam süre
L_{rnd}	Ağın toplam yaşam süresi

Sembol	Açıklama
η	Haberleşme kanalı bant genişliği
I_{jm}^i	i .düğüm için kablosuz haberleşme girişim fonksiyonu
a_i	i .baz istasyonuna bir veri akışı yapılıp yapılamayacağını belirleyen ikili karar değişkeni
a_k^i	i .düğümünden k .baz istasyonuna bir veri akışı yapılıp yapılamayacağını belirleyen ikili karar değişkeni
bs_i	i .baz istasyonuna gelen veriler toplamı
bs_i^k	i .düğümünden k .baz istasyonuna giden veriler toplamı
M	Yeterince büyük bir sabit

1. GİRİŞ

Son yıllarda kullanım alanları giderek artan kablosuz algılayıcı ağları, algılama, veri işleme ve haberleşme gibi işlemlerin minik bir cihaz içerisinde toplandığı algılayıcı düğümlerden yüzlerce, bazen binlercesinin birlikte kullanıldığı ağlardır.

Kablosuz algılayıcı ağların gücü, algılayıcı düğümlerin kısıtlı kaynaklara sahip olmalarına rağmen, çok yüksek sayılarda üretilip dağıtılabilmesi ve kendi kendilerini ayarlayarak ederek bakım gerektirmemelerinden kaynaklanmaktadır. Mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) ve radyo frekans haberleşmesindeki (RF) hızlı gelişme; az güç tüketen, ucuz ve ağ üzerinde kullanılabilir mikro algılayıcıların geliştirilebilmesini mümkün kılmıştır. Algılayıcı düğümler çevrelerindeki çeşitli fiziksel niceliklerin ölçülmesini ve takip edilmesini sağlayabilirler. Bu niceliklere örnek olarak;

- Sıcaklık
- Nem
- Aydınlık
- Basınç
- Titreşim
- Kirlilik seviyesi
- Kimyasal oranı
- Gürültü seviyesi

verilebilir.

Bir kablosuz algılayıcı ağ (KAA), algılama, veri işleme ve veri iletme yeteneklerine sahip çok sayıda küçük algılayıcı düğümden oluşur. Temel amaçları bir bölgeyi izlemek [85], veri toplamak ve veri aktarmak olan bu düğümler üzerlerindeki yerleşik bir batarya ile çalıştıklarından kısıtlı enerjiye sahiptirler [65]. Sadece

algılayıcı verilerini toplamakla görevli olan bir baz istasyonu enerji kısıtlaması bulunmadan çalışabilmektedir ¹. Tipik bir KAA topolojisinde tek bir baz istasyonu sabit bir konumda veri toplama işlemini yerine getirir. Bu konum, genellikle ağı geometrik ağırlık merkezi olarak belirlenmektedir [52].

Geleneksel kablosuz tasarsız ağlar (İngilizce: wireless adhoc networks) için bir çok algoritma ve protokol önerilmiş olsa da, bu algoritma ve protokoller algılayıcı ağlarının eşsiz özellik ve uygulama gereksinimlerine pek uymamaktadır. Algılayıcı ağlar hatalara eğilimli ve genel bir kimliğe sahip olmayabilir fakat yine de geleneksel kablosuz tasarsız ağlara nazaran bazı avantajlara sahiptir:

KAA'ları tasarsız ağlardan ayıran karakteristik özellikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [4]:

- Algılayıcı düğümler hataya daha fazla eğilimlidirler.
- Binlerce algılayıcının dağıtılmasıyla çok geniş alanların kapsanması mümkündür.
- Düğüm sayıları yüksektir ve ağ içerisindeki dağılım yoğundur.
- Topoloji düğüm ölümleri gibi nedenlerle sık sık değişebilir.
- KAA bir düğümün hatası sonrasında da doğru bir şekilde çalışmaya devam ederler. Böylece, yüksek seviyeli artıklık ve geniş ölçüde bir hata toleransı sağlamış olur.
- Düğümlerin veri işleme ve iletim yetenekleri oldukça sınırlıdır.
- Düğümler birbirine benzerdir ve global eşsiz bir kimlikleri olmayabilir.
- KAA'lar insan müdahalesini ve yönetimini azaltabilirler.
- KAA'lar gözetimsiz bölgelerde ve erişimi zor ortamlarda çalışabilirler.

KAA'da ağ başarımını etkileyen en önemli faktörlerden biri düğümlerin, kısıtlı enerjiye sahip olduklarından, enerjilerinin tükenerek devre dışı kalmalarıdır. Normal şartlarda enerjisi tükenen yüzlerce düğümün bataryalarının değiştirilmesi fazla pratik olmadığından enerji tüketimini enküçükleyen verimli ağ yapılarının

¹Baz istasyonu enerji kaynağının sıradan algılayıcı düğümlere göre çok daha büyük olduğu varsayımı KAA araştırmalarında genel kabul gören bir varsayımdır

geliştirilmesi önem arz etmektedir. Herhangi bir KAA üzerinde baz istasyonu konumu ağ aktifken diğer bütün algılayıcı düğümler ile iletişim halinde olduğundan harcanan toplam enerjiyi doğrudan etkiler. Bu nedenle, hareket kabiliyeti katılmasıyla otonom bir robot gibi geliştirilen bir baz istasyonu [48, 24, 34, 42, 60], kendisini harcanan enerjiyi enküçükleyecek biçimde konumlandırarak ağ yaşam süresini önemli ölçüde uzatabilir.

KAA üzerinde algılayıcı düğümlerin nasıl ve ne şekilde haberleşecekleri ve baz istasyonunun konumu ağ yaşam süresini önemli ölçüde etkileyebilir. Örnek olarak, bir düğümün daha uzaktaki bir baz istasyonuna veri göndermesi daha fazla enerji harcayacak düğümün bataryasının daha hızlı tükenmesine neden olacaktır. Bu sebeple baz istasyonu konumunun seçimi sistem başarımını etkileyen önemli bir faktördür. Buradaki problemi baz istasyonunun hangi zamanda hangi konuma hareket etmesi gerektiğinin hesaplanması oluşturmaktadır. Yapılan geçmiş çalışmalarda [18] rastgele baz istasyonu hareketinin bile ağın yaşam süresinde %30'a kadar artışa neden olabildiği gösterilmiştir.

Kablosuz algılayıcı ağlar gelişmiş örgü ağ protokolleri sayesinde fiziksel dünyadan sanal uzaya uzanmış bir bağlantı denizi gibi tahayyül edilebilir. Bir tek cihazın kabiliyetleri oldukça sınırlı olmasına rağmen yüzlerce cihazın birleşimi ile oluşan bir algılayıcı ağı çok çeşitli imkanlar sunabilir. Örnek olarak denize batmakta olan bir gemide suyun gemiye dolması gemi üzerine yerleştirilmiş algılayıcı düğümler üzerinden izlenebilir ve düğümden düğüme kurulan bağlantılarla gemi içerisinde insan varlığı tespit edilerek bu kişiler için gemiden olası kaçış rotaları üretilebilir.

Kablosuz algılayıcı ağlar her geçen gün yeni kullanım alanlarıyla karşımıza çıkmaktadır. Bu kullanım alanlarına:

- Habitat ve ekosistem izleme
- Sismik aktivite izleme
- Hasta sağlık durumu izleme
- Yeraltı suyu kirliliği izleme
- Endüstriyel süreç izleme
- Kimyasal sızıntı izleme
- Araç hareket takibi

- Çevre güvenlik ve gözetimi
- Otomatik bina iklim kontrolü
- Hızlı acil durum müdahale

gibi örnekler verilebilir.

Kısıtlı kaynaklara sahip olan algılayıcı düğümler genellikle iki adet AA tipi kalem batarya ile beslenmektedir. Bu düğümlerden binlercesinin kullanıldığı bir durumda herhangi bir düğümün enerjisinin tükenmesi uygulama ömrünün yani ağ yaşam süresinin de tükenmesi anlamına gelmektedir çünkü takip edilen olay artık kapsama alanı dışında kalmıştır. Savunma sanayi ve çevresel gözlem uygulamaları gibi geniş alanlara yayılmış, fazla sayıda düğümün kullanıldığı kritik uygulamalarda bu durumun kabul edilebilmesi mümkün değildir. Durumları itibariyle düğümlerdeki bataryaların yenilenmesi fazla pratik olmadığından enerji tüketiminin azaltılması, başka bir deyişle enerji verimli çözümlerin geliştirilmesi KAA'lar için olmazsa olmaz tasarım kriterlerinden birisi haline gelmiştir [22, 68, 12, 32].

Düşük maliyetli, düşük güç tüketimli ve sınırlı hesaplama kabiliyetine sahip Kablosuz Algılayıcı Ağların (KAA), birçok uygulama alanında kullanılabilir oldukları kanıtlanmıştır [3, 4, 85]. KAA'lar gözetlemeden askeri keşif ve hedef takibine, sağlık kontrolünden, sanayi üretimi, endüstri, ve ev uygulamalarına kadar gerçek bir katkı sağlar. Tüm KAA uygulamalarının birleştirici ortak karakteristiği algılama yoluyla toplanan verinin ağ haberleşmesi üzerinden merkezi bir şekilde toplanmasıdır. KAA dağılımlarının birçoğu yapılandırılmamış ve rastgele olduğundan, KAA'da en önemli tasarım kriterlerinden biri enerjinin etkin kullanımıyla ağ ömrünün enbüyüklemesi olarak ortaya çıkmaktadır [38]. Algılayıcı düğümler genellikle yerleşik batarya tarafından sağlanan kısıtlı bir enerjiye sahip olduklarından, bataryaları tükendikten sonra işlevsiz hale gelmektedirler. Düğüm ölümleriyle birlikte ise ağ topolojisinde kopmalar ortaya çıkacak ve bunun sonucu olarak da, algılama kapsama alanında azalmalar meydana gelecektir. Ayrıca, ağ birden fazla yalıtılmış alt ağa bölünebilir ve bölünmüş ağlarda toplanan verilerin bir araya getirilmesi artık mümkün olmayabilir. Bu sebeple, alandaki bataryaları tükenmiş algılayıcı düğümlerin bataryalarının değiştirilmesi de pek pratik olmayacağından ağ ömrünü eniyileyecek ve ağ ömrü boyunca algılayıcı düğümler arasında yük dağılımını dengeleyecek verimli ağ stratejileri ve yönlendirme protokollerinin geliştirilmesi zorunlu bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır [85].

1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Mevcut çalışmalarda yaygınlıkla gezgin baz istasyonlar vasıtasıyla ağ ömrü en-büyüklemesi üzerinde durulmuştur. Bu çalışmalarda [37, 29, 45, 64, 80] gezgin baz istasyonu kullanımı ile ağ ömrünün ve veri yayılımının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.

Bunun başlıca nedeni, baz istasyonuna yakın konumda bulunan algılayıcı düğümlerin baz istasyonuna uzakta bulunan algılayıcı düğümlerden daha fazla enerji tüketmek eğiliminde olmalarıdır. Çünkü yakın konumda bulunan bu düğümler kendi veri paketleri dışında daha uzak konumda bulunan diğer düğümlerin de verilerini kendi üzerlerinden baz istasyonuna iletmektedirler.

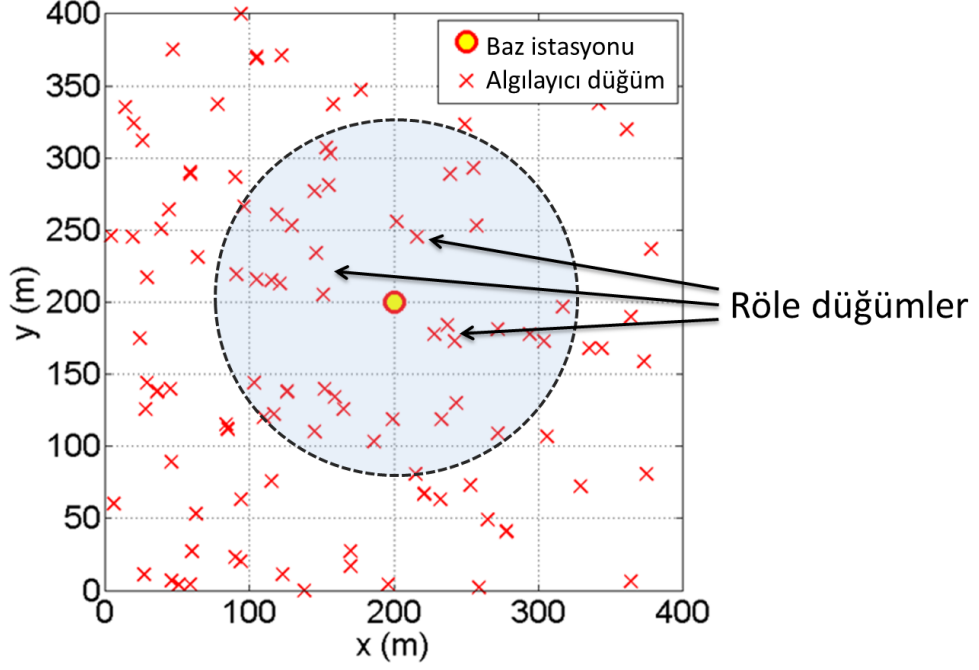
Bu şekildeki bir akış modeli ile baz istasyonuna yakın konumda bulunan algılayıcı düğümler enerjilerini daha hızlı tüketerek diğer algılayıcı düğümlerden daha erken ölmekte ve dolayısıyla baz istasyonu ile olan ağ bağlantısının kopmasına neden olabilmektedir. Bunun sonucunda ise KAA üzerinde düzgün veri toplanmasını engelleyen birbirinden kopuk bölgeler oluşarak ağın görevini yerine getirmesine engel olabilir. Bu durum KAA literatüründe oluşma şekline binaen yoğun-bölge problemi olarak tanımlanır [22, 40, 86, 63].

Yoğun-bölge sorununun örnek bir çizimi Şekil 1.1'de görülebilir. Şekil 1.1'de merkezdeki baz istasyonunun gölgeli daire ile temsil edilmiş haberleşme menzili içerisinde kalan algılayıcı düğümler, çevresel düğümlerden gelen veriyi aktarmaları nedeniyle düzensiz bir enerji harcanmasına maruz kalan röle düğümlerdir. Yoğun-bölge probleminden en fazla etkilenen düğümler röle düğümler olmaktadır. Bu nedenle, yoğun-bölge üzerinde yer alan bu röle düğümlerin diğer düğümlerden daha erken ölmeleri ağ genelindeki algılama/haberleşme operasyonlarının erken durmasına yol açan bir zincirleme reaksiyon yaratabilir.

Daha önce yapılmış benzer çalışmalarda [16, 52, 77, 2, 29, 50] gezgin bir baz istasyonunun daha dengeli bir yük dağılımı sağladığı gösterilmiştir. Baz istasyonu ağ etrafında yer değiştirdikçe yoğun-bölge üzerindeki yüksek enerji tüketimi de ağ geneline yayılarak daha dengeli bir yük dağılımına neden olmaktadır. Özetle, gezgin bir baz istasyonu kullanımı doğrudan olmasa da dolaylı yoldan yük dengelenmesi sağlayarak yoğun-bölge problemine karşı bir önlem olabilmektedir [67]. Sonuç olarak, daha eş dağılımlı bir enerji tüketimi ve böylece daha uzun bir ağ

kullanım süresi elde edilebilir. Bu nedenle, gezgin baz istasyonu kullanımı biline- gelen yoğun-bölge sorununa hafifletici bir çare olarak önerilmiştir.

Literatürde bazı çalışmalarda [79] gezgin bir baz istasyonunun kapsama alanını iyileştirmek amacıyla da kullanılabilirdiği gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Yoğun-bölge probleminin örnek bir gösterimi.

Bu çalışmada, gezgin bir baz istasyonunun ağın yaşam süresine olan etkileri tekli ve çoklu baz istasyonu modelleri için araştırılmıştır. Bu amaçla özgün bir baz istasyonu hareket eniyileme modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen bu model, başarımı bilinegelen diğer hareket modelleri ile (rastgele, ızgara ve spiral) karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kapsamlı deneyler ile birden fazla gezgin ve çoklu sabit baz istasyonu durumları incelenmiştir. Ek olarak, yoğun-bölge probleminin etkileri gözlemlenerek bu etkilerin enküçüklenmesine çalışılmıştır. Özetle bu çalışmada, özgün bir matematiksel programlama modeli, sezgisel bir arama algoritmasıyla (hareketlilik örüntüsü) birleştirilerek gezgin bir baz istasyonu modeli oluşturulmuş ve bu modelin KAA yaşam süresi üzerine olan etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yine bu çalışmada deney sonuçlarını genelleştirebilmek için farklı KAA topolojileri üzerinde birden fazla deneme senaryosu ile veri toplanmıştır (Her yöntem için 9 farklı düğüm yoğunluğu kullanılmıştır).

1.2 Problem Tanımı

Bu çalışma kapsamında ağ yaşam süresi ve enerji dağılımı eniyilemesi problemi, baz istasyonu hareketliliği ve çoklu baz istasyonu kullanımı açısından ele alınmış ve aşağıdaki sorulara cevaplar aranmıştır:

1. KAA ömrünü enbüyükleyecek baz istasyonu hareket örüntüsünün karakteristik özellikleri nelerdir?
2. Çoklu baz istasyonu kullanıldığında tekli baz istasyonu kullanımına kıyasla, ağ ömründe ne seviyede bir iyileşme elde edilebilir?
3. Çoklu gezgin ve çoklu statik konumlu baz istasyonu kullanımı arasında KAA ömrü açısından performans farkı ne kadardır?
4. En uygun çoklu baz istasyonu sayısı nedir?
5. Sabit ve gezgin konumlu baz istasyonu arasındaki denge/ödüleşim nedir?

1.3 Sınırlılıklar

Bu çalışmada KAA için algılayıcı düğüm üreten firmalardan birisi olan CrossBow Technology Inc. tarafından üretilen Mica ve Mica2 düğümleri baz alınmıştır. Yapılan deneysel ölçümler Mica ve Mica2 düğümleri referans alınarak kaydedilmiştir. Benzer şekilde deneylerde kullanılan parametreler de bu düğüm teknolojisi ile elde edilmiş gerçek dünya verileridir.

1.4 Varsayımlar

Bu çalışma çerçevesinde, genel kabul gören aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

1. Algılayıcı düğümlerden gelen verileri toplayan baz istasyonunun tüm topoloji bilgisine ve düğüm konumlarına sahip olduğu varsayılmıştır. Baz istasyonunun topoloji kontrolü için gerekli hesaplamaları ve hareket planlamasını yapabilmek için yeterli seviyede işlem yapabilme kabiliyetine ve yeterli enerji kaynağına sahip olduğu kabul edilmiştir.

2. KAA'lar ile ilgili yapılan bir çok çalışmada, ağdaki ilk düğümün enerjisinin tükendiği an, sistemin işlevselliğini yitirdiği kabul edilmiştir. Bunun nedeni, sınır güvenliği, çevre takip ve gözetimi gibi kritik uygulamalarda düğümlerden gelmesi gereken bir bilginin merkeze ulaşamaması durumunda sistemin güvenilirliğinin kaybolması başka bir deyişle izlenen olayın artık kapsama alanı dışında kalmasıdır.
3. Belirli bir aşamada verilerin toplanmasının tamamlanmasının ardından baz istasyonu/istasyonları ihmal edilebilir bir süre içinde bir sonraki noktaya hareket eder.
4. Tüm düğümlerin birbiriyle zamanlama açısından kabaca eş zamanlı olduğu varsayılmıştır. KAA'lar için tasarlanmış, herhangi bir ek yük getirmeyen ve tatmin edici performansa sahip bir çok zamanlama protokolü bulunmaktadır [74].
5. Zamanın ağ yaşam süresi boyunca eşit aralıklara bölündüğü ve her bir aralığın $T_{rnd} = 1$ dakika olduğu varsayılmıştır.
6. Her algılayıcı düğümün periyodik olarak eşit miktarda veri paketi ürettiği ($s_i = 1$) ve her bir veri paketinin 2048 *bit* boyutunda olduğu ($P_s = 2048$ *bit*) kabul edilmiştir.
7. Algılayıcı düğümlerde haberleşme sırasında yapılan enerji tüketiminin hesaplamaya göre baskın olduğu varsayılmıştır. Gerçek KAA test ortamlarında yapılan bazı çalışmaların deney sonuçlarına göre [66] toplam enerjinin %90'dan fazlasının haberleşme sırasında harcandığını raporlanmıştır.
8. Ağın yeniden yapılanma ve baz istasyonunun duraklama süresi yeterince uzun tutulmuştur, böylece topoloji keşfi ve yönlendirme hesaplanması için gereken enerji maliyeti, toplam enerji maliyetinin ihmal edilebilir bir bölümünü oluşturmaktadır (%1'den daha küçük [13]). Bu sayede, kontrol maliyeti toplam enerji tüketiminde önemli bir düşüşe neden olmadığından rahatlıkla göz ardı edilebilir.
9. Ortamda, bağlantılar arasındaki girişimi düşüren zaman bölümlenmeli çoklu erişim (TDMA) tabanlı bir ortama erişim (MAC) katmanı kullanıldığı düşünülmüştür. Çakışma olmadan böyle bir kombinatoryal zaman dilimi yerleştirme algoritmasının mümkün olduğu [21]'de gösterilmiştir. Dolayısıyla

yeterli bant genişliği gereksinimi sağlandığında çakışmasız bir haberleşmenin mümkün olduğu bilinmektedir. Aslında çalışmamızda [21]'de sunulan yeterli durumun değiştirilmiş bir versiyonunu kullanmıştır. Ayrıca, eğer dinamik zaman bölümlenmeli çoklu erişim (Dynamic TDMA) yaklaşımı ile tasarlanmış bir ortama erişim katmanı kullanılırsa paket çakışmalarını ihmal edilebilir seviyelere düşürmek mümkün olabilmektedir [27].

10. Boşta dinleme veya karışık kipte rastlantı eseri veri almanın harcadığı enerji ihmal edilebilir düzeydedir. Bu kiplerde kablosuz ağlar için enerji israfını önleyebilen akılcıca tasarlanmış birçok ortama erişim protokolü bulunmaktadır [27]. Biz de buna benzer bir ortama erişim katmanının tasarım çerçevesinde kullanıldığını varsayıyoruz.

1.5 Katkılar

Bu tez çalışmasında, gezgin ve sabit konumlu baz istasyonu durumları kapsamlı deneyler ile ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Yine bu çalışmada, özgün bir matematiksel programlama modeli, sezgisel bir arama algoritmasıyla (hareketlilik örüntüsü) birleştirilerek gezgin bir baz istasyonu modeli oluşturulmuş ve bu modelin KAA yaşam süresi üzerine olan etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Eniyilenmiş bir hareket örüntü modeli geliştirilmiş ve farklı hareketlilik örüntüleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Alınan deney sonuçlarını genelleştirmek için farklı KAA topolojileri üzerinde birden fazla deneme senaryosu ile veri toplanmıştır (her yöntem için 9 farklı düğüm yoğunluğu kullanılmıştır). Bununla birlikte, bu çalışmada çoklu baz istasyonu modeli hem gezgin hem de sabit konumlu baz istasyonları ile birlikte karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve aralarındaki ödünleşim miktarı aydınlatılmaya çalışılmıştır.

Çalışmada yoğun-bölge probleminin olumsuz etkileri detaylı bir biçimde inceleyerek bu etkilerin giderilmesi amaçlanmıştır. Alınan sonuçlarda çoklu baz istasyonu kullanılan KAA senaryolarında yoğun-bölge probleminin çoğunlukla ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. İlginç bir biçimde, en az 8 ve daha fazla sayıda baz istasyonunun kullanıldığı durumlarda yoğun-bölge probleminin etkilerinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Ancak, bu durumun sağlanabilmesi ve en verimli sonuçların elde edilmesi için homojen bir baz istasyonu dağılımı gerekliliği ortaya çıkmıştır.

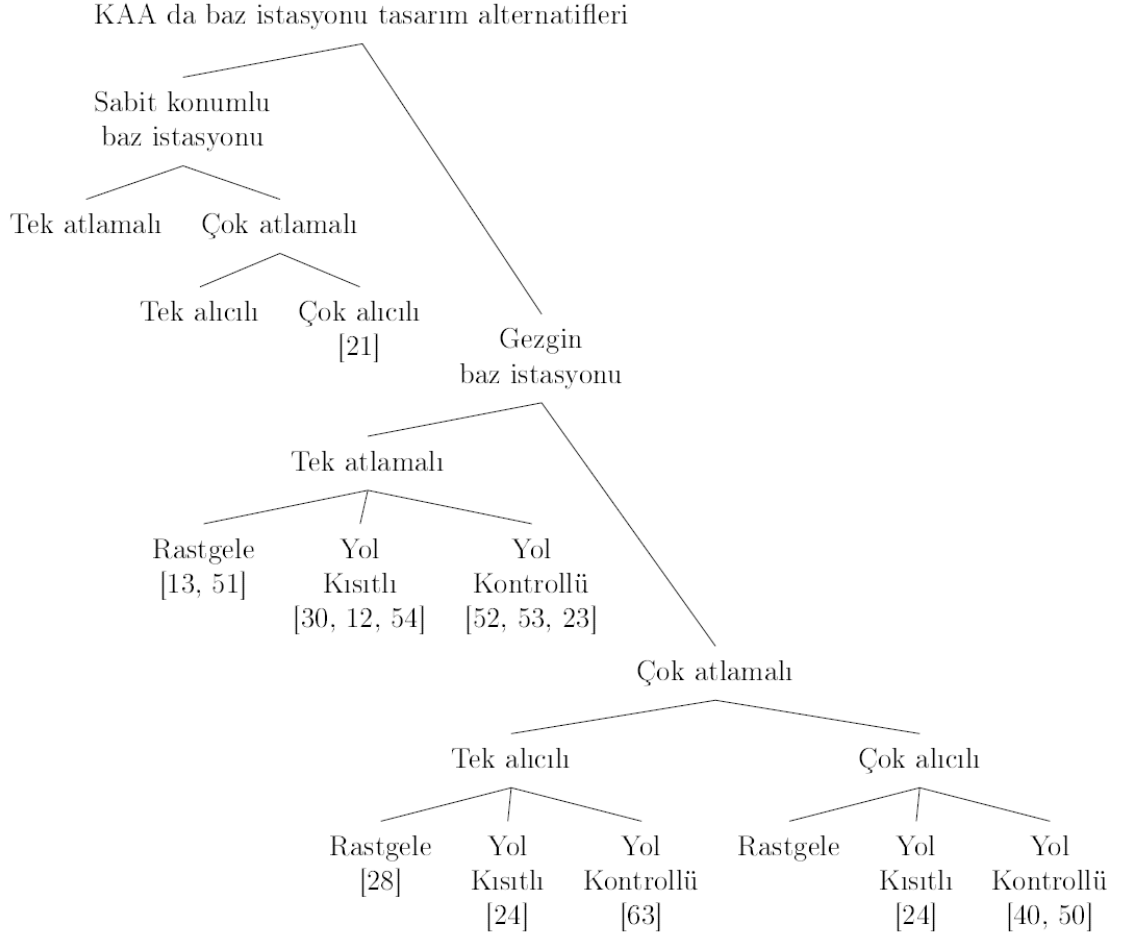
Takip eden bölümler şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de KAA’larda gezgin baz istasyonu kullanımı ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 3’te konu ile ilgili kavramsal çerçeve çizilmiş, detaylı olarak kablosuz algılayıcı ağlar, matematiksel programlama ve kullanılan araçlar anlatılmıştır. Bölüm 4’te çalışmaya konu olan sistem modeli ve baz istasyonu için kullanılan hareket örüntüleri ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Bölüm 5’te deneysel çalışmalarda kullanılan matematiksel programlama modelleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 6’da bir önceki bölümde tanımlanan modeller ile ilgili numerik analizler yapılmış, elde edilen bulgular ve bunlara ait değerlendirmeler paylaşılmıştır. Son olarak, Bölüm 7’de deneylerde elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve son değerlendirmeler yapılmıştır.

2. İLGİLİ LİTERATÜR

Literatür incelendiğinde baz istasyonu konumlandırılmasının statik ve dinamik konumlandırma olarak ikiye ayrıldığı görülmektedir [2]. Statik konumlandırmada baz istasyonu konumu sadece ilk kurulum sırasında belirlenmekte ve ağ yaşam süresi boyunca konumu değiştirilmemektedir. Dinamik konumlandırmada ise baz istasyonu konumu ilk kurulumdan görev tamamlanıncaya kadar sürekli dinamik olarak haberleşme başarımını eniyileyecek şekilde değiştirilmektedir.

Verilen bir ağ üzerinde baz istasyonu pozisyonu değiştirilerek haberleşme verimliliğinin eniyilenmesi problemi, eğer algılayıcı düğümler doğrudan baz istasyonu ile haberleşmek zorundalar ise; yani çok-atlamalı bir haberleşme yapamıyorlarsa; diğer bir ifadeyle, taşınacak veriler bir köşeden diğer bir köşeye aradaki bağlı köşeler üzerinden atlamalı bir şekilde iletilemiyor ise bir çizge üzerinde bütün köşelere en yakın köşenin bulunması problemi olarak düşünülebilir. Bu problem polinom zamanda çözülebilen bir problemdir. Fakat ağ yapısının çok-atlamalı bir yapıda olduğu sistemlerde ise bu problem çözümünün çok terimli zamanda gerçekleşmediği ve çözümün NP-Tam olduğu daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir [2, 78]. Bu nedenle yapılan çalışmalarda genellikle çeşitli sezgisel metotlar kullanılarak eniyi sonuca en yakın ara-eniyi sonucun bulunması yolu izlenmiştir. Bu amaçla Parçacık Sürü Eniyileme Yöntemi (PSO) [1, 46], Genetik Algoritma (GA) [48, 61] gibi eniyileme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Öte yandan problem tanımının esnetilerek oluşturulmuş olduğu çeşitli doğrusal programlama [22] modelleri de bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise, [22]'de önerilen doğrusal programlama modeli temel alınmış ve geliştirilerek gezgin baz istasyonu hareketi eniyilenecek ağ yaşam süresinin enbüyüklediği bir doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur. Bu modelde temel olarak baz istasyonunun bulunabileceği olası konumları içeren sınırlı bir konum kümesi oluşturulmakta ve yaşam süresi boyunca baz istasyonu ağın yaşam süresini eniyileyecek şekilde bu konumlarda bulunabilmektedir.

Literatürde, farklı hareketli baz istasyonu tasarım alternatifleri, baz istasyonu hareket yörüngeleri ve veri toplama yöntemleri ile ilgili Şekil 2.1'deki gibi genel bir sınıflandırma yapılabilir. Şekil 2.1'de gösterildiği üzere, sınıflandırma ağacının en



Şekil 2.1: KAA'da baz istasyonu tasarım alternatifleri.

üst seviyedeki ayrışmasında ilk seçenek, statik ve gezgin baz istasyonları arasında olmaktadır. Sınıflandırma ağacının ikinci basamağındaki ayrışma ise baz istasyonlarının birbirleriyle olan iletişimde tek-atlamalı veya çok-atlamalı bir aktarım kullanmaları sebebiyle olmaktadır. Burada eğer, algılayıcı düğümler baz istasyonlarına veri iletirken arada çeşitli aktarıcı düğümlere bağlı kalmadan doğrudan veri aktarmaları gerekli ise, tek-atlamalı haberleşme seçeneği seçilir. Diğer taraftan, eğer algılayıcı düğümler baz istasyonlarına veri iletirken arada çeşitli aktarıcı düğümler üzerinden veri aktarabiliyorlar ise, çok-atlamalı haberleşme seçeneği seçilmektedir.

KAA'da baz istasyonları üzerine daha fazla araştırma yapılmış olan diğer bir ilginç araştırma alanı ise hareketli baz istasyonları hakkındadır. Sabit konumlu

baz istasyonlarında olduğu gibi burada da ilk önemli ayrışma tek atlamalı ve çok atlamalı haberleşme seçimi sebebiyle olmaktadır. Tek atlamalı haberleşebilen gezgin baz istasyonu için, istasyonun takip edebileceği yörünge(rota) için üç farklı seçenek bulunmaktadır: Bunlardan ilki olan rastlantısal yörünge [18, 70], baz istasyonunun yörüngesinin belirli bir örüntüye bağlı olmaması durumudur. İkinci seçenek olan yol kısıtlı statik yörüngede [43, 17, 73], baz istasyonu dış faktörler tarafından önceden belirlenmiş bir yörüngeyi takip etmek zorundadır. Son olarak, yol kontrollü dinamik yörünge [71, 72] amaç fonksiyonunu eniyilemek için karar vericiye, baz istasyonunu ilgili alan içinde konumlandırabileceği geniş bir aralık sunar.

Çok atlamalı bir haberleşmeye ve baz istasyonunun hareket etmesine müsaade edildiği zaman ise çözümlenebilecek daha zengin bir problem kümesi ve performansta daha fazla iyileştirme imkanı mümkün olabilmektedir. KAA'da tekli veya çoklu eş zamanlı baz istasyonu kullanımı seçeneği ise, bir o kadar önemli ve bir o kadar da karmaşık bir tasarım kriteri olmaktadır. Çalışmalarımızın içeriği olan çoklu gezgin baz istasyonları ile çok atlamalı veri toplama senaryolarında en verimli hareket örüntülerinin belirlenmesi ise bu bağlamda oldukça önem kazanmaktadır.

KAA literatüründe çoklu gezgin baz istasyonu alanında oldukça az sayıda çalışmanın yapıldığı gözlemlenmiştir. Birden fazla gezgin baz istasyonu kullanma fikrinin ilk olarak öne sürüldüğü [70] çalışmasında yazarlar, baz istasyonlarını gezici veri toplama ve taşıma üniteleri (veri katarı) olarak tanımlamaktadır. Bu üniteler veri toplama görevini algılama alanı üzerinde rastgele hareket ederek gerçekleştirmekte ve depoladıkları verileri önceden tanımlanmış belirli veri erişim noktalarına gelerek aktarmaktadırlar. Fakat, burada baz istasyonlarının hareketi tamamen rastgele olduğu için veri katarı gezinti rotası bütün algılayıcı düğümlere ulaşmayabilir ve bu nedenle de bütün algılayıcı düğümlerden veri toplanması garanti edilemez. Ek olarak bu yapılandırmada veri iletim gecikmesi de oldukça yüksektir. Benzer bir yaklaşım [81]'de takip edilmiştir. Bu çalışmada, çoklu gezgin baz istasyonları, önceden belirlenmiş rotalar üzerinde ileri, geri hareket ederek ve belirlenen noktalarda yine belirli süreler kalarak algılayıcı verilerini toplamak için kullanılmışlardır.

Yazarlar [56] numaralı çalışmada, hareketli baz istasyonlarının veri toplanması için duraklayacakları noktaların seçiminde farklı bir yaklaşım izlemişlerdir. Bu-

rada, hareketli baz istasyonları kendilerini ağ üzerinde algılayıcı düğümlerin sahip olduğu ortalama enerjinin en fazla olduğu bölgelerde konumlandırmışlardır. Bu sayede baz istasyonu çevresinde yer alan röle görevi gören algılayıcı düğümlerin sürekli enerjisi daha fazla olan düğümler olması sağlanarak dengeli bir enerji tüketimi sağlanması amaçlanmıştır. [44] numaralı çalışmada sabit ve gezgin baz istasyonlu KAA yapılarının simülasyon tabanlı bir analizi sunulmuştur. Burada yazarlar gezgin baz istasyonunun hareket edebileceği en fazla hareket yarıçapını enerji verimliliği yönünden incelemişlerdir. [19] numaralı çalışmada, KAA yaşam süresi eniyilemesi, algılama alanının öncelikle birbirine eşit alt bölümlere bölünmesi ve her bir alt bölüme birer hareketli baz istasyonu atanarak algılayıcı düğüm verilerinin toplanması sağlanmıştır. [75]'de yazarlar, KAA yaşam süresini artırmak için kullanılan her bir gezici baz istasyonuna uygun bir gezinti rotası belirlendikten sonra belirlenen bu rotayı enküçükleyerek bir eniyileme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Burada yazarlar, baz istasyonları hareketi için her zaman uygun bir gezinti rotası bulunabileceğini ve baz istasyonlarının sadece bu rotalar üzerinde hareket edebileceklerini varsaymışlardır. [49] numaralı çalışmada ise çoklu gezgin baz istasyonları ile ağ yaşam süresi eniyileme problemi, aşağıdaki kısıtlamalar altında üç aşamalı sezgisel bir eniyileme problemi olarak formüle edilmiştir. Bu kısıtlar:

1. Hareketli her baz istasyonunun toplam seyahat mesafesi verilen bir ön değerle sınırlandırılmıştır.
2. Her duraklama süresi içinde, algılayıcı düğümler tarafından oluşturulan tüm algılama verisi gezici baz istasyonlarından biri tarafından toplanmalıdır.

Özetle, birden fazla gezgin baz istasyonu kullanılarak KAA yaşam süresi enbüyüklemesi problemi genellikle ya rastgele veya önceden belirlenmiş bir yolun izlenmesi, ya da algılama alanının birden fazla daha küçük alt alana bölündükten sonra her bir alt alana birer gezgin baz istasyonu atanması yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Literatürde daha önceden yapılmış hiçbir çalışmada birden fazla gezici baz istasyonu ile rastgele, ızgara ve bu çalışmada ilk kez öne sürülen spiral ve eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüleri kullanılarak yapılmış karşılaştırmalı sistematik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmamızın odak noktası çoklu baz istasyonlarının ve tanımlanan farklı baz istasyonu hareketlilik örüntülerinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkileri hakkında daha fazla fikir sahibi olmaktır. Bu çalışmanın literatüre olan asıl katkısı bahsedilen sistematik çalışmanın matema-

tiksel programlama yöntemleriyle özgün bir biçimde ifade edilerek gerçekleştirilmesidir. Çalışmada cevap aranan problemler için Bölüm 1.2’te bulunan problem tanımı bölümüne bakılabilir.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

3.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlar

Algılayıcı ağların pratik olarak kullanılması ilk olarak 1950'li yıllarda başlamıştır. Bu kullanım diğer birçok teknolojiye olduğu gibi ağırlıklı olarak askeri uygulamalarda gerçekleşmiştir. Buna verilebilecek ilk örnek algılayıcı ağ, 1950'li yıllarda geliştirilen SOSUS (İngilizce: sound surveillance system) projesi [76] olmuştur. SOSUS projesinin geliştirilmesine 1949 yılında, ABD Donanması tarafından anti-denizaltı savaş araştırmaları kapsamında Sovyet denizaltıları takip edebilmek amacıyla başlanmıştır. Yıllık 10.000.000 \$ ayrılan proje sayesinde öncelikli olarak büyük filolardan oluşan dizel motorlu Sovyet denizaltı tehdidine karşı bir önlem alınması planlanmıştır.

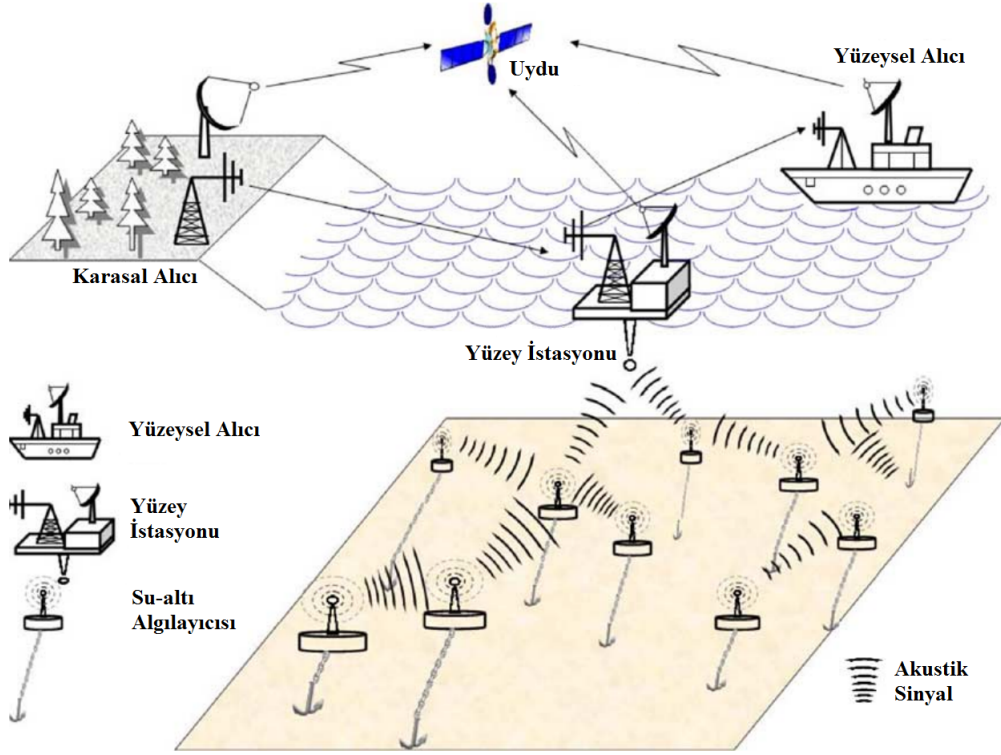
SOSUS projesi kapsamında okyanus tabanına kilometreler boyunca yerleştirilmiş hidrofon (akustik algılayıcı) dizileri ve bu algılayıcılardan gelen bilgileri toplayan istasyonlar kullanılmıştır. Karadaki izleme istasyonlarına kablolarla bağlı olan hidrofon dizileri öncelikle kıta yamaçları ve uzun menzilli akustik yayılımının dağılmaması için su altı dağları gibi eniyilenmiş noktalara yerleştirilmiştir. Bu algılayıcılar ile denizaltı motorları tarafından üretilen düşük frekanslı ses dalgaları izlenmekte ve üçgenleme¹ ile denizaltı pozisyonları yüzlerce kilometre mesafeden tespit edilebilmektedir.

Dünyanın çeşitli noktalarına - GIUK boşluğu (Atlantik Okyanusuna yakın, Grönland, İzlanda ve İngiltere arasında) ve Pasifik Okyanusu'nun çeşitli yerlerine - yerleştirilmiş algılayıcılar sayesinde batıdaki hedeflere yönelen Sovyet denizaltı tehditlerini algılamak için kurulan sistem daha sonra Çekilebilir Gözetleme Dizi Algılayıcı Sistemi (İngilizce: Surveillance Towed Array Sensor System - SURTASS) ile desteklenip entegre Su Altı Gözetleme Sisteminin (İngilizce: Integrated Undersea Surveillance System) bir parçası haline gelmiştir.

Deniz altı gözetiminde algılayıcı ağların kullanımı geçen zamanla daha da ge-

¹Bir kaynaktan gelen sinyalin farklı noktalara olan uzaklık ve yön bilgilerinin kullanılmasıyla konumunun belirlenmesi için kullanılan bir tekniktir.

liştirilerek devam etmiştir. Gelişen teknolojiyle birlikte deniz altı kabloları ile bağlantılı olan algılayıcılar yerlerini kablosuz algılayıcılara bırakmış ve sabit konumlu olmayan ve istenildiği zaman istenilen konumlara yerleştirilebilen hareketli algılayıcılar geliştirilmeye başlanmıştır.



Şekil 3.1: Deniz altı gözetimi için geliştirilmiş bir su altı KAA sistemi [6].

Şekil 3.1’de güncel bir deniz altı gözetim sistemi çalışması örneği verilmiştir. Bu çalışmada [6] algılayıcı düğümler deniz tabanına çapalanarak asılı konumda tutulmaktadır. Algılayıcı düğümlerden gelen veriler belirli aralıklarla yerleştirilmiş su altı alıcı istasyonlarına kablosuz olarak ses dalgaları üzerinden akustik modemler ile iletilmektedir. Yine bu sistemde deniz yüzeyinde bulunan yüzey istasyonları deniz tabanından toplanan verileri kablosuz olarak kısa mesafedeki yüzeysel alıcı istasyonlara ya da uydu üzerinden daha uzun mesafedeki alıcı istasyonlara iletebilmektedir.

Kablosuz algılayıcı ağlar üzerinde yapılan çalışmalar 1980’lerin başında Amerika Birleşik Devletleri Savunma İleri Araştırma Projeleri Dairesi (İngilizce: Defense Advanced Research Projects Agency -DARPA) desteğiyle daha da hızlandı. DARPA’nın destek olduğu projelerden biri olan "Dağıtılmış Algılayıcı Ağlar" (İngilizce: Distributed Sensor Networks - DSN) projesi bağlamında KAA’da kul-

lanılabilecek teknoloji ve protokollerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu öncü çalışmalar sayesinde birçok modern askeri projenin önü açılmış oldu.

1980'lerin sonlarında, DARPA araştırma projeleri sonuçları askeri planlamacıların ilgisini daha fazla çektikçe askeri kuruluşlar algılayıcı ağ teknolojisini daha fazla benimsemeye ve sürekli artan sayıda yeni askeri projelere imza atmaya başladı. Çok büyük miktarlarda harcama yapan bu kuruluşlar sayesinde KAA teknolojilerinin gelişimi 1990'ların başında çok daha fazla ivme kazandı.

1990'ların sonlarında ve 2000'lerin başlarında bilgisayar ve iletişim alanındaki ilerlemeler KAA teknolojisinin gelişiminde yeni bir aşamaya gelmesine sebep olmuştur. Bilgisayar, iletişim ve mikro elektromekanik teknolojisindeki son gelişmeler kablosuz algılayıcı ağ araştırmalarında çığır açmıştır. Aynı zamanda algılayıcıların boyutlarının küçülmesi ve fiyatlarının düşmesi ile de kullanım alanları oldukça genişlemiştir.

Ayrıca birçok şirketin KAA'ların ticari uygulamalardaki inanılmaz potansiyelini keşfetmesi sayesinde KAA teknolojisinin standartlaşması yönünde ilk adımlar atılmaya başlandı. Yeni tanımlanan standartlara bilinen örnekler olarak IEEE tarafından geliştirilmiş kişisel 802.15.4 radyo haberleşme standardına dayalı olarak çalışan ZigBee [7] veya WirelessHART [20] verilebilir.

Şu an için kablosuz algılayıcı ağları 21. yüzyılın en önemli projelerinden biri olarak görülmektedir. Çin gibi ülkeler de kendi stratejik araştırma programlarında KAA'lara yer vermektedirler. Ayrıca Crossbow [39] gibi ticari kuruluşlar da bu sistemlerin yaygınlaşmasını sağlamaktadırlar [59]. Ek-A'da ticari amaçlı olarak üretilen başlıca kablosuz algılayıcı geliştirme platformları ve sahip oldukları çeşitli özellikler listelenmiştir.

3.1.1 Kablosuz Algılayıcı Ağ Kullanım Alanları

KAA'lar güvenilirlik, ölçeklenebilirlik, kendi kendini organize etme, esneklik ve kurulum kolaylıkları gibi özellikleri nedeniyle çok geniş yelpazedeki uygulama alanlarında kullanılabilir. KAA'lar aynı zamanda mevcut kablolu ağların çalışmasının imkansız olduğu veya kullanılamayacağı ortam ve koşullar altında da (örneğin, tektonik hareketler gibi sismik aktivitelerin gözlemlendiği bölgelerde) rahatlıkla kullanılabilirler. Günümüzde pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaya

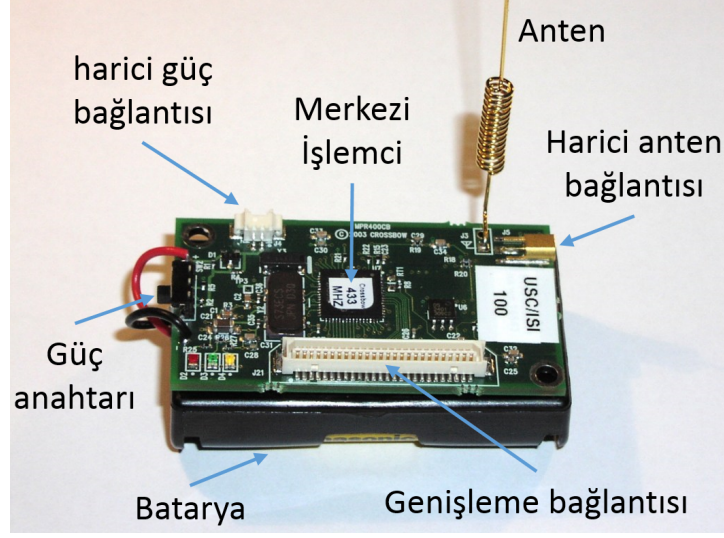
başlanan kablosuz algılayıcı ağların başlıca uygulama alanlarına örnek olarak aşağıdaki alanlar verilebilir [28].

- Savunma sanayi ağırlıklı askeri uygulamalar
- Endüstriyel süreç izleme uygulamaları
- Kirlilik takibi gibi çevresel takip ve gözlem uygulamaları
- Hassas tarımsal üretim uygulamaları
- Güvenlik ve gözetleme uygulamaları
- Otomasyon ve akıllı ev uygulamaları
- Otomotiv uygulamaları
- Felaket algılama ve müdahale uygulamaları
- Medikal takip ve hasta durumu izleme gibi sağlık uygulamaları
- Araç trafik yönetim uygulamaları
- Su altı akustik gözetleme uygulamaları

3.1.2 Kablosuz Algılayıcı Düğüm Donanım Bileşenleri

Bir KAA sistemi dağıtık durumdaki birçok algılayıcı düğümden oluşur. Burada her bir algılayıcı düğüm birbirinden bağımsız olarak çeşitli algılama ve veri işleme gibi görevleri yerine getirebilecek donanıma sahiptir. Ayrıca, algılayıcı düğümler gerektiğinde birbirleriyle iletişime geçerek algılayıcılarından elde edilen bilgileri paylaşabilir ve verilerin tek bir merkezde toplanması sağlanabilir. Şekil 3.2'de yaygın olarak kullanılan algılayıcı düğüm platformlarından Crossbow [39] firması tarafından geliştirilmiş olan Mica2 Mote donanımı gösterilmektedir.

Bir algılayıcı düğüm, genellikle merkezi işlem birimi, haberleşme birimi, bir yada daha fazla sayıda algılayıcıdan oluşan algılama birimi ve enerji birimi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden enerji birimi kendi içerisinde enerji dağıtımını sağlayan dağıtım birimi ve bir enerji kaynağından oluşabilir. Ek olarak gezgin düğümlerde hareket edebilme kabiliyetini sağlayan beşinci bir



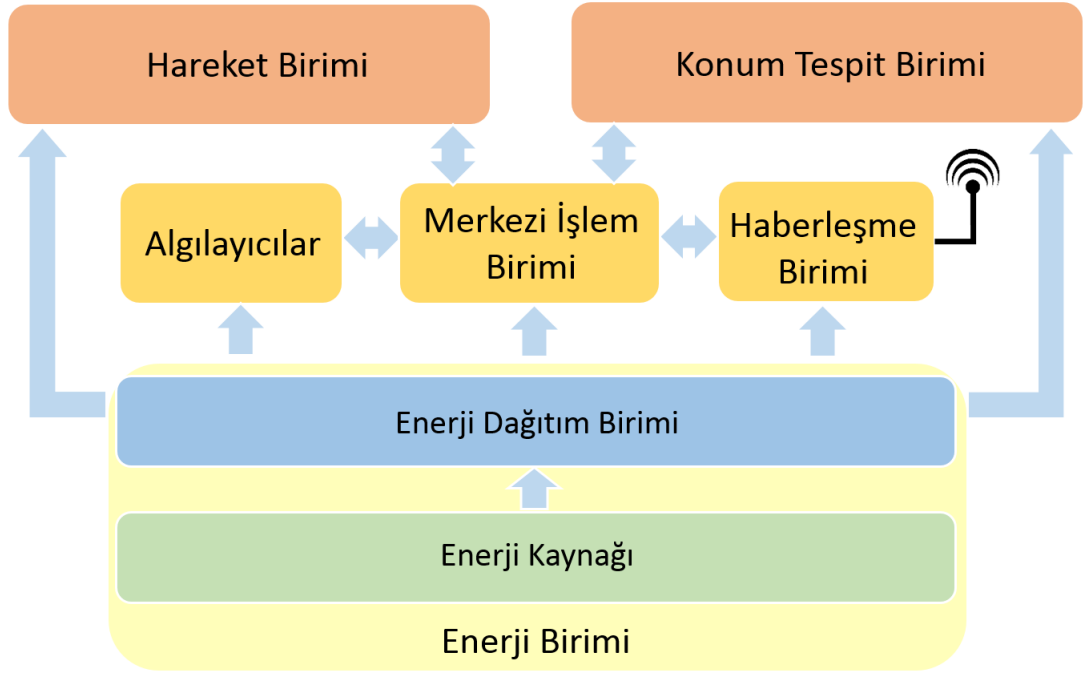
Şekil 3.2: Crossbow Firması tarafından geliştirilmiş olan Mica2 Mote KAA düğümü.

birim olarak hareket birimi de bulunabilmektedir. Ayrıca hareket biriminin düzgün çalışabilmesi için konum tespitini sağlayan bir konumlandırma biriminin de bulunması gereklidir. Konumlandırma birimi olarak genellikle küresel yer bulma sistemi (İngilizce: Global Positioning System - GPS) kullanılmaktadır. Bir KAA düğümünde bulunan bu bileşenlerin örnek gösterimi Şekil 3.3’de verilmiştir.

3.1.2.1 Merkezi İşlem Birimi

Merkezi işlem birimi (MİB), algılayıcı düğüm üzerinde algılayıcılar tarafından toplanan yerel verilerin işlenmesi ve diğer düğümlerle olan veri alışverişinin gerçekleştirilmesi gibi görevleri yerine getiren kontrol birimidir. MİB, verileri işleyen gömülü işlemciler, kaynakları kontrol eden mikro denetleyiciler ve verilerin saklandığı depolama alanlarından oluşabilir. Bir algılayıcı düğümde, merkezi işlem biriminin görevleri arasında kaynakların yönetilmesi, görevlerin zamanlanması, verilerin işlenmesi, çevresel birimlerin kontrol edilmesi ve uygulamaların çalıştırılması olabilir. Ayrıca diğer düğümler ile yapılan iletişim ve bu iletişim sırasında meydana gelen veri transferi de MİB tarafından yönetilmektedir. Ek olarak MİB algılayıcı düğüm üzerindeki veri depolama kaynaklarını yöneterek gerekli verilerin kalıcı olarak saklanmasını da sağlayabilir.

Algılayıcı düğümlerde kullanılabilen MİB gömülü işlemci olarak Mikrodenetleyici, Dijital Sinyal İşlemcisi (İngilizce: Dijital Signal Processor - DSP), Alanda Prog-



Şekil 3.3: Kablosuz algılayıcı düğüm bileşenleri.

ramlanabilir Kapı Dizileri (İngilizce: (Field Programmable Gate Array - FPGA) veya Uygulamaya Özel Tümlşik Devre (İngilizce: Application Specific Integrated Circuit - ASIC) içerebilir. Bütün bu alternatifler arasında, mikrodnetleyiciler diğer işlemcilerle nazaran daha ucuz fiyat ve çevresel aygıtlara olan erişimdeki esneklik avantajları sayesinde algılayıcı düğümde en çok tercih edilen gömülü işlemci olmuştur. Örnek olarak sık kullanılan, popüler algılayıcı düğümde Mica2 Mote platformu Atmel firmasının geliştirmiş olduğu ATmega128L mikrodnetleyicisini kullanmaktadır.

Öncelikli olarak ekonomik nedenler ve güç tüketimi limitlerinden dolayı, algılayıcı düğümde kullanılan merkezi işlem birimleri genellikle hesaplama gücü açısından oldukça sınırlı olarak (düşük saat hızlarında) seçilirler. Bu hesaplama gücü kısıtlaması nedeniyle, cihazlar genellikle TinyOS [47] benzeri özel bileşen tabanlı gömülü işletim sistemleri çalıştırmak zorundadırlar. Bu işletim sistemleri enerji tasarrufu sağlamak için özel uyku modları ve dinamik voltaj ölçekleme gibi gelişmiş düşük güç tüketim teknikleri kullanmaktadır [31].

3.1.2.2 Algılama Birimi

Algılama birimi, sıcaklık, basınç, nem gibi fiziksel durumlardaki değişiklikleri ölçülebilen ve bu değişiklikleri sayısal olarak ifade edebilen donanım birimidir. Bu görevi gerçekleştirebilmek için algılama birimi üzerinde çeşitli fiziksel büyüklükleri ölçen algılayıcılar ve algılayıcılardan gelen analog veriyi mikrodenetleyicinin anlayabileceği sayısal veriye çeviren Analog/Sayısal çeviriciler (İngilizce: Analog to Digital Converter - ADC) bulunmaktadır. Günümüzde algılayıcılar tarafından çok çeşitli büyüklükler ölçülebilmektedir. Ölçülebilen başlıca büyüklükler verilenlerle sınırlı olmamak kaydıyla aşağıda sıralanmıştır [11]:

- Sıcaklık
- Nem
- Basınç
- Aydınlık
- Elektromanyetik alan
- Hızdaki değişim
- Yönelimdeki değişim
- Titreşim
- Kirlilik seviyesi
- Kimyasal bileşim
- Ph değeri
- Gürültü seviyesi
- Fiziksel aktivite
- Kandaki O_2 miktarı

Bütün KAA tasarımlarının merkezinde kullanılan algılayıcılar yatmaktadır çünkü bir KAA sisteminin görevi ve kullanım amacı sahip olunan algılayıcılar tarafından belirlenmektedir. Geçtiğimiz on yılda birçok algılama teknolojisinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bu gelişmeler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Mikroelektromekanik sistemlerde (MEMS): Jiroskoplar, ivmeölçerler, manyetometreler, basınç ölçerler, piroelektrik etki algılayıcıları ve akustik algılayıcılar
- CMOS tabanlı algılayıcılarda: Sıcaklık, nem, kapasitif yakınlık, kimyasal bileşim
- LED algılayıcılarda: Ortam aydınlatması algılama, yakınlık algılama, biyolojik değerlerin ölçülmesi

Algılayıcı düğümler genellikle sınırlı güç kaynağı ile çalışan mikro-elektronik cihazlar olduğundan, üzerinde bulunan algılayıcıların da küçük boyutlu olması ve son derece düşük enerji tüketmesi gereklidir. Bu sebeple KAA düğümlerinde genellikle düşük örnekleme hızlarında çalışan düşük enerji tüketimli algılayıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca bir çok uygulamada, çok boyutlu algılama gereksinimleri nedeniyle birden fazla algılayıcı kullanılabilir. Burada algılayıcılardan gelen verilerin ne şekilde kullanılacağı uygulama tabanlı olarak belirlenmektedir.

3.1.2.3 Haberleşme Birimi

Haberleşme birimi, genellikle kablosuz iletişimi gerçekleştirebilen bir alıcı/verici devre ile antenden meydana gelmektedir. Bu birim verilerin yüksek frekanslı radyo dalgaları üzerinden genellikle ISM bandı (İngilizce: Industrial Scientific Medical band) kullanılarak taşınabilmesine olanak sağlar.

Kablosuz haberleşmede veri iletimi için radyo frekansı (RF) veya optik haberleşme (lazer veya kızılötesi) kullanılabilir. Lazer daha az enerji ile daha uzun mesafelere veri iletebilir fakat iletişim için doğrusal bir görüş gereklidir ve atmosferik koşullara karşı oldukça duyarlıdır. Kızılötesi lazer gibidir ancak daha az doğrusaldır ve kısıtlı bir yayım kapasitesine sahiptir.

Radyo frekansı tabanlı iletişim çoğu KAA uygulaması için en uygun olan ve en çok tercih edilen iletişim şeklidir. KAA'larda genellikle 433 MHz ve 2.4 GHz arasındaki iletişim frekansları kullanılmaktadır.

KAA cihazlarında genellikle kısa mesafelerde (<100m) ve düşük bant genişliğinde (10-100 kbps) bir kablosuz haberleşme kurulması yeterlidir. Günümüzde algılayıcı düğümlerde kullanılan haberleşme birimlerinin oldukça kısıtlı özelliklere sahip ol-

malarına rağmen zamanla arka plan gürültüsüne karşı daha dayanıklı ve spektral verimliliği daha yüksek sistemlerin geliştirilmesi olasıdır.

Kablosuz haberleşme genellikle KAA cihazlarında en çok gücün harcandığı işlemidir. Bu sebeple enerji verimliliğini artıracak etkin haberleşme protokolleri ve yüksek verimli uyku kipleri gibi teknolojiler geliştirilmektedir. Örnek olarak bir haberleşme biriminde İletim (Transmit), Alım (Receive), Boş (Idle) ve Uyku (Sleep) gibi işlemsel durumlar/kipler bulunabilir. Boş durumda bulunan radyoların güç tüketimi neredeyse alım durumundaki enerji tüketimine eşittir. Bu yüzden alım veya iletim işlemi yapmayan radyoları boş duruma almak yerine kapatmak daha verimli bir çözümdür.

3.1.2.4 Enerji Birimi

Enerji Birimi bir enerji kaynağı ile enerjinin verimli bir şekilde diğer birimlere dağıtılmasını sağlayan Enerji Dağıtım Biriminden oluşmaktadır. KAA düğümlerinde enerji kaynağı olarak genellikle sınırlı kapasiteye sahip yerleşik bataryalar ya da kapasitörler kullanılmaktadır. Bu sebeple birçok uygulamada enerji kaynağı en kritik kaynak olarak öne çıkmaktadır. Ancak günümüzdeki KAA düğümleri yenilenebilir enerji kaynaklarını da (güneş enerjisi, ısı enerjisi, titreşim enerjisi vb.) kullanabilecek şekilde geliştirilmektedir.

Algılayıcı düğümlerdeki enerji tüketimi algılama, iletişim ve veri işleme benzeri işlemler nedeniyle olmaktadır. Fakat genellikle algılayıcı düğümden veri iletişimi için harcanan enerji diğer işlemlerde harcanan enerjiden daha fazladır. Algılama ve veri işleme için enerji tüketimi genellikle daha azdır. Örnek olarak, 1 Kb veriyi 100 metre mesafedeki bir noktaya iletmek için gereken enerji, mikrodenetleyici üzerinde milyonlarca komut çalıştırmak için gereken enerjiye eşittir.

Algılayıcı düğümlerde farklı yapılarda şarj edilebilir veya şarj edilemez tipte bataryalar kullanılabilir. Bu amaçla kullanılabilir bataryalar içerisinde kullanılan kimyasal malzemeye göre sınıflandırılmışlardır (NiCd - Nikel Kadmiyum, NiZn - Nikel Çinko, NiMH - Nikel Metal hidrid, Li-ion - Lityum-İyon).

Kablosuz algılayıcılarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan en önemli iki güç koruma politikası Dinamik Güç Yönetimi (İngilizce: Dynamic Power Management - DPM) ve Dinamik Voltaj Ölçeklendirme (İngilizce: Dynamic

Voltage Scaling - DVS)'dir. DPM düğüm üzerinde o anda kullanılmayan veya etkin olmayan birimleri kapatarak enerjiyi koruma görevini gerçekleştirir. DVS yaklaşımı ise anlık iş yüküne bağlı olarak işlemci güç seviyeleri arasında geçişler yaparak çalışır. Bu şekilde güç tüketiminde önemli kazançlar sağlamak mümkündür.

3.1.2.5 Hareket Birimi

Sadece bazı düğümlerde yer alan bu birim konum tespit birimiyle birlikte kullanılarak düğümlere hareket edebilme kabiliyeti kazandırmaktadır. Özellikle bazı uygulamalarda gezici düğümlere olan gereksinim nedeniyle bu birime ihtiyaç duyulmaktadır.

Hareketi sağlayan itki karasal sistemlerde tekerlekli, paletli mekanizmalar ve elektrik motorları ile sağlanabileceği gibi [87] havai sistemlerde ise hava balonları veya kanatlı platformlar ve elektrik gücüyle çevrilen pervaneli itki mekanizmaları ile de sağlanabilir [8].

KAA tarafından toplanan verinin doğru analiz edilebilmesi için verinin hangi konumdan toplandığının bilinmesi gereklidir. Sabit konumlu algılayıcı düğümlerde konum değişmediği için konum bilgisinin sürekli elde edilmesine ihtiyaç duyulmazken gezgin sistemlerde sürekli değişen bu bilgi hayati önem taşır. Bu amaçla düğümlerde anlık konum bilgisinin tespiti için genellikle bir küresel yer bulma sistemi (İngilizce: Global Positioning System - GPS) modülü bulunur. GPS modülü sayesinde dış mekan uygulamalarında gerçek zamanlı olarak hassas konum tespiti yapılabilmektedir [51].

3.1.3 Kablosuz Algılayıcı Ağ Kullanımı Avantajları

KAA'ların kullanıldığı birçok uygulama bu ağların güçlü yanlarından faydalanaarak görevlerini yerine getirmektedir. Kablosuz algılayıcı ağların tercih edilmesini sağlayan en önemli kullanım avantajları aşağıda listelenmiştir [62].

- **Sağlamlık, zorlu çevre şartlarına karşı dayanıklılık**

Algılayıcı düğümlerin küçülen boyutları, farklı ortam koşullarında birbirleriyle haberleşebilmeleri ve istendiği takdirde sadece sınırlı düğümleri kapsa-

yacak bir iletişim kurabilme yeteneğine sahip olmaları onları birçok çalışma koşulunda kullanılabilir kılmaktadır. Örnek olarak sert hava koşullarına dayanıklı, orman yangınlarında hayatta kalabilen algılayıcı düğümlerin üretilmesi mümkündür.

- **Geniş ve tehlikeli alanları kapsayabilme**

Pek çok alanda, altyapı sorunları ve ekonomik durumlar nedeniyle kablolu ağların kullanılması mümkün olmayabilir. Örneğin, bir savaş alanında kablolu ağ altyapısı kurulması yararsız ve kullanışsız olacaktır. KAA'lar altyapı gerektirmemeleri ve düşük maliyetleri ile bu boşluğu kolaylıkla doldurabilirler.

- **Kendi kendini yönetebilme**

Ağ bulma ve çok atlamalı haberleşme yetenekleri ile KAA'lar kurulum aşamalarında kendilerini çok kısa sürelerde organize edebilir. Bu önemli bir gereksinimdir çünkü bu sayede ağı kuracak kişinin özel eğitilmiş bir personel olmasına gerek kalmaz. Sistemi kullanacak kişinin sadece sistemi açması yeterlidir. Geri kalan işlemleri sistem kendiliğinden otomatik olarak yönetir.

- **Düğüm hatalarına karşı dayanıklılık**

KAA'lar tahrip olan ya da ölen düğümlerden kaynaklanan iletişim hatalarını sadece başka bir yönlendirme yolunun kullanılmasıyla üstesinden gelebilir. Örnek olarak, savaş sırasında, düşmanın bir gözetleme algılayıcı düğümünü tahrip etmesi, bütün bu ağın çalışmasını etkilemez.

- **Düğümlerin hareket edebilmesi**

Algılayıcı düğümlerin hareket edebilmeleri son birkaç yıl içerisinde önemli bir araştırma alanı olmuştur. Örneğin, hareketli araçları takip etmek için kullanılan algılayıcı düğümlerin sürekli konum değiştirmeleri gereklidir. Modern KAA protokolleri ve mimarileri bu konumsal değişikliklere karşı dayanıklıdır ve veri yönlendirmesini sağlıklı bir şekilde muhafaza edebilir.

- **Devingen ağ topolojisi**

KAA'lar dinamik olarak değişebilen bir ağ yapısına sahip olabilirler. Ağ yapısının değişmesi durumunda düğüm komşulukları tekrar tespit edilerek yönlendirme ilişkileri düğümler tarafından korunabilir. Örnek olarak, eğer ağ üzerinde verilerin toplandığı ana düğüm bir şekilde devre dışı kalırsa başka bir algılayıcı düğüm bu görevi rahatlıkla devralabilir. Bu değişiklik

ağ topolojisi üzerinde de bir değişikliğe neden olur ve dolayısıyla ağdaki yönlendirme ilişkileri tekrar hesaplanır.

- **Heterojen düğüm yapısı kullanabilme**

Algılayıcı düğümlerin izlediği veriler algılayıcılardan toplandıktan sonra dijital sinyallere dönüştürülür ve daha sonra diğer düğümlere iletilir. Bir KAA üzerinde özel düğümler tarafından farklı algılayıcıların birlikte kullanılabilmesi unutulmamalıdır. Her düğüm üzerine birbirinden farklı algılayıcılar bulunabilir. Bu sayede, uygulamalarda farklı algılayıcı teknolojilerinin heterojen olarak kullanılması sayesinde toplanan verilerinin birlikte değerlendirilmesiyle daha anlamlı sonuçlar alınması mümkündür.

- **Müdahaleye gerek duymadan çalışabilme**

Doğru yapılandırılmış ve doğru tasarlanmış bir KAA sisteminin gözetimsiz olarak çalışması mümkün olmaktadır. Bu sayede sistemin kurulması ve yönetimi için gereken çalışma zamanı kısalmış ve sistem yöneticisine olan gereksinim en aza inmiştir. Bu avantaj özellikle ev uygulamaları alanında düşük bir çaba ile sistemden faydalanmak isteyen eğitimsiz kullanıcılar için oldukça önemlidir.

3.1.4 Kablosuz Algılayıcı Ağ Kısıtları

Kablosuz algılayıcı ağların kullanımında karşılaşılan kısıtlamalar genellikle sınırlı enerji kaynağı, düşük bant genişliği, haberleşme hataları ve güvenlik problemleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu kısıtların açıklamaları aşağıda daha detaylıca anlatılmıştır.

- **Sınırlı enerji kaynağı**

Sabit bir altyapı yokluğu nedeniyle, kablosuz algılayıcı düğümler bataryaları tarafından sağlanan sınırlı enerjiyi dikkatli ve dengeli bir şekilde harcamak zorundadırlar. Bu ise, algılayıcı düğümlerin hesaplama gücünü, kullanabilecekleri hafıza miktarını sınırlar ve yüksek enerji maliyetleri nedeniyle tam bant genişliği kullanımını da sınırlar. Benzer şekilde sadece batarya gücünün kullanılması belirli bir çalışma zamanı sonrasında algılayıcı düğümlerin enerjisinin tamamını tüketerek öleceği anlamına gelmektedir. Diğer sonuçların yanı sıra, bu gerçek unutulmaması gereken ciddi güvenlik sorunlarına da (madde 4) yol açabilir.

- **Düşük bant genişliği**

Genel olarak kablosuz algılayıcı ağların en büyük problemlerinden biri düşük veri hızlarıdır. Belirli bir süre içerisinde iletilebilecek maksimum veri miktarı, kullanılan frekansa bağlıdır. Daha yüksek frekans kullanımı daha yüksek veri hızlarını mümkün kılarken, aynı zamanda daha fazla parazit oluşmasına da neden olur. Bu bizi kablosuz ağların hiçbir zaman onların kablolu kardeşleri kadar hızlı olamayacağı gerçeğine götürür.

- **Haberleşme hataları**

Kablosuz ağlar doğaları gereği kendi kablolu muadillerine göre daha yüksek hata oranlarına sahiptir ve paket kaybı gibi sorunlara karşı oldukça savunmasızdırlar. Kablosuz RF haberleşmesi paketlerin iletimi için elektromanyetik dalgaları kullanır ve bu dalgalar yansıma, kırılma, kırınım veya saçılma gibi doğal olgulardan etkilenebilir. Bu olgular veri paketlerini parçalara bölerek veya karıştırarak veri iletiminde hataların ortaya çıkmasına neden olabilir.

- **Güvenlik problemleri**

Genel olarak Kablosuz ağlar kablolu sistemlere nazaran dışarıdan yapılacak olan saldırılara karşı çok daha hassastır. Kablosuz haberleşme kanalına istenmeyen dinleyiciler tarafından kolaylıkla erişim sağlanabilir ve birçok pasif veya aktif saldırı düzenlenebilir. Şifreleme gibi yöntemlerin de kısıtlı enerji kaynakları kullanılması nedeniyle oldukça sınırlı olarak yapılabilmesi güvenlik sorunlarını daha da güçlendirir.

3.1.5 Kablosuz Algılayıcı Ağ Çeşitleri

Kablosuz algılayıcı ağlar eğer kullanım alanlarına göre birbirlerinden ayrılacak olursa aşağıdaki gibi bir sınıflandırma yapılabilir:

- Karasal Kablosuz Algılayıcı Ağlar
- Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlar
- Havai Kablosuz Algılayıcı Ağlar
- Yeraltı Kablosuz Algılayıcı Ağlar
- Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlar

- Hareketli Kablosuz Algılayıcı Ağlar

3.1.6 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Araştırmaya Açık Konular

Giderek gelişen ve sürekli yeni araştırma alanlarının ortaya çıktığı kablosuz algılayıcı ağlar oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. KAA'larda halen araştırmaya açık olan popüler araştırma konu başlıkları aşağıda listelenmiştir [5]. Bu alanlarda yapılacak başarılı çalışmalar sonucunda KAA'lar önümüzdeki yıllarda kendilerinden daha fazla ses getirebilir.

- Kablosuz algılayıcı ağlarda hata tespiti
- Hareketli düğümlerin bulunduğu kablosuz algılayıcı ağlar
- Kablosuz algılayıcı ağlarda enerji verimliliğinin artırılması
- Kapalı alanlarda konum tespiti ve konum tabanlı servislerin KAA'lar ile sağlanması
- Düşük maliyetli algılayıcı düğümlerin üretilmesi
- Kablosuz algılayıcı ağlarda donanım ve yazılım eniyilemesi
- Kablosuz algılayıcı ağlarda güvenliğin artırılması
- Mevcut haberleşme protokollerinin iyileştirilmesi
- Çoklu ortam Kablosuz algılayıcı ağlar
- Kablosuz algılayıcı ağlarda toplanan veri boyutunun küçültülmesi
- Kablosuz algılayıcı ağlarda yönlendirme ve verimli ağ altyapılarının oluşturulması
- Veri depolama alanlarının ve işleme kapasitelerin artırılması

3.2 Matematiksel Eniyileme

Pratik olarak eniyileme verilen bir problemdeki mümkün olan en iyi sonucun sahip olunan kaynaklar kullanılarak elde edilebilmesi sanatı ve bilimidir. Günümüzde eniyileme teknikleri endüstriyel planlamadan kaynak tahsisi ve karar verme problemlerinin çözülmesine kadar pek çok alanda kullanılan metotlardır. Örnek olarak, petrol ürünleri üreten küresel bir firmanın en yüksek kârı elde edebilmesi için ham petrolü nereden satın alacağına, nerede rafine edeceğine, hangi ürünlere dönüştüreceğine ve bu ürünleri nerelere ve hangi fiyatlara satacağına karar vermesi problemi nasıl çözülmelidir? Bu problemin çözümü için bir en yüksek kâr eniyilemesi modeli kullanılabilir. Diğer bir problem olarak, örneğin bir havayolu firması en düşük maliyeti elde edebilmek için uçaklarını nasıl bir rota üzerinden uçurmalı ve mürettebatını ne şekilde görevlendirmelidir? Bu problemde ise bir en küçük maliyet eniyileme modeli kullanılabilir.

Günümüzde kullanılan büyük ölçekli eniyileme yöntemlerinin bir çoğunun temelleri II. Dünya Savaşı yıllarında atılmıştır. Savaşta sınırlı kaynaklar kullanılarak ortaya koyulan çabanın etkinliğini artırabilecek her türlü tekniğe ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple milyonlarca asker ve teçhizatın kullanıldığı bu yıllarda büyük orduların lojistik problemlerini çözmek için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Çözüm aranan problemlere örnek olarak araçlara yakıt sağlayan yakıt istasyonlarının en uygun nerelerde konumlandırılacağı ve anti-denizaltı devriyeleri için en uygun arama ve bombalama deseninin ne olduğu gibi problemler verilebilir.

Geniş ölçekli matematiksel eniyileme yöntemlerinin temelini oluşturan ilk eniyileme uygulaması olan Simpleks metodu George Dantzig tarafından yine II. Dünya Savaşı yıllarında (1947) geliştirilmiştir. Savaştan sonra ilk bilgisayarların kullanılmaya başlanması ile yöntem daha da iyileştirilmiş ve hemen hemen her sektörde kullanılmaya başlanmıştır [25].

Bilgisayarların kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda bilgisayarlarda çalışan eniyileme hesaplamalarının büyük bir kısmı da yine Simpleks metodunu kullanmıştır. Özellikle bankacılık, eğitim sektörlerinde ve askeri alanda eniyileme problemlerinin çözümünde Simpleks metodu yaygınlıkla kullanılmıştır. Günümüzde ise matematiksel eniyileme yöntemleri işletme, ekonomi ve muhasebe ile ilgili alanları çok yakından ilgilendirmektedir.

Matematiksel eniyileme, kullanılan tekniklere göre doğrusal programlama (DP),

doğrusal olmayan programlama, tamsayı programlama (TP), karma tamsayı programlama (KTP), konveks programlama gibi alt dallara ayrılmaktadır. Takip eden alt bölümlerde bu tez çalışmasında kullanılan doğrusal programlama ve tamsayı programlama teknikleri anlatılacaktır.

3.2.1 Doğrusal Programlama (DP)

Doğrusal programlama en yaygın olarak kullanılan kısıtlı eniyileme tekniklerinden biridir. Burada "Programlama" kelimesi bilgisayar programlama anlamında değil, eskiden daha çok kullanılan diğer bir manası olan "planlama" anlamında kullanılmıştır. Doğrusal programlamada kullanılan gerçek dünya süreçlerinin altında yatan akla gelebilecek bütün modeller doğrusaldır; dolayısıyla "doğrusal programlama" aslında "doğrusal modeller kullanılarak planlama yapma" şeklinde düşünülmelidir. Kısaca doğrusal programlama, doğrusal denklemlerden oluşan bir matematiksel modeldeki en iyi sonuca (en yüksek kâr ya da en düşük maliyet gibi) ulaşabilmek için kullanılan planlama modelidir.

1920'lerde, Sovyet Rusya'da ekonomi ile ilgili konuların ön planda olduğu zamanlarda ülke ekonomisinin nasıl planlanabileceğini göstermek için yapılan teorik çalışmalar sırasında ilk defa bir doğrusal programlama problemi tanımlayan Leonid Kantoroviç tarafından yapılmıştır. Ne yazık ki teoremin pratik olarak planlamaya uygulanmasındaki imkansızlık ve ideolojik nedenler nedeniyle Kantoroviç'in bu çalışmasının önemi ancak II. Dünya Savaşından sonra anlaşılabilmiştir. II. Dünya Savaşı sırasında Birleşik Amerika'da ortaya çıkan lojistik tahsis problemlerini incelemek için George Dantzig'in başkanlığında kurulan bir araştırma grubu bu tür sorunların çözülmesi için doğrusal programlama probleminin tanımlanması gereğini ortaya çıkartmış ve bu türlü doğrusal programlama problemlerinin çözümü için Simpleks algoritması adını verdikleri bir çözüm sistemi öne sürmüştür.

Geliştirilen bu çözüm sisteminin özellikle maliyetleri ve getirileri planlamak suretiyle harp masraflarının kısılmasına yol açtığı açıkça görüldüğü için bu teorik ve pratik gelişmeler 1947'ye kadar devlet sırrı olarak saklı kalmıştır. Yine 1947 yılında John von Neumann, oyun teorisi ile ilgileniyorken, ikincilik (duality) teorisini geliştirerek doğrusal programlamaya önemli katkıda bulunmuştur. O zamana kadar doğrusal programlamaya yaptıkları katkılar nedeni ile Kantoroviç, Dantzig ve von Neumann'a 1975 yılında Nobel Ekonomi ödülü verilmiştir.

1947'den sonra geliştirilen bilgisayar uygulamaları ile birlikte özellikle büyük sanayi birimleri ve büyük devlet projeleri için birçok doğrusal programlama problemi tanımlanmış ve Simpleks algoritması ile çözülüp pratikte kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin petrol rafine şirketleri çok girdili ve çok çıktılı günlük üretim planlamaları için doğrusal programlama çözümlerini devamlı kullanmaya başlamışlardır.

1979'da Leonid Hacıyan doğrusal programlama probleminin polinomsal zaman içinde çözülebileceğini ilk defa ispat etmiştir. Bu alanda çok daha önemli teorik ve pratik gelişmeler 1984'te Narendra Karmarkar'ın doğrusal programlama problemlerin çözülmesi için (Simpleks algoritması yerine) ara nokta yöntemini öne sürmesi ile yeni bir boyut kazanmıştır. Zamanımızda doğrusal problemlerin çözümünde yoğunlukla Karmarkar'ın temellerini atmış olduğu bu yöntemler kullanılmaktadır.

Doğrusal programlama kullanılmasının pratik yararlılığının ispat edildiği ilk problemlerden biri olan Dantzig tarafından ortaya atılmış 70 kişinin 70 göreve karar verici olarak atanması örneği biraz daha ayrıntılı olarak incelendiğinde daha iyi anlaşılabilir. Bu problemde kişilerin görevlere en iyi sonucu verecek şekilde tahsis edilmesi için eğer bütün olası durumlar teker teker elden geçirilip amaca yaptığı katkılar bulunmak istenirse bu kadar büyük sayıda bir permütasyonun elden geçirilmesinin imkânsız olduğu ortaya çıkar; çünkü gerekli permütasyon sayısı neredeyse bütün evrende bulunan parçacıkların sayısına yakındır. Bu problemin bilgisayarla Simpleks algoritması kullanılarak çözülmesi saniyeler bile sürmemektedir. Doğrusal programlama kuramı arkasında bulunan teori, kontrol edilmesi gereken mümkün en iyi çözüm sayısını çok etkili şekilde azalttığı için çözüm süresi inanılmaz derecede kısaldı. Burada problemin çözümünde zaman alan asıl kısmın sadece problemin doğrusal programlama modeline dönüştürülmesi ve bilgisayara olan girdisinin hazırlanması olmaktadır.

Bir matematiksel eniyileme modeli eğer sürekli değişkenlere ve tek bir doğrusal amaç fonksiyonuna sahipse ve tüm kısıtlamaları doğrusal eşitlik veya eşitsizliklerden oluşuyorsa, doğrusal (lineer) program olarak adlandırılır. Başka bir deyişle, modelin tek-amaçlı fonksiyonu ve tüm kısıtlamaları, süreklilik gösteren karar değişkenlerinden oluşmalıdır.

Model, bir sistemin değişen koşullar altındaki davranışlarının incelenmesi, kontrol edilmesi ve geleceği hakkında varsayımlarda bulunulması amacı ile sistemin ele-

manları arasındaki ilişkilerin kelimeler ya da matematiksel formüller yardımı ile belirlenmesine verilen addır. Matematiksel model ise bir sistemin elemanlarının simgeler ile tanımlandıktan sonra aralarındaki ilişkilerin fonksiyonlar ile gösterilmesine verilen addır. Doğrusal Programlamada her bir eniyileme probleminin öncelikle matematiksel olarak modellenmesi gereklidir. Doğrusal programlama için oluşturulan bir modelde üç farklı bileşen bulunur [23]. Bu bileşenler aşağıda açıklanmıştır.

- **Karar değişkenleri ve değişken sınırları**

Örneğin üretilecek ürünlerin miktarları gibi genelde ayarlanabilen veya kontrol edilebilen sayısal büyüklükler için kullanılan değişkenlerin değerleri problemin başlangıcında bilinmemektedir. Sadece değişkenler için belirli limitler ve pozitiflik veya negatiflik gibi ön tanımlamalar yapılabilir. Burada yapılmak istenen doğrusal programlama modelindeki amaç fonksiyonunun en iyi değerini veren değişken değerlerinin bulunmasıdır.

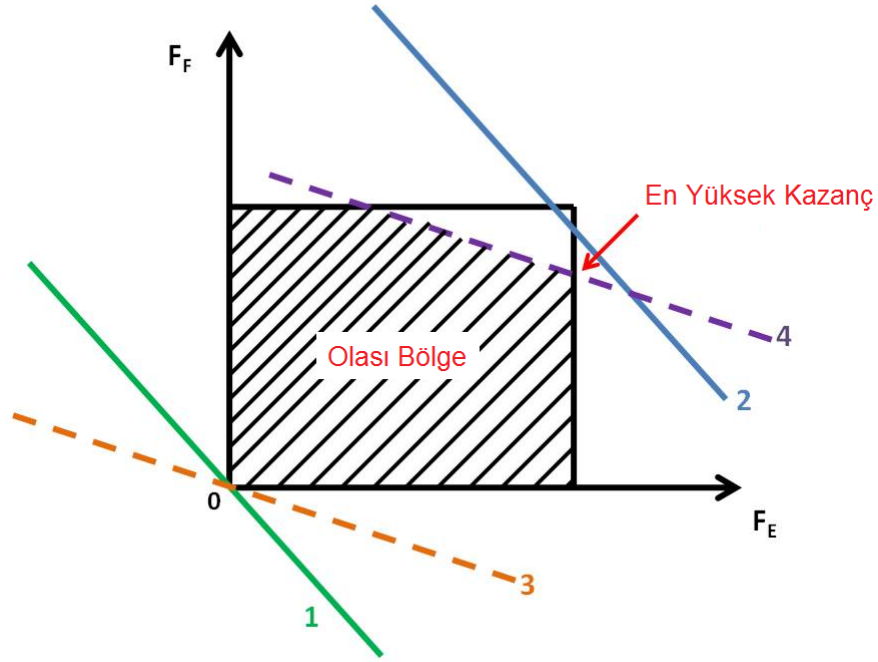
- **Kısıtlamalar**

Bir Doğrusal Programlama problemi, karar değişkenlerinin alacağı değerleri sınırlayan belirli kısıtlar içermelidir. Burada her bir kısıt doğrusal eşitlik ya da eşitsizlikler ile tanımlanır. Tanımlanan her bir kısıt mevcut çözüm uzayını biraz daha küçülterek olası çözümlerin sayısının azalmasına neden olur. Örneğin bir gerçek dünya probleminde üretim hattında çalışan işçi sayısı, üretim bandı sayısı ve tüketilebilecek en fazla hammadde miktarı gibi tanımlamaların her biri birer kısıtı oluşturur.

- **Amaç fonksiyon**

Her bir DP problemi bir amaç fonksiyon ve eniyilenecek karar değişkenleri içermelidir. Burada amaç fonksiyonu karar değişkenlerinin (x_1, x_2, \dots, x_n) doğrusal bir fonksiyonudur. Amaç fonksiyonu enbüyükleme ya da enküçükleme olacak şekilde tanımlanabilir. Gerçek dünya problemlerinde seçilen amaçlara örnek olarak üretimdeki maliyetler toplamının enküçüklenmesi veya yapılacak kârın enbüyüklenmesi verilebilir.

Şekil 3.4'te örnek olarak bir doğrusal programlama problemi için var olan doğrusal kısıtlar, mümkün olabilecek olası çözüm bölgesi ve en yüksek kazanç noktası gösterilmiştir. Şekil üzerinde doğrusal eğriler modelde bulunan doğrusal kısıtlar tarafından üretilmişlerdir. Bu doğrular arasında kalan taralı bölge ise çözüm



Şekil 3.4: Örnek bir doğrusal programlama problemi için mümkün olabilecek olası çözüm bölgesi ve en yüksek kazanç noktası gösterimi.

bölgesini temsil etmektedir. Yani, bu alan içerisindeki her çözüm model için sağlanmaktadır. Ancak bu çözümlerden en iyi çözümü veren, yani verilen doğrusal programlama modelindeki amaç fonksiyonunun en yüksek değeri aldığı sadece tek bir nokta bulunmaktadır. Bu nokta ise şekil üzerinde kırmızı ok ile gösterilmiş olan optimum noktadır.

3.2.2 Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP)

Karma tamsayılı doğrusal programlama, kullanılan bazı karar değişkenlerinin -1, 0, 1, 2, gibi tam sayılar almak zorunda olduğu programlama modellerine verilen addır. Bu tip problemlerde en iyi sonuca bu şartlar altında ulaşılması gerekmektedir.

Tamsayı değişkenlerin kullanımı problemlerin gerçek dünyaya olan uyarlanabilirliğini büyük ölçüde artırdığı için oluşturulabilecek eniyileme problemlerinin kapsamını da oldukça genişletir. Örnek olarak gerçek hayatta bir takıma 4 veya 5 kişi atanabilirken, 4.3 kişilik bir takım oluşturulması mümkün değildir. Ya da 1/0 şeklinde ikili değişkenler şeklinde evet/hayır kararları temsil edilebilir. Bu amaçla

tamsayıların bir alt kümesini oluşturan ikili tamsayı değişkenlerin kullanılması gereklidir.

Tamsayı değişkenler kullanılması gereken problemlere örnek olarak aşağıdaki problemler verilebilir:

- Çalışanların belirli işlere atandığı bir atama probleminde en uygun kişilerin kendilerine en uygun işlere atanması bir TP problemidir. Kişi sayısı tamsayı olarak belirlenmek zorundadır.
- Bir üniversitede öğretim görevlileri, derslikleri, dersleri ve öğrencileri çakışma olmadan dağıtma işlemi yine bir ikili TP problemidir. Bir öğrenci aynı anda birden fazla sınıfta birden ders alamaz.
- Bir kablosuz algılama ağı üzerinde ağ ömrünü enbüyükleyecek şekilde iletişim paketlerinin taşınması problemi yine bir KTDP problemidir. Bu problemde taşınan iletişim paketlerin sayısı tam sayı olmak zorundadır.
- Taşınması gereken kargo paketleri için gereken araç sayısının belirlenmesi bir TP problemidir. Burada araç ve kargo sayısı değişkenleri sadece tamsayı değerler alabilirler.

TP problemlerinin çözümünde karşılaşılan genel hatalardan birisi; bu problemlerin çözümünde, Doğrusal Problemlerin çözümündeki reel değişkenlere en yakın tamsayı değerlerin seçilerek en uygun sonuçların elde edilebileceği kanısıdır. Bir çok örnek ile bu yöntemin her zaman doğru sonucu veren bir yöntem olmadığı ispatlanabilir. Bu sebeple TP problemlerinin çözümü için "dallandır ve sınırlandır veya buda" (ingilizce: branch and bound) benzeri yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler tamsayı çözümlerinin bir ağaç yapısında numaralandırılabilmesi gözlemine dayanmaktadır. Bu yöntemlerde tamsayı değerlerinden oluşan çözüm ağacı büyüdükçe çözüme uygun olmayan dallar sınırlandırılır, uygulanması mümkün olmayan dallar ise budanır. Son olarak ağacın bir dalında eniyilenmiş çözümü garanti ettiği tespit edilen veya eniyilenmiş çözüme önceden belirlenmiş bir oranda yakınsayan bir çözüme erişildiğinde ağacın genişletilmesine son verilerek eniyileme sonlandırılır.

Bu tez çalışmasında ise KAA'larda bir iletişim ağı eniyilemesi gerçekleştirildiği için tamsayılar ile birlikte gerçek sayı ve ikili tamsayı tipinde değişkenlerin de

bulunduğu bir Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP) modellemesi yapılmıştır.

3.3 Kullanılan Yazılım Ortamları

Çalışmalarda en çok kullanılan yazılım ortamları GAMS Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (İngilizce: The General Algebraic Modeling System - GAMS) ve MATLAB (İngilizce: Matrix Laboratory) olmuştur.

3.3.1 GAMS

Bu çalışmada geliştirilen matematiksel programlama modellerinin geliştirilmesi ve sayısal analizlerinin yapılabilmesi için GAMS genel cebirsel modelleme sistemi kullanılmıştır. GAMS modelleme ve eniyileme problemlerinin çözümü için kullanılan yüksek seviyeli bir programlama dilidir. İlk olarak eniyileme uzmanları Dr. Anthony Brooke ve Dr. Alexander Meeraus tarafından dünya bankası için geliştirilmiştir [15]. 1987 yılında ödül almasının ardından dünyaca tanınmaya başlamıştır. Programın en temel özelliği güçlü olmasının yanı sıra kullanım kolaylığı ve esnekliğidir. AMPL, CPLEX, GUROBI, LINGO, DICOPT gibi çözücü algoritmaları bünyesinde bulundurarak bu çözücüler üzerinden doğrusal, doğrusal olmayan ve karma tamsayı problemleri çözebilmekte ve çözüm yöntemini kolaylıkla değiştirebilmektedir.

GAMS programlama dilinde klasik programlama dillerindeki döngü yapıları ve koşullu ifadeler kullanılabilirdiğinden, model çözüldüğünde elde edilen eniyilenmiş değişken değerlerini kullanabilmek ve gerektiğinde modeli tekrar başka parametre değerleri ile çözdürebilmek mümkün olmaktadır. Bu sayede bir problem için en uygun parametre kümesi rahatlıkla tespit edilebilir.

3.3.2 MATLAB

İngilizce de MATrix LABoratory (Matris Laboratuvarı) kelimelerinin kısaltması olan MATLAB yüksek seviyeli bir teknik programlama dili olmasının yanı sıra algoritma geliştirme, verilerin görselleştirilmesi, sayısal analiz ve sayısal hesaplama

malar için de kullanılabilen etkileşimli bir yazılım paketidir [57]. MATLAB ile teknik hesaplama problemleri C, C++ ve Fortran gibi geleneksel programlama dillerinden daha hızlı bir şekilde çözülebilir.

MATLAB yazılımının bilimsel birçok alanda uygulamaları bulunmaktadır. MATLAB içerdiği “toolbox” adı verilen paketler aracılığı ile birçok alanda kullanılabilir. Özellikle mühendislik alanındaki sistemlerin analizinde kullanılan MATLAB, eniyileme (optimization), görüntü işleme (image processing), sinyal işleme (signal processing), yapay sinir ağları (artificial neural networks), bulanık mantık (fuzzy logic), dış ortamdan veri elde etme (data acquisition), sistem kimliklendirme (system identification), süzgeç tasarımı (filter design) gibi alanlar üzerinde çalışılabilecek bir ortam sunar [58].

Ayrıca MATLAB üzerinde güçlü bir grafiksel görselleştirme motoru bulunmaktadır. Bu sebeple, yapılan çalışmadaki eniyileme problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar MATLAB yardımıyla görselleştirilmiştir. Ayrıca öne sürülen baz istasyonu hareket örüntüleri ilk olarak MATLAB ortamında geliştirilmiş daha sonra GAMS ortamına aktarılmışlardır.

4. SİSTEM MODELİ

Problemde N_w algılayıcı düğümün algılama alanına rastgele olarak dağıtıldığı ve hareketli bir baz istasyonunun düğümlerden verileri topladığı bir algılayıcı ağı topolojisi kullanılmıştır. Topolojideki protokol hesaplamalarının yüksek miktarda enerjiye sahip olan baz istasyonu üzerinde merkezi bir şekilde yapıldığı düşünülmüştür. Protokol çalışması, kurulum ve veri toplama adımlarının ardı ardına sürekli tekrar etmesi şeklinde gerçekleşir. Kurulum aşamasında baz istasyonu konumlandırılması, veri toplama adımında ise diğer algılayıcı düğümlerden baz istasyonuna veri toplanması gerçekleştirilir.

Çalışmalarda gezgin veya sabit konumlu alıcı istasyonlarının¹ kullanılabildiği çok düğümlü bir ağ modeli düşünülmüştür. KAA üzerinde N_w sayıda algılayıcı düğüm bir arada farklı senaryolar altında test edilmek üzere rastgele olarak dağıtılmaktadır. Baz istasyonlarında hareket edebilme özelliği bulunmasına rağmen algılayıcı düğümlerde böyle bir özellik bulunmamaktadır.

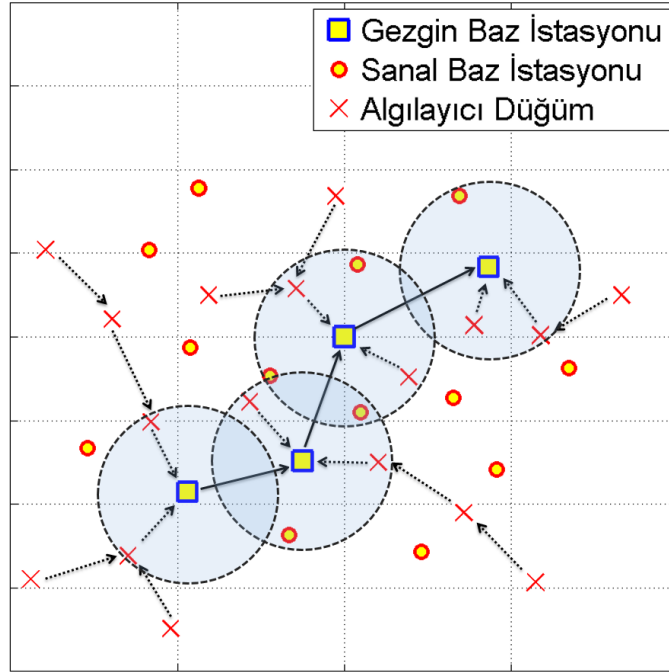
Çalışma boyunca ayrık her bir zaman dilimine tur olarak hitap edilmektedir. Algılayıcı düğümlerin her turda aynı miktarda veri ürettiği varsayılmıştır. Ayrıca veri paketleri baz istasyonuna ulaşana kadar parçalanmadan veya birleştirilmeden bir bütün olarak taşınmaktadır.

Baz istasyonları kendilerini Y ile tanımlanmış bir konum kümesi içindeki N_Y farklı pozisyon üzerinde konumlandırabilir ($|Y| = N_Y$). Bu konumlarda belirli bir süre duraklayan baz istasyonları bir sonraki duraklama noktasını² belirledikten sonra o konuma doğru hareket eder. Fakat baz istasyonlarının Y kümesindeki her bir konumu ziyaret etmesi zorunlu değildir. Başka bir deyişle, baz istasyonu KAA ömrünü eniyileyecek şekilde Y kümesinin bir alt kümesini seçerek sadece bu noktalarda duraklayabilir. Ek olarak, baz istasyonunun seçilen bu konum kümesindeki noktalarda bulunma süreleri de özdeş olmak zorunda değildir. Örnek vermek gerekirse baz istasyonu Y kümesi içindeki bazı konumları atlayabilir bazı konumlarda da daha uzun süreler kalabilir.

¹Baz istasyonu ve alıcı kelimeleri birbirleriyle eş anlamlı olarak kullanılmışlardır.

²Baz istasyonu duraklama noktaları ile sanal baz istasyonu konumları eş anlamlı olarak kullanılmıştır.

Sistem modelinin örnek bir gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu gösterimde kare şekilleri baz istasyonu konum kümesini, X şekilleri ise algılayıcı düğümleri temsil etmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi baz istasyonu bu konum kümesinin bir alt kümesi seçerek sadece bu noktalarda bulunmuştur. Şekil 4.1’de baz istasyonu duraklama kümesi sadece gölgelendirilmiş dört konumdan oluşmaktadır. Burada not edilmesi gereken bir diğer husus ise kullanılan iletişim modelinin çok-atlamalı (multi-hop) bir model olduğudur. Başka bir deyişle, baz istasyonu haberleşme menzili dışında bulunan algılayıcı düğümler topladıkları verileri taşıyıcı düğümler üzerinden baz istasyonuna ulaştırmak zorundadır.



Şekil 4.1: Gezin baz istasyonu, algılayıcı düğümler ve duraklama noktalarını gösteren sistem modeli.

4.1 Yaşam Süresi Modeli

Daha önce yapılmış olan birçok çalışmada ağın yaşam süresi sadece zaman birimleri cinsinden ölçülmekteydi. Fakat, yaşam süresinin kolaylıkla deney senaryosunda kullanılan parametrelere bağlı olarak (alan büyüklüğü, düğüm yoğunluğu) değişiklik göstermesi nedeniyle daha genel bir başarımlı ölçümü gerekmektedir. Bu sebeple çalışmada yürütülen benzetim deneylerinde başarımlı doğru ve tarafsız bir şekilde ölçülebilmesi ve doğru karşılaştırmaların yapılabilmesi için genelleştirilmiş bir ağ yaşam süresi modeli kullanımı önerilmiştir. Çalışmamızda yapılan

benzetim deneylerinde alınan sonuçlar karşılaştırma aşamasında deney parametrelerinden bağımsız bir birime dönüştürülerek ve sonrasında da normalleştirilerek kullanılmıştır.

Önerilen genelleştirilmiş yaşam süresi L' *bits m²/Joule* biriminden verilmiştir. Bu birim her birim enerji başına ne kadar verinin alan boyunca baz istasyonuna taşındığını belirtmektedir. Benzetim deneylerinde elde edilen zamansal ağ ömrü değerleri (L) aşağıdaki formül kullanılarak genelleştirilmiş ağ ömrü birimine (L') dönüştürülmektedir.

$$L' = L \left(\frac{rA}{E} \right), \quad (4.1)$$

Burada, L saniye biriminden klasik ağ ömrü değerini, r *bit/saniye* biriminde kullanılan bant genişliğini, A m^2 biriminde alan büyüklüğünü, son olarak E ise *Jul* birimde bütün düğümlerin depolanmış toplam enerjisini temsil etmektedir. Bu durumda Formül 4.1'den de anlaşılacağı üzere (L') değeri *bits m²/Joule* birimiyle üretilmekte ve son ölçüm değeri olarak kullanılmaktadır.

4.2 Enerji Modeli

Benzetim deneylerinde üzerinde yoğun olarak çalışılmış ve iyi tanınan Crossbow firmasının [83] üretmiş olduğu Mica2 algılayıcı düğümlerin enerji tüketim karakteristikleri kullanılmıştır [53]. Mica2 algılayıcı düğümler ana işlemci olarak bir Atmel Atmega 128L işlemcisi ve haberleşme için de Chipcon CC1000 haberleşme alıcı/vericisinden oluşur. Mica2 düğümlerde kullanılan CC1000 radyo vericisinin çıkış gücü 26 farklı enerji seviyesine ayarlanabilmektedir. Her bir güç seviyesi için bir saniyede harcanan veri gönderme enerjisi ve gönderim yapılabilecek maksimum uzaklıklar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Burada l . güç seviyesindeki güç tüketimi $E_{tx}^M(l)$ ve bu seviyedeki maksimum veri iletilebilecek mesafe $R_{max}^M(l)$ olarak tanımlanmıştır. Veri alımı için gereken enerjinin sabit olduğu varsayılmıştır ve E_{rx} ile ifade edilmektedir. Bu modelde düğümler her bir veri iletimi için en iyi iletim gücünü dinamik olarak iletim mesafesine göre seçmektedirler. Minimum ve maksimum veri gönderme mesafeleri sırasıyla l_{min} ve l_{max} olarak tanımlanmıştır. Bu modele göre i . düğümden j . düğüme veri gönderimi için gerekli olan minimum güç miktarını temsil eden $E_{ix}^M(d_{ij})$ ifadesi denklem 4.2'de hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.1: Mica2 KAA düğümlerinde her bir güç seviyesi için gönderme enerjisi ($\mu J/ bit$) ve gönderim yapılabilecek maksimum uzaklıklar (m) [53, 9]. Veri alımı enerjisi sabittir ($E_{rx} = 0.922\mu J$).

l	$E_{tx}^M(l)$	$R_{max}(l)$	l	$E_{tx}^M(l)$	$R_{max}(l)$
1 (l_{min})	0.672	19.30	14	0.844	41.19
2	0.688	20.46	15	0.867	43.67
3	0.703	21.69	16	1.078	46.29
4	0.706	22.69	17	1.133	49.07
5	0.711	24.38	18	1.135	52.01
6	0.724	25.84	19	1.180	55.13
7	0.727	27.39	20	1.234	58.44
8	0.742	29.03	21	1.313	61.95
9	0.758	30.78	22	1.344	65.67
10	0.773	32.62	23	1.445	69.61
11	0.789	34.58	24	1.500	73.79
12	0.813	36.66	25	1.664	78.22
13	0.818	38.86	26 (l_{max})	1.984	82.92

$$E_{tx}^M(d_{ij}) = \begin{cases} \infty & \text{if } d_{ij} > R_{max}^M(l_{max}) \\ E_{tx}^M(l_{min}) & \text{else if } d_{ij} \leq R_{max}^M(l_{min}) \\ E_{tx}^M(l+1) & \text{else if } R_{max}^M(l) < d_{ij} \leq R_{max}^M(l+1) \end{cases} \quad (4.2)$$

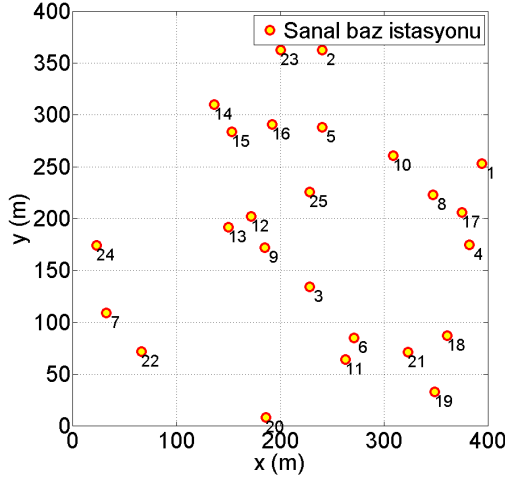
Örnek olarak, $d_{ij} = 50m$ mesafedeki ($49.07 < d_{ij} < 52.01$) bir düğüme yapılacak bir veri iletimi için i . düğüm 18. güç seviyesinde veri iletimi yapar ve bataryasından $1.135 \mu J$ enerji tüketir ($E_{tx}^M(d_{ij}) = 1.135 \mu J$).

4.3 Hareket Örüntüleri

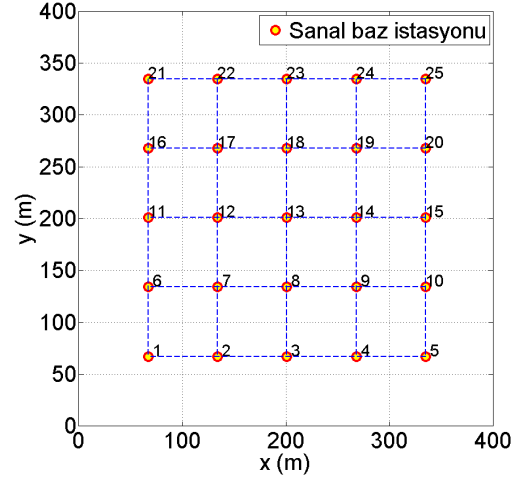
Bu çalışmanın en önemli amaçlarından biri gezgin bir baz istasyonu için en verimli hareket örüntüsünü diğer bir deyişle de en verimli duraklama noktalarının belirlenmesidir.

Bu amaçla çeşitli seçenekler arasında yapılan geniş bir sayısal ön değerlendirme sonucunda dört farklı baz istasyonu hareket örüntüsü kullanılmasında karar kılındı. Seçilen hareket örüntülerinin gösterimleri sırasıyla Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu hareket örüntüleri sırasıyla; rastgele 4.2(a), ızgara 4.2(b), spiral 4.2(c) ve eniyelenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsüdür 4.2(d). Bu hareket örüntüleri sahip

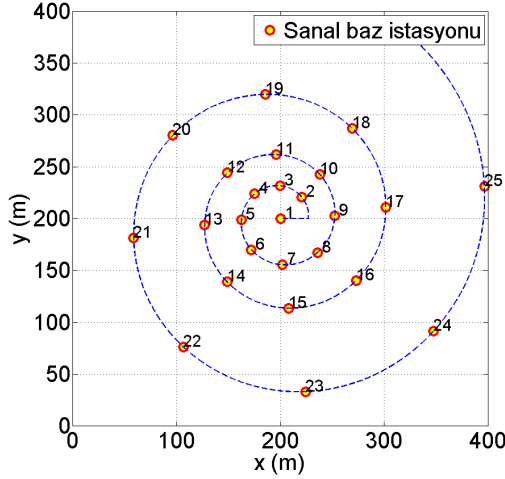
oldukları dağılımlar yönünde iki farklı gruba ayrılabilir. Birinci grup düzgün dağılımlı örüntüler olan rastgele ve ızgara hareket örüntülerinden oluşurken, ikinci grup ise düzgün bir dağılıma sahip olmayan spiral ve Gauss dağılımlı³ hareket örüntülerinden oluşmaktadır. Yapılan bu ayrımın nedeni yoğun-bölge probleminin etkisini düzgün bir dağılım yerine merkez yoğunluklu bir dağılım üzerinde daha çok etkili olmasından kaynaklanmaktadır.



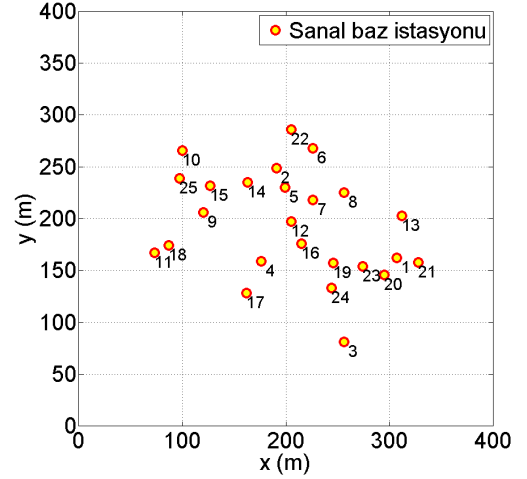
(a) Rastgele



(b) Izgara



(c) Spiral



(d) Gauss ($\sigma = 60$)

Şekil 4.2: Deneylerde kullanılan baz istasyonu hareket örüntüsü konum kümesi örnekleri (verilen konum numaralandırmaları kullanım sırasını ifade etmez).

Bu çalışmada baz istasyonu hareketi için öne sürülen spiral ve eniyilenmiş gauss dağılımlı hareket örüntüleri literatürde ilk kez kullanılmışlardır. Rastgele ve ızgara

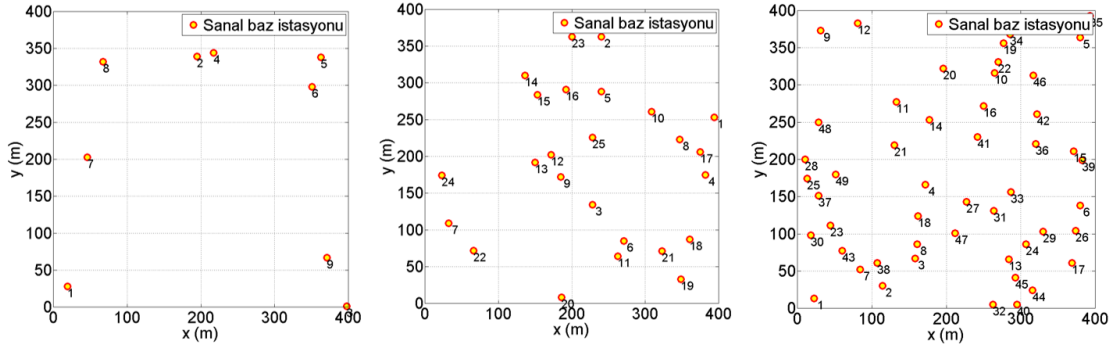
³Gauss dağılımı, Eniyilenmiş Gauss Dağılımlı Hareket Örüntüsü anlamında kullanılmıştır

hareket örüntüleri iyi bilinen örüntüler olmaları nedeniyle [22, 77], spiral ve gauss dağılımlı hareket örüntülerinin başarımlarının karşılaştırılmasında kriter olarak seçilmişlerdir.

4.3.1 Rastgele Hareket Örüntüsü

Şekil 4.2(a)'da örneği verilen rastgele hareket örüntüsü sabit konumlu baz istasyonu modeline karşı alternatif olarak önerilmiş ilk gezgin baz istasyonu hareket örüntülerinden birisidir [22]. Rastgele hareket örüntüsünde Y konum kümesi üyeleri alan üzerinden düzgün rastgele dağılımla seçilmiş konumlardan oluşmaktadır. Bu küme içerisinde baz istasyonunun bulunabileceği N_Y farklı aday baz istasyonu konumu bulunmaktadır. Baz istasyonunu bu konum kümesinin bir alt kümesi olan Z üzerinde kendisini konumlandırabilir yani baz istasyonu Y kümesindeki bütün konumları ziyaret etmek zorunda değildir ($Z \subseteq Y$).

Şekil 4.3'de örnek olarak $300 \times 300m^2$ algılama alanında gezgin baz istasyonu için üretilen 9, 25 ve 36 noktalı rastgele hareket örüntüsü konum kümeleri verilmiştir.



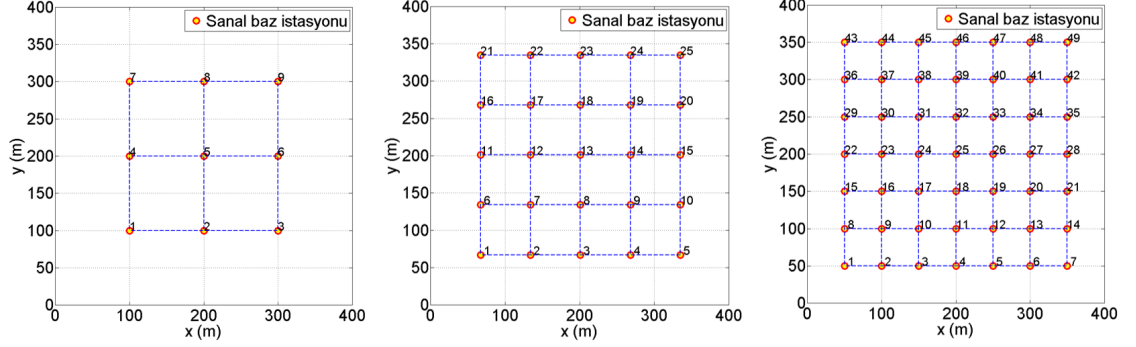
Şekil 4.3: 9, 25 ve 49 noktalı rastgele hareket örüntüsü konum kümeleri (Y).

4.3.2 Izgara Hareket Örüntüsü

Örnek bir dağılımı Şekil 4.2(b)'de verilen ızgara hareket örüntüsü rastgele hareket örüntüsünün geliştirilmiş bir versiyonudur. Ağ üzerinde homojen dağılıma sahip baz istasyonu konumlarından oluşan ızgara hareket örüntüsü algılama alanının iki boyutlu, düzenli bir örnekleme olarak düşünülebilir [77]. Şekil 4.4'te örnek olarak $300 \times 300m^2$ algılama alanında gezgin baz istasyonu için üretilen 9, 25 ve

49 noktalı ızgara hareket örüntüsü konum kümeleri verilmiştir. Burada verilen konum numaralandırmaları kullanım sırasını ifade etmemektedir. Baz istasyonu kendi seçtiği bir sırada istediği konumları ziyaret edebilir.

$$|N_y| = \{x^2 \mid (1 \leq x \leq 7)\} \quad (4.3)$$



Şekil 4.4: 9, 25 ve 49 noktalı ızgara hareket örüntüsü konum kümeleri (Y).

4.3.3 Spiral Hareket Örüntüsü

Spiral hareket örüntüsü literatürde baz istasyonlarının hareketlerini kontrol etmek amacıyla ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır. Önceki hareketlilik örüntülerinin aksine, spiral hareket örüntüsü düzgün olmayan merkez yoğun bir dağılıma sahiptir. Bu örüntü arama alanını merkezden başlayarak giderek azalan bir yoğunlukla taramaktadır.

Spiral hareket örüntüsü yoğun-bölge problemine bir çare olabileceği için aday olarak öne sürülmüştür. Burada amaçlanan, yoğun-bölge probleminde diğer düğümlerden gelen verileri üzerlerinden baz istasyonuna aktarmakta olan merkeze yakın bölgelerdeki düğümlerin (röle düğümler) harcamış oldukları enerjileri azaltmak ve bu düğümlerin diğer düğümlerden daha erken ölerek KAA yaşam süresinde bir darboğaz oluşturmasına engel olmaktır.

Spiral hareket örüntüsünde, Y konum kümesi üyeleri algılama alanında, ağın geometrik merkezinden (ağırlık merkezi) başlayarak sarmal şekilli bir gezinti rotası üzerinde belirli sabit aralıklarla seçilmiş noktalardan oluşur. Noktalar üzerindeki aralıklar eğri radyal büyüklüğünün nokta sayısına bölünmesi ile elde edilir. Bu-

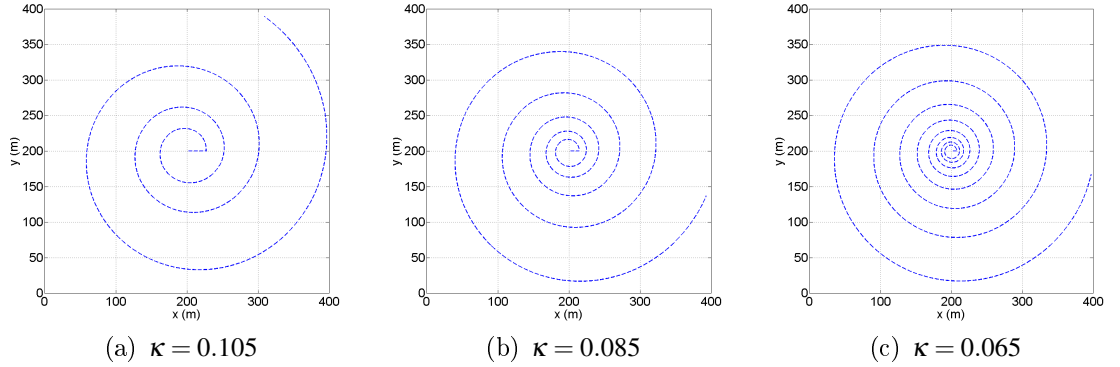
rada yoğun-bölge problemi ile daha iyi mücadele edilmesi amacıyla $N_y = 1$ için olan konum değeri algılayıcı düğüm dağılımının ağırlık merkezi olarak seçilmektedir.

Benzetimlerde kullanılan spiral eğrisi 4.4 ve 4.5 numaralı denklemler kullanılarak oluşturulmaktadır:

$$x(\sigma) = e^{\kappa\sigma} \cos(\sigma) \quad (4.4)$$

$$y(\sigma) = e^{\kappa\sigma} \sin(\sigma) \quad (4.5)$$

Spiral eğrisinin büyüklük ve yoğunluğu κ ve σ parametreleri kullanılarak ayarlanmaktadır. Burada κ parametresi spiral eğrisinin büyüme hızını ve σ parametresi de eğrinin uzunluğunu belirlemektedir. Örnek olarak Şekil 4.5'te üç farklı yoğunlukta spiral eğrisi ($\kappa = 0.065, 0.085, 0.105$) gösterilmiştir. Benzetim deneylerinde yeterli bir düzensizlik sağlayabilmek için κ parametresi 0.085 olarak belirlenmiştir.

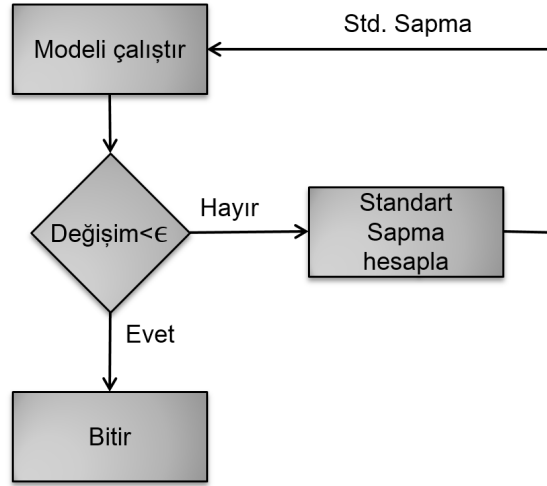


Şekil 4.5: Farklı κ değerleri için çizilmiş spiral eğrileri.

Benzer şekilde σ değişkeni (radyan cinsinden) deneysel algılama alanının sınırları ile orantılı olarak ayarlanmalıdır. Diğer bir deyişle, σ değişkeninin maksimum değeri algılama alanını tam olarak dolduracak bir sarmal eğrisi oluşturacak şekilde yeterince büyük seçilmelidir. Eğri üzerinde kaç adet konum bulunacağı ise deney senaryosundaki baz istasyonu konum kümesi büyüklüğü tarafından belirlenmektedir.

4.3.4 Eniyilenmiş Gauss Dağılımlı Hareket Örüntüsü

Bu çalışmada geliştirilen eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsü spiral hareket örüntüsü gibi düzgün dağılımlı olmayan bir modeldir. Fakat bu örüntüde aday baz istasyonu konumları spiral örüntüsündeki logaritmik sarmal eğrisinden farklı olarak bir Gauss dağılımı kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu yöntemde Gauss dağılımının standart sapması değiştirilerek aday baz istasyonu konumlarının ağı merkezine olan ortalama mesafeleri belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, algılama alanının dışına karşılık gelen konumlar kullanılmamış ve tekrar üretilerek bütün aday konumların alan içerisinde yer almaları sağlanmıştır.



Şekil 4.6: Eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsü akış şeması.

Eniyilenmiş Gauss dağılımında o anki deney senaryo parametreleri için en uygun standart sapma ve ortalama değerinin hesaplanması sağlanmaktadır. Önerilen modele göre kullanılacak en iyi standart sapma değeri her farklı deney senaryosu için önceden yapılmış eniyilemeye dayalı olarak seçilir. Önerilen algoritmanın örnek bir akış şeması Şekil 4.6'de verilmiştir.

Eniyilenmiş Gauss dağılımının ortalama ve standart sapma değerleri yinelemeli bir algoritma tarafından belirlenmektedir. Algoritmanın ilk aşamasına oldukça büyük bir standart sapma değeri seçilerek (örneğin, 100) başlanır. İlk aday baz istasyonu konumları sıfır ortalama ve bu standart sapma değerine göre oluşturulurlar. Ayrıca, her yineleme adımında algılayıcı düğüm konumları rastgele dağılım kullanılarak tekrar tekrar oluşturur. Burada unutulmaması gereken bir nokta, algılama ağı büyüklüğü ve düğüm sayısı parametrelerinin eniyileme boyunca sabit tutulduğudur. Daha sonra, Bölüm 5'te sunulan hareketli baz istasyonu matema-

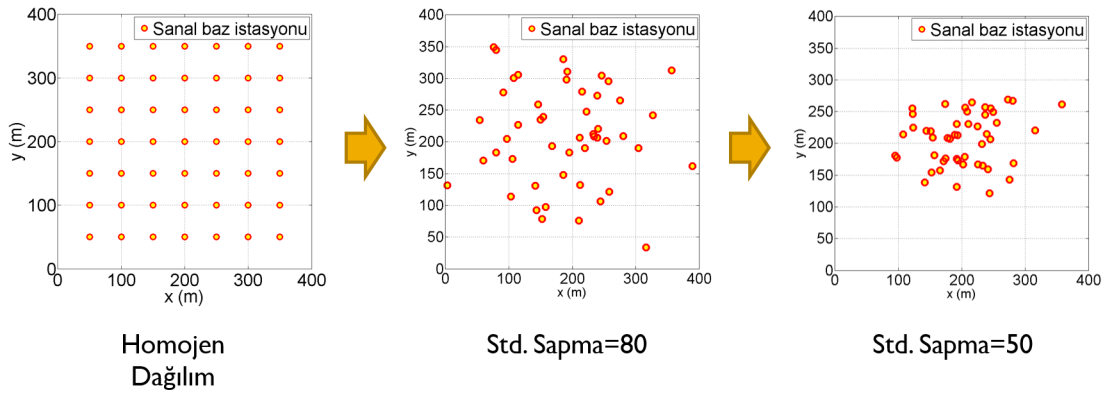
tiksel programlama modeli çalıştırılarak bir önceki aşamada üretilen aday baz istasyonu pozisyonları ile ağ ömrü eniyilemesi yapılır.

Burada üzerinde durulması gereken en önemli ayrıntı, çalıştırılan modelin yapılan eniyileme sırasında verilen baz istasyonu konumlarının sadece bir alt kümesini seçmekte olduğudur. Aslında seçilen bu konum alt kümesi algoritmanın bir sonraki aşamasında kullanılacak konum kümesinin Y standart sapmasını hesaplamakta kullanılacaktır. Bu bağlamda algoritmanın her eniyileme aşamasında aday baz istasyonu konum kümesinin sadece bir alt kümesinin seçilip kullanıyor olması unutulmamalıdır.

$$\bar{X} = \frac{\sum_i(X_i)}{n} \quad (4.6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (4.7)$$

Algoritmanın tekrar eden her yinelemesinde bir önceki yinelemede 4.6 ve 4.7 formülleri kullanılarak elde edilen ortalama \bar{X} ve standart sapma S değeri kullanılmaktadır. Devam eden sonraki yineleme aşamalarında süreç aynen tekrar etmektedir (Yani bir önceki yinelemede elde edilen standart sapma ve ortalama değerleri bir sonraki yinelemede aday baz istasyonu konumlarının üretilmesinde girdi olarak kullanılmaktadır).



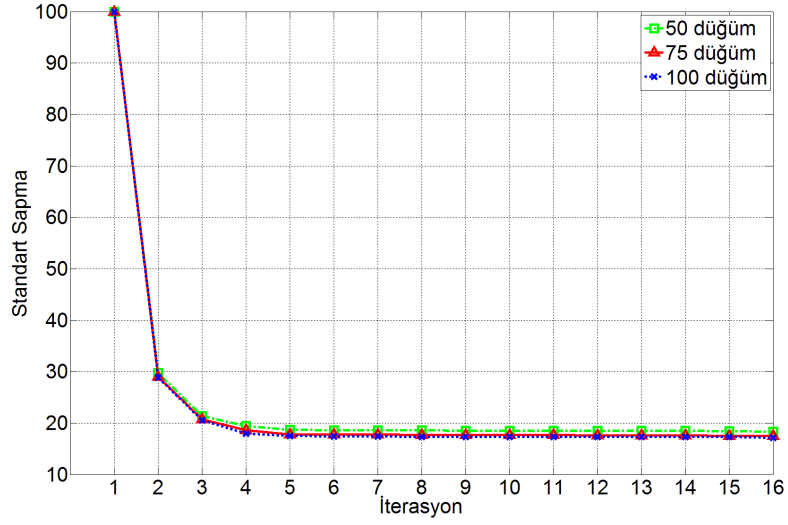
Şekil 4.7: Eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsünde yinelemeler sırasında standart sapmadaki değişim

Algoritma, ardışık yineleme aşamaları arasındaki standart sapma değerleri arasındaki fark belirli bir eşik altında ise (örneğin, $\epsilon \leq 1.0$) sonlandırılır. Algoritmanın

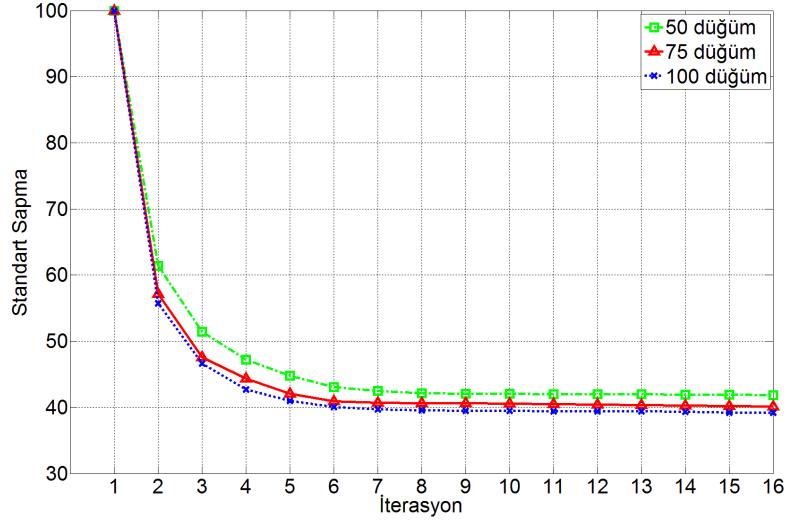
sona ermesi üzerine elde edilen standart sapma ve ortalama değerleri bu senaryo parametreleri için eniyilenmiş değerler olarak tutulur ve bundan sonra aynı senaryo parametreleriyle yapılacak deneylerde başka bir işleme tabi tutulmadan girdi olarak kullanılır.

Eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsü modelinde ardışık yinelemeler sırasında standart sapma değerindeki değişim Şekil 4.7’de örnek olarak gösterilmiştir. Burada algoritma ilk iterasyonda algılama alanı üzerinde her bölgeden eşit uzaklıklarla erişim sağlanabilmesi için düzgün dağılımlı bir baz istasyonu konum kümesiyle (Izgara dağılımı ile) başlatılmıştır. Algoritmada standart sapma değerinin devam eden iterasyonlarda giderek küçülmekte olduğu ve bir noktaya doğu giderek yakınsadığı gösterilmek istenmiştir.

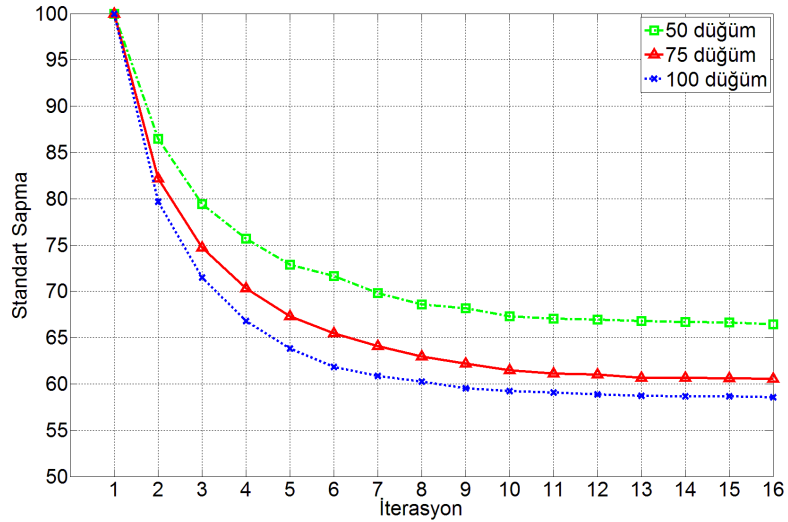
Şekil 4.8’de, üç farklı değerde algılama ağı büyüklüğü ve yine üç farklı değerde düğüm sayısı için eniyilenmiş Gauss dağılımı algoritması çalıştırıldığında gerçekleşen yineleme adımları arasındaki standart sapma değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Őekillerden anlaşılacağı gibi geliştirilen algoritma oldukça hızlı bir Şekilde (sadece birkaç yineleme adımıdan sonra) eniyilenmiş standart sapma değerine ulaşmaktadır. Burada önemli bir nokta algoritmanın yoğun ağ topolojilerinde hızlı sonuçlanmasına rağmen seyrek ağ topolojilerinde ise daha uzun sürede sonuçlanmasıdır. Bunun nedeni yoğun olmayan ağ topolojilerinde enerji dengelenmesi için daha fazla baz istasyonu hareketine ihtiyaç duyulurken, yoğun ağ topolojilerinde ise zaten hali hazırda çalışmakta olan verimli ağ yönlendirme algoritmaları ile enerji dağılımının dengelenmesinin sağlanabilmesidir.



(a) $200 \times 200m^2$ alan



(b) $300 \times 300m^2$ alan



(c) $400 \times 400m^2$ alan

Şekil 4.8: Eniyilenmiş Gauss dağılımı algoritması standart sapmaları. Şekil 4.8'te verilen her bir veri noktası 50 bağımsız denemenin ortalamasıdır.

5. MATEMATİKSEL MODEL

KAA'larda ağ yaşam süresinin (t) enbüyüklenmesi veya enerji tüketiminin enküçüklenmesi için daha önce de bir çok çalışmada sistem modellemesi yapılmıştır. Bu amaçla yaygın olarak zaman ve enerji modeli olmak üzere iki referans model kullanılmıştır. Zaman modelinde her düğümün başlangıçta sahip olduğu enerji miktarının bilindiği ve sabit olduğu varsayılarak mevcut enerji ile ağ yaşam süresinin enbüyüklenmesi amaçlanmıştır. Enerji modelinde ise daha önce belirlenmiş bir ağ yaşam süresi içerisinde minimum enerji tüketilerek verilerin baz istasyonuna aktarılması hedeflenmiştir.

Geliştirdiğimiz matematiksel modelde ağ topolojisi, $G = (V, A)$ ile gösterilen bir tam yönlü çizge ile temsil edilmektedir. Burada V , baz istasyonu dahil bütün düğümlerin kümesini, (yani, $V = W \cup Y$), W baz istasyonu hariç diğer algılayıcı düğümlerin kümesini, Y ise sanal baz istasyonu konum kümesini ifade etmektedir. Yani ağ N_Y sayıda sanal baz istasyonu ile N_W sayıda algılayıcı düğümden meydana gelmektedir. Aslında, burada gezgin baz istasyonları aday konumları farklı sanal baz istasyonları olarak kabul edilmektedir. Bir sanal baz istasyonu aktif duruma geçtiğinde, algılayıcı düğümler artık o baz istasyona kendi verilerini gönderebilirler. Burada verilen bir zaman diliminde sanal baz istasyonlarının en az birisi aktif olmak zorundadır. Sanal baz istasyonları aktif olmadıkları sürelerde sanki yokmuşlar gibi davranılır (Ne bir röle olarak ne de bir terminal noktası olarak herhangi bir yönlendirmeye katılamazlar). Dolayısı ile, U_k adında sadece algılayıcı düğümler ve k . sanal baz istasyonundan oluşan ikinci bir küme tanımlandı ($U_k = W \cup k$). Bu soyutlama ile eniyileme probleminin daha kompakt bir formda formüle edilmesi sağlandı.

Düğümler arasındaki yönlü akışların kümesi $A = \{(i, j) : i \in W, j \in V - i\}$ ile temsil edilmiştir. Bu tanım gereği hiçbir düğüm kendi kendisine veri gönderemez. Ayrıca, ikinci bir yönlü akış kümesi A_k , ($A_k = \{(i, j) : i \in W, j \in U_k\}$) U_k kümesi için, tüm algılayıcı düğüm verilerini aktif durumdaki k . sanal baz istasyonunda sonlandırmak amacıyla tanımlanmıştır.

Seçilen sanal baz istasyonlarının kümesi Z ile ifade edilir ve her Z kümesinin N_Z farklı üyesi vardır ($|Z| = N_Z$). Örnek olarak, eğer 49 farklı sanal baz istasyonu varsa

($N_y = 49$) ve ağ ömrü süresince bunlardan sadece 7 tanesi kullanılıyorsa $N_z = 7$ olmaktadır. Benzer şekilde i . düğümünden j . düğümüne doğru olan ve k . sanal baz istasyonunda sonlanan yönlü veri akışı f_{ij}^k ile ifade edilmektedir.

Çalışmalarda sabit konumlu ve gezici baz istasyonları olmak üzere iki farklı baz istasyonu modeli kullanılmıştır. Bu modellerden birincisinde baz istasyonu konumları ağ ömrü boyunca sabit diğerinde ise zamana bağlı olarak sürekli değişkenlik göstermektedirler. İki modelde de istenirse aynı anda birden fazla baz istasyonu veri alma görevini birlikte yerine getirebilir. Fakat, basitlik ve anlaşılabilirliği artırmak amacıyla gezici baz istasyonu modeli kendi içerisinde tek baz istasyonlu ve çok baz istasyonlu model olmak üzere ikiye ayrılmıştır.

Bu esneklik çoklu baz istasyonu modellerinde sabit konumlu ve gezici baz istasyonu hakkında karşılaştırma yapmaya olanak sağlamaktadır. Burada gezgin bir baz istasyonunun ziyaret edeceği konumların (Z) tüm aday konum kümesinin (Y) bir alt kümesi olabileceği unutulmamalıdır ($Z \subset Y$). Geliştirilen modelde bu alt kümenin boyutu istenirse kısıtlanarak baz istasyonunun aslında ne kadar hareket alanına ihtiyacı olduğu hakkında daha detaylı bilgi elde edilmesi sağlanmıştır.

Buna ek olarak, baz istasyonu durakladığı her konumda değişken bir süre kadar zaman geçirebilir ve çoklu baz istasyonu modellerinde her baz istasyonu kendi belirlediği miktarda veriyi alabilir. Özetle, yapılan bu çalışmada öne sürülen modeller eniyilenmiş sonuçlara ulaşabilmek için belirli kısıtlar altında en uygun çalışma şeklini seçme esnekliği ile çalışmaktadır.

5.1 Gezgin Baz İstasyonu Hareket Modeli

Gezgin baz istasyonu modelinde, baz istasyonları zamanla değişen konumlara sahiptir. Ayrıca, eş zamanlı olarak veri alışı yapabilen birden fazla aktif baz istasyonu bulunabilmektedir. Fakat, basitlik ve anlaşılabilirliği artırmak amacıyla bu model kendi içerisinde tek baz istasyonlu ve çok baz istasyonlu model olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu sayede daha sade ve daha hızlı olarak çözülebilen tek gezgin baz istasyonlu hareket modeli ortaya çıkmıştır.

5.1.1 Tek Gezgin Baz İstasyonu Hareket Modeli

Bu modelde N_W algılayıcı düğümün algılama alanına rastgele olarak dağıtıldığı ve hareketli tek bir baz istasyonunun düğümlerden verileri topladığı bir algılayıcı ağı topolojisi kullanılmıştır. Protokol çalışması, kurulum ve veri toplama adımlarının ardı ardına sürekli tekrar etmesi şeklinde gerçekleşir. Kurulum aşamasında baz istasyonu hareketi, veri toplama adımında ise diğer algılayıcı düğümlerden baz istasyonuna veri toplanması gerçekleştirilmektedir.

Tek gezgin baz istasyonu hareketinin matematiksel olarak modellenmesi ve çözülmesinde bir karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) çerçevesi kullanılmıştır. Bir eniyileme problemi olarak tanımlanan KTDP çerçevesi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. DP'nin amaç fonksiyonu toplam yaşam süresi değerini (L_{rnd}) enbüyüklemektir. Toplam yaşam süresi ağ üzerinde herhangi bir düğümün enerjisi tükenene kadar geçen zamandır.

<p>Amaç L_{rnd} değerini enbüyüklemek Kısıtlar:</p> $f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad \forall k \in Y \quad (5.1)$ $\sum_{(i,j) \in A_k} f_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A_k} f_{ji}^k = s_i L_{rnd}^k \quad \forall i \in W \quad \forall k \in Y \quad (5.2)$ $P_s \sum_{k \in Y} \left[\sum_{(i,j) \in A_k} f_{ij}^k E_{tx}^M(d_{ij}) + E_{rx} \sum_{(j,i) \in A_k} f_{ji}^k \right] = e_i \quad \forall i \in W \quad (5.3)$ $e_i \leq \text{batarya} \quad \forall i \in W \quad (5.4)$ $f_{ij}^k = 0 \text{ if } d_{ij} > R_{max}(l_{max}) \quad \forall (i, j) \in A \quad \forall k \in Y \quad (5.5)$ $\sum_{k \in Y} L_{rnd}^k = L_{rnd} \quad \forall k \in Y \quad (5.6)$ $P_s \left[\sum_{(i,j) \in A_k} f_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A_k} f_{ji}^k + \sum_{(j,m) \in A_k} f_{jm}^k I_{jm}^i \right] \leq L_{rnd}^k T_{rnd} \eta \quad \forall i \in V \quad \forall k \in Y \quad (5.7)$
--

Şekil 5.1: Tek gezgin baz istasyonu Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama(KTDP) çerçevesi.

KTDP çerçevesindeki ilk denklem olan denklem 5.1 bütün akımların pozitif olmasını sağlamaktadır. Denklem 5.2 algılayıcı düğümlerdeki akışların dengelenmesi için kullanılmıştır ve her bir düğümden çıkan verilerin o düğüme akan ve o düğüm tarafından üretilerek sanal baz istasyonlarında sonlanan verilerin toplamına eşit olduğunu ifade eder. Başka bir ifadeyle, i . düğüme gelen verilerin toplamı (tüm

diğer algılayıcı düğümlerden gelen) ile yine i . düğüm tarafından üretilen verilerin toplamı bu düğüm tarafından ağıın geri kalanına (röle görevi gören diğer algılayıcı düğümlere veya sanal baz istasyonlarına) gönderilen verilerin toplamına eşit olmasını sağlar. Sanal baz istasyonu k 'nın aktif olarak alım yaptığı toplam süre L_{rnd}^k ile gösterilmektedir. Benzer şekilde i . algılayıcı düğüm tarafından üretilerek k . baz istasyonunda sonlanan toplam veri paketi sayısı $s_i L_{rnd}^k$ ile belirtilmiştir. Burada S_i birim zamanda üretilen sabit veri paketi miktarıdır. Denklem 5.3 her bir algılayıcı düğümün veri alımı ve gönderimi için harcadığı toplam enerjiyi (e_i) hesaplamak için kullanılır. Denklem 5.4 ise her bir algılayıcı düğüm tarafından kullanılabilcek enerjiye bir üst sınır koyar. Burada herhangi bir düğümün harcayabileceği maksimum enerji miktarı *batarya* sabiti ile belirtilmiştir. Deneylerde *batarya* = 25.0 kJ olarak seçilmiştir (iki adet AA kalem pil toplam enerjisi kadar). Denklem 5.13 her bir düğümün veri gönderebileceği maksimum mesafeyi limitlemek için kullanılır. Burada $R_{max}(l_{max})$ sabiti düğümlerin maksimum haberleşebileceği menzili belirtir. Denklem 5.6 ağıın toplam yaşam süresini hesaplamak için kullanılır. Bu süre her bir sanal baz istasyonunun veri alımı yaptığı sürelerin L_{rnd}^k toplamına eşittir.

Algılayıcı düğümler kendi aralarında ortak bir kablosuz ağ üzerinden haberleştikleri için ortamın bant genişliği bir çok düğüm tarafından paylaşılmaktadır. Ortak bir yayın ortamında ise, her bir düğüme veri gönderimi ve alımı için gereken bant genişliğinin toplam bant genişliğinden küçük yada eşit olması gerekmektedir. Böyle bir kısıtlama ortak kapasiteyi göz önünde bulundurmalıdır. Biz burada i . düğüm etrafındaki bu düğüme gelmeyen ve bu düğüm tarafından gönderilmeyen veri trafiğinin i . düğümün toplam mevcut bant genişliğine olan etkisini girişim etkisi olarak tanımlıyoruz. Girişim etkisi hesaplanarak ortamda kullanılabilir toplam bant genişliğinin hesaplanması sağlanabilir. Denklem 5.7 kullanılabilir bant genişliği kısıtını temsil etmektedir. Burada U_k üyesi her bir düğüm için düğüme gelen, düğümden ayrılan ve parazit veri akışlarının toplam büyüklüğü k . sanal baz istasyonunun aktif kaldığı toplam süre ve kanal bant genişliği (η) ile sınırlandırılmaktadır (η değeri Mica2 düğümleri için 38.4 Kbps değerindedir). Bu kısıt [21] numaralı çalışmada verilmiş yeterli durumun değiştirilmiş bir versiyonudur. Girişim fonksiyonu (I_{jm}^i) Denklem 5.8'de formüle edilmiştir.

$$I_{jm}^i = \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma R_{max}(l_{jm}^{opt}) \geq d_{ij} \text{ and } i \neq j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5.8)$$

Burada, eğer i . düğüm; j . düğüm ve m . düğümler arasındaki bir haberleşmenin

girişim bölgesinde yer alıyorsa I_{jm}^i fonksiyonunun değeri "1", girişim bölgesi dışında kalıyorsa "0" olmaktadır. Genel kanı, girişim alanının maksimum iletim alanına eşit yada daha büyük olması gerektiği yönündedir ($\gamma \geq 1$). Bunun anlamı γ sabitinin değerine bağlı olarak (bu çalışmada $\gamma = 1.7$ seçilmiştir) j . düğüm ile m arasında gerçekleşen bir haberleşmenin j . düğümünden $R_{max}(I_{jm}^{opt})$ mesafeden daha uzakta bulunan bir i . düğümüne girişim etkisinde bulunabilmesinin mümkün olmasıdır.

Bu çalışmada Denklem 5.7'deki parametre değerleri öyle bir biçimde seçilmiştir ki eşitsizliğin sol tarafının mümkün olabilecek en büyük değeri sağ tarafının olabilecek en büyük değerinden daha küçük olmak zorundadır. Böylece çakışma içermeyen bir iletişim zamanlamasının kurgulanması, fazla komplike olmayan bir zaman dilimi atama algoritması kullanılarak mümkün olabilir. Ağ trafiğinin mümkün olan maksimum bant genişliğinden daha düşük olduğu durumlar için iyi geliştirilmiş taşıyıcı algılamalı çoklu erişim (CSMA) tabanlı ortama erişim kontrol protokollerinin paket çarpışma oranlarını ihmal edilebilir seviyelere düşürebildikleri bilinmektedir [54].

5.1.2 Çoklu Gezgin Baz İstasyonu Hareket Modeli

Bu modelde eş zamanlı olarak veri alışı yapabilen birden fazla aktif baz istasyonu bulunabilmektedir. Bu hareket modelinde baz istasyonları hareketi değişen konumlarda (Y kümesinin herhangi bir alt kümesinde) ve değişen sürelerde olabilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, gezgin baz istasyonu modelinde baz istasyonları zamansal ve mekansal olarak seçici bir hareketlilik sergilerler. Yani, baz istasyonları duraklama noktalarının bir alt kümesini seçebilir ve bu konumlarda değişken süreler konaklayabilir.

Problemin matematiksel olarak modellenmesi ve çözümlenmesinde bir özgün bir Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) çerçevesi kullanılmıştır. Bir eniyileme problemi olarak tanımlanan KTDP çerçevesi Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Bu modelde düğümlerin başlangıçtaki enerji miktarlarının (e_i) eşit olduğu kabul edilmiştir. Burada KTDP'nin amaç fonksiyonu KAA toplam yaşam süresini (L_{rnd}) enbüyüklemektir. Toplam yaşam süresi ise ağ üzerinde herhangi bir düğümün enerjisi tükenene kadar geçen zaman olarak kabul edilmiştir. KTDP çerçevesi

dikkatle incelendiğinde bütün algılayıcı düğümlerin ömrünü en üst düzeye çıkarmak amacıyla enerjilerini dengeli ve düzgün bir şekilde harcamak zorunda olduğu görülebilir. Bunun bir sonucu olarak, ağ üzerindeki her bir algılayıcı düğüm diğer düğümlerden daha erken ölmek için onlarla işbirliği yaparak enerji kaynağının aşırı kullanımından kaçınmak zorunda kalır. Bu çalışmada KTDP çerçevesinin optimum sonuçlara erişebilmek için global ağ bilgilerine ihtiyaç duyduğu unutulmamalıdır. Yalnızca yerel yönlendirme bilgileri gerektirerek en iyiye yakın sonuçlar sağlayacak ağ protokollerinin tasarımı bu çalışmanın kapsamı dışındadır ve gelecekte yapılacak bir çalışma olarak bırakılmıştır.

<p>Amaç L_{rnd} değerini enbüyüklemek</p> <p>Kısıtlar:</p> $f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in Y \quad (5.9)$ $\sum_{(i,j) \in A_k} f_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}^k = s_i L_{rnd}^k \quad \forall i \in W, \forall k \in Y \quad (5.10)$ $P_s \sum_{k \in Y} \left[\sum_{(i,j) \in A_k} f_{ij}^k E_{tx}^M(d_{ij}) + E_{rx} \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}^k \right] = e_i \quad \forall i \in W \quad (5.11)$ $e_i \leq \text{batarya} \quad \forall i \in W \quad (5.12)$ $f_{ij}^k = 0 \text{ if } d_{ij} > R_{max}(l_{max}) \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in Y \quad (5.13)$ $\sum_{k \in Y} L_{rnd}^k = L_{rnd} \quad \forall k \in Y \quad (5.14)$ $\sum_{j \in W} f_{ji}^k = bs_i^k \quad \forall (i, k) \in Y \quad (5.15)$ $bs_i^k \leq M * a_i^k \quad \forall (i, k) \in Y \quad (5.16)$ $\sum_{i \in Y} a_i^k = SinkCount \quad \forall k \in Y \quad (5.17)$ $P_s \left[\sum_{(i,j) \in A_k} f_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}^k + \sum_{(j,m) \in A} f_{jm}^k I_{jm}^i \right] \leq L_{rnd}^k T_{rnd} \eta \quad \forall i \in V, \forall k \in Y \quad (5.18)$
--

Şekil 5.2: Hareketli baz istasyonu Karma Tamsayı Doğrusal Programlama(KTDP) çerçevesi.

Şekil 5.2’de gösterilen KTDP çerçevesinde Denklem 5.9 bütün akımların pozitif olduğunu belirtmektedir. Denklem 5.10 algılayıcı düğümlerdeki akışların denge-lenmesi için kullanılmıştır. Her bir düğümden çıkan verilerin o düğüme akan ve o düğüm tarafından üretilen verilerin toplamına eşit olduğunu ifade eder. Burada S_i birim zamanda üretilen sabit veri miktarıdır (2048 *bit*). KAA’larda algılayıcı

düğümleer veriyi periyodik olarak üretir ve toplanan veri önceden bilinen sabit miktardadır. Denklem 5.11 baz istasyonu dışındaki tüm düğümlerin veri iletimi için harcadığı enerjinin düğümlerde depolanmış enerji miktarıyla (e_i) sınırlandırıldığını belirtir. Denklem 5.12 tüm algılayıcı düğümlerin eşit miktarda pil enerjisine (*batarya*) sahip olduğunu belirtmek için kullanılmıştır. Denklem 5.13 düğümler arasında maksimum iletişim mesafesini $R_{max}(l_{max})$ olarak belirler. Denklem 5.14 ağıın toplam yaşam süresini bütün baz istasyonlarının veri alımı yaptıkları sürelerin toplamı L_{rnd} olarak belirler.

5.15, 5.16 ve 5.17 numaralı denklemler çoklu baz istasyonu seçimi için tasarlanmışlardır. Denklem 5.15 her bir k .sanal baz istasyonuna akan veriyi bs_i^k değişkeninde toplar. Denklem 5.16'daki büyük- M notasyonu yardımıyla her k .sanal baz istasyonuna akan veri ikili a_i^k değişkeni ile bağlantı kurularak kontrol edilir. Bu denklemde M sabitinin değeri sistemin düzgün çalışabilmesi için yeterince büyük seçilmelidir. Bu durumda eğer k . sanal baz istasyonuna bir veri akışı gerçekleşirse, ikili değişken a_i^k "1"; eğer hiç bir akış olmaz ise "0" değerini alır. Son olarak Denklem 5.17 aynı anda kaç adet baz istasyonunun alım yapabileceğini, a_i^k değişkenininin k . üzerinden toplamını *SinkCount* sabiti ile sınırlandırarak belirler. Algılayıcı düğümler kendi aralarında ortak bir kablosuz ağ üzerinden haberleştikleri için ortamın bant genişliği bir çok düğüm tarafından paylaşılmaktadır. Bu nedenle, Denklem 5.18 ile bütün düğümlere veri gönderimi ve alımı için gereken bant genişliğinin ağıın toplam bant genişliğinden küçük yada eşit olmasını sağlanarak çakışma içermeyen bir iletişim zamanlamasının oluşturulması sağlanır.

5.2 Çoklu Sabit Konumlu Baz İstasyonu Hareket Modeli

Sabit konumlu baz istasyonu modelinde adından da anlaşılacağı üzere baz istasyonları zaman içerisinde değiştirilemeyen sabit konumlara sahiptir. Ayrıca, hareketli baz istasyonu modelinde de olduğu gibi bir yada daha fazla sayıda baz istasyonu aynı anda aktif olarak veri alımı yapabilir.

Problemin matematiksel olarak modellenmesi ve çözülmesinde bir KTDP çerçevesi kullanılmıştır. Bu KTDP çerçevesinde amaç, dinamik konumlu baz istasyonu çerçevesinde de olduğu gibi KAA ömrünü (L), enbüyüklemektir. Bu model için

geliştirilmiş, bir eniyileme problemi olarak tanımlanan KTDP çerçevesi modeli Şekil 5.3’de verilmiştir. Burada ağın toplam yaşam süresi ağ üzerinde herhangi bir düğümün enerjisi tükenene kadar geçen zamandır.

Denklem 5.19 bütün akımların pozitif olduğunu belirtmektedir. Denklem 5.20 algılayıcı düğümlerdeki akışların dengelenmesi için kullanılmıştır. Her bir düğüme akan ve o düğüm tarafından üretilen verilerin, o düğümden çıkarak ağın geri kalanına(sanal baz istasyonlarına yada algılayıcı röle düğümlere) gönderilen verilerin toplamına eşit olduğunu ifade eder.

<p>Amaç L değerini enbüyüklemek Kısıtlar:</p> $f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.19)$ $\sum_{(i,j) \in A} f_{ij} = \sum_{(j,i) \in A} f_{ji} + s_i L \quad \forall i \in W \quad (5.20)$ $P_s \left[\sum_{(i,j) \in A} E_{tx}^M(d_{ij}) + E_{rx} \sum_{(j,i) \in A} f_{ji} \right] \leq \text{batarya} \quad \forall i \in W \quad (5.21)$ $f_{ij} = 0 \text{ if } d_{ij} > R_{max}(l_{max}) \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.22)$ $\sum_{j \in W} f_{ji} = bs_i \quad \forall i \in Y \quad (5.23)$ $bs_i \leq M * a_i \quad \forall i \in Y \quad (5.24)$ $\sum_{i \in Y} a_i = \text{SinkCount} \quad (5.25)$ $P_s \left[\sum_{(i,j) \in A} f_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} f_{ji} + \sum_{(j,m) \in A} f_{jm} l_{jm} \right] \leq L_{rnd}^k T_{rnd} \eta \quad \forall i \in V \quad (5.26)$
--

Şekil 5.3: Sabit Konumlu Baz İstasyonu Hareket Örüntüsü KTDP çerçevesi.

Denklem 5.21 baz istasyonu dışındaki tüm düğümlerin veri iletimi için harcadığı enerjinin (e_i) düğümlerde depolanmış enerji miktarıyla (batarya) sınırlandırıldığını belirtir (bütün algılayıcı düğümler için $\text{batarya} = 25.0 \text{ kJ}$). Denklem 5.22 düğümler arasında maksimum iletişim mesafesini $R_{max}(l_{max})$ ile sınırlandırır.

5.23, 5.24 ve 5.25 numaralı denklemler çoklu baz istasyonu seçimi için tasarlanmışlardır. Denklem 5.23 her bir i .sanal baz istasyonuna akan veriyi bs_i değişkeninde toplar. Denklem 5.24’deki büyük- M notasyonu yardımıyla her i .sanal baz istasyonuna akan veri ikili a_i değişkeni ile bağlantı kurularak kontrol edilir. Bu durumda eğer i . sanal baz istasyonuna bir veri akışı gerçekleşirse, ikili değişken

a_i "1"; eğer hiç bir akış olmaz ise "0" değerini alır. Son olarak denklem 5.25 aynı anda kaç adet statik konumlu baz istasyonunun alım yapabileceğini, a_i değişkeninin i . üzerinden toplamını *SinkCount* sabiti ile sınırlandırarak belirler. Son olarak, Denklem 5.26 ile bütün düğümlere veri gönderimi ve alımı için gereken bant genişliğinin ağı toplam bant genişliğinden küçük yada eşit olmasını sağlanarak çakışma içermeyen bir iletişim zamanlamasının oluşturulmasını mümkün kılar

6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde, bir önceki bölümde sunulan KTDP modellerinin sayısal değerlendirme yoluyla KAA ömrü üzerine olan etkileri nümerik analizler kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda baz istasyonu için Bölüm 5'te önerilen hareketlilik örüntüleri ile (rastgele, ızgara, spiral ve eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüleri) aralarındaki performans farkları incelenmiş ve çoklu baz istasyonu kullanıldığı durumlarda sabit ve hareketli baz istasyonlarının sistemi nasıl etkilediği gözlemlenmiştir.

Deneylerde KTDP modellerinin çözümü için GAMS (General Algebraic Modeling System) çözücüsü kullanılmıştır [14]. Bütün deneylerde kullanılan ortak senaryo parametreleri ise Çizelge 6.1'de verilmiştir. Deneylerde düğümler iki adet alkalın kalem pil ile beslendikleri düşünülerek 25KJ'lik ilk enerji ile başlatılmışlardır. Toplam ağ ömrünün ölçüldüğü deneyler 200x200, 300x300 ve 400x400 m^2 alan boyutlarında 50, 75 ve 100 düğümlü senaryolar için yeterli örnekleme sayılarında tekrar edilmiş ve ölçülen değerlerin ortalamaları alınmıştır.

Burada algılama alanı boyutu ve algılayıcı düğümlerin sayısı değiştirilerek, ağ ömrü üzerindeki düğüm yoğunluğu etkilerinin daha detaylı bir şekilde araştırılması sağlanmıştır. Ayrıca ağ ömrü üzerinde birden fazla baz istasyonu bulunmasının ağın yaşam süresine olan etkisi hareketli ve sabit konumlu baz istasyonları için kıyaslanmış ve karşılaştırılmıştır.

Karma tamsayı dinamik programlamada bazı durumlarda eniyi olmayan sonuçlar ortaya çıkabildiği gözlemlenmiştir. Örnek olarak eğer çözüm süresi çok uzun sürer ve önceden tanımlanmış belirli bir süre içerisinde sonlanmaz ise eniyi olmayan, yarı-eniyi sonuçlar ortaya çıkabilir. Benzer şekilde muhtemel bir problem çözümünün mümkün olmadığı bazı durumlarda çözücünün eniyi olmaktan çok uzak yaklaşık değerler üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu aykırı veriler hatalı istatistiksel sonuçlar alınmasına ve sonuçların çarpıtılmasına yol açabilir. Bu nedenle, bu aykırı verilerin olumsuz etkilerini önleyebilmek için sonuçlar hakkında herhangi bir yorum ve çıkarım yapılmadan önce bir ön-işleme tabi tutulmaları gerekmektedir. Bu gibi durumlarla başa çıkabilmek ve elde edilen veri içerisindeki uç değerlerin giderilmesi için kırılmış kestiricilerin kullanılması oldukça yaygındır [82]. Kır-

Çizelge 6.1: Hedef senaryo parametreleri.

Parametre	Değer
Algılama alanı büyüklüğü	200x200, 300x300, 400x400 m^2
Algılayıcı düğüm sayısı	50, 75, 100 (N_w)
Düğüm enerjisi (2xAA alkalın batarya eşdeğeri)	25 Kj (batarya)
İletişim paket boyutu	2048 bits (P_s)
Maksimum haberleşme mesafesi	82.92 m ($R_{max}(l_{max})$)

pılmış kestiriciler diğer bir kestiricinin veri kümesindeki uç değerlerin budama diye tabir edilen bir yöntemle uçlardan atılarak kalan değerlerin ortalamasının alınması ile türetilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem düzensiz sapmalar veya çarpık dağılımların bulunduğu veri kümeleri için oldukça uygundur.

Burada budanmış verinin ortalama değeri veri kümesinin alt ve üst olmak üzere her iki sınırdan da belirli bir $\%X$ değeri kadar kesilerek geriye kalan kısmının ortalamasının alınması ile elde edilir. Bu perspektiften bakıldığında $X = \%50$ değerindeki bir budama ile kullanılan kırılmış kestirici değeri ortanca değerine eşit olmaktadır. Örnek olarak $\%5$ değerinde bir kırılmış kestirici örneği Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, aykırı sonuçlarının olumsuz etkileri ile başa çıkabilmek için $X = \%10$ değerinde bir kırılmış kestirici kullanılmıştır.

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	$t_6 \dots t_{94}$	t_{95}	t_{96}	t_{97}	t_{98}	t_{n-1}	t_n
-------	-------	-------	-------	-------	--------------------	----------	----------	----------	----------	-----------	-------

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{\frac{1}{n-10} \sum_{5 < i < n-5} t_i}$$

Şekil 6.1: $\%5$ değerinde bir kırılmış kestirici örneği.

Ağ yaşam süresi değerleri gösterilmeden önce normalizasyon işlemine tabi tutulmuşlardır. Normalizasyon işlemi, tüm ağ yaşam süresi değerlerinin her alt şekilde elde edilen en yüksek değere bölünmesi ile gerçekleştirilmiştir. Mutlak ağ yaşam süresi değerlerinden kaçınarak, normalize edilmiş ağ yaşam süresi değerlerinin kullanılmasının tercih edilmesinin nedeni bu yöntemin bu çalışmanın temel hedeflerinden biri olan çoklu baz istasyonu ve farklı hareket örüntüleri arasındaki göreceli varyasyonları tasvir için daha uygun oluşudur.

Algılayıcı düğümler karesel algılama alanı üzerine düzgün rastgele bir dağılım

kullanılarak dağıtılmışlardır. Benzer şekilde, sanal baz istasyonu konumları da farklı hareket örüntülerinde farklı dağılım biçimleriyle dağıtılmışlardır. Her bir farklı hareket örüntüsü ve her bir farklı baz istasyonu sayısı için geliştirilen KTDP modelleri çoklu sayılarda çözümlenerek elde edilen sonuçların ortalamaları alınmıştır. Ayrıca deneylerde alınan sonuçların genelleştirilebilmeleri için deneyler Çizelge 6.1'de gösterilen farklı senaryo parametreleri ile tekrar edilmişlerdir.

Hareketli baz istasyonu için alınan toplu ağ yaşam süresi sonuçları Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4'de gösterilmektedir. Yine hareketli bir baz istasyonu kullanıldığında algılayıcı düğümlerde atıl olarak geriye kalan enerji miktarları Şekil 6.5, 6.6 ve 6.7'de gösterilmektedir. Benzer biçimde, hareketli bir baz istasyonu kullanıldığı senaryolarda baz istasyonu tarafından seçilen konum kümesi boyutu N_z Şekil 6.8, 6.9 ve 6.10'de gösterilmektedir. Şekillerde yatay eksen baz istasyonunun bulunabileceği konum sayısını, dikey eksen ise şekil gruplarında sırasıyla ağı normalleştirilmiş yaşam süresini, atıl kalan düğüm enerjisi miktarını ve baz istasyonu tarafından seçilen konum kümesi boyutunu göstermektedir. Bu şekiller sayesinde KAA'da baz istasyonu hareketinin ağ üzerindeki etkilerinin detaylı şekilde analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4'de görüldüğü gibi, baz istasyonunun bulunabileceği konum kümesi büyüklüğü N_y arttırıldıkça ağın yaşam süresinin de arttığı gözlemlenmektedir. Ancak, ağ yaşam süresindeki artış oranı belirli bir N_y değerinden sonra oldukça küçük olmaktadır, başka bir deyişle bu şartlar altında ulaşılabilecek en büyük yaşam süresi değerine ulaşılmaktadır.

Örnek vermek gerekirse, eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsü ile bütün parametre uzayında yapılan deneylerde $N_y \geq 16$ olduğu durumda elde edilen ağ yaşam süresi değeri olabilecek maksimum değerin %90'ından daha büyüktür. Başka bir deyişle toplam konum kümesinin (Y) sadece 1/3 lük kısmı kullanılarak olabilecek maksimum ağ yaşam süresinin %90'ına erişilmektedir. Bu eğilim benzer şekilde rastgele, ızgara ve spiral hareket örüntülerinde de gözlenmektedir. Bunun nedeni nispeten küçük boyuttaki bir baz istasyonu hareketliliği ile deneylerdeki en yüksek hareketlilik ile kazanılabilecek başarıya yakın başarı değerlerinin elde edilebilmesidir.

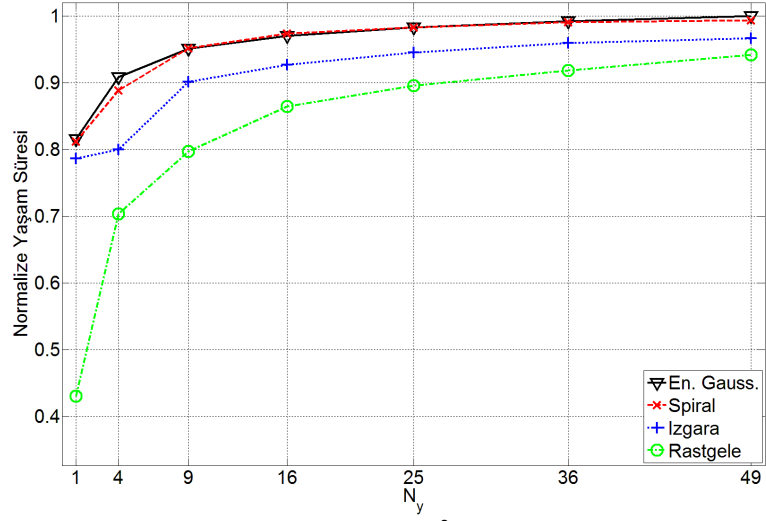
Sabit konumlu bir baz istasyonu durumu ($N_y = 1$) ile karşılaştırıldığında bütün hareketlilik örüntüleri ağ yaşam süresini önemli ölçüde arttırmaktadır. Her bir dağılım örüntüsü içerisinde farklı konum kümesi boyutları için ($1 \leq N_y \leq 49$) elde

edilen en büyük artışlar ise rastgele hareket örüntüsünün kullanıldığı senaryolarda elde edilmiştir. Örnek olarak, rastgele hareketlilik örüntüsü ile $400 \times 400 m^2$ algılama alanında 100 algılayıcı düğüm ile ($N_w = 100$), $N_y = 1$, $N_y = 9$, ve $N_y = 36$ için yapılan deneylerde elde edilen yaşam süreleri değerleri sırasıyla 0.34, 0.77, ve 0.92 olmaktadır (6.4(c)). Bunun nedeni Gauss dağılımlı, spiral ve ızgara hareket örüntülerinin aksine rastgele hareket örüntüsünde sanal baz istasyonu kümesinin tamamen rastlantısal olarak oluşturulmasıdır. Baz istasyonunun hareket edebileceği konum kümesi boyutunun 1 olduğu durumda ($N_y = 1$) bu konum değeri, ızgara hareket örüntüsünde ağın geometrik merkezi, spiral ve Gauss dağılımlı hareket örüntülerinde algılayıcı düğüm dağılımının ağırlık merkezi olarak seçilmesine rağmen rastgele hareket örüntüsünde tamamen rastgele olduğundan ağın herhangi uzak bir bölgesinde olabileceğinden oldukça verimsiz durumlar oluşabilir. Bu nedenle tek konumlu rastgele hareket örüntüsü eniyiden oldukça uzak ve verimsiz bir başarımlı göstermektedir.

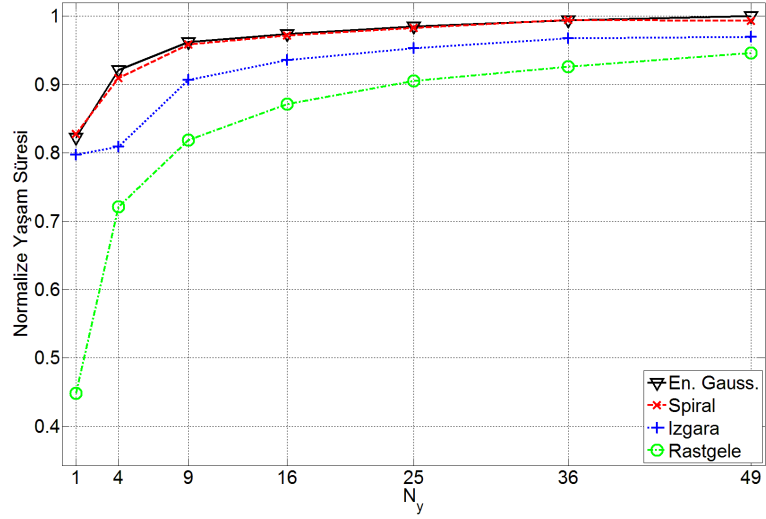
Tek hareketli baz istasyonu ile yapılan deneylerde genel olarak eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsü en iyi; rastgele hareket örüntüsü ise en kötü yaşam süresi değerlerini vermiştir. Izgara hareketlilik örüntüsü başarımlı ise bu ikisi arasında kalmaktadır. Spiral hareket örüntüsü ise deney yapılandırılmalarının bir çoğunda eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsüne çok yakın bir performans sergilenmiştir. Buna rağmen, spiral ve eniyilenmiş Gauss dağılımı arasında en büyük performans farkı yine en seyrek ağ yapılandırması olan $400 \times 400 m^2$ algılama alanında 50 algılayıcı düğümün bulunduğu yapılandırmada ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde seyrek olan ağ yapılandırmalarında farklı hareket örüntüleri arasındaki performans farkları da büyümektedir. Örneğin, yine $400 \times 400 m^2$ algılama alanında 50 algılayıcı düğümün bulunduğu yapılandırmada $N_y = 49$ olduğunda elde edilen ağ yaşam süresi değerleri eniyilenmiş Gauss, spiral, ızgara ve rastgele hareket örüntüleri için sırasıyla 1.00, 0.88, 0.76 ve 0.72 olmaktadır (Şekil 6.4(c)).

Hareketli tek baz istasyonunun bulunduğu bütün deney senaryolarında algılayıcı düğüm sayısının değiştirilmesinin hareket örüntülerinin performans sıralamasını fazla etkilemediği gözlemlenmiştir. Yani, eniyilenmiş Gauss dağılımı her zaman en iyi sonucu verirken rastgele dağılım en kötü sonucu vermiştir. Bu sebeple daha büyük ağ yapılandırmalarında da benzer bir sıralama görülmesi olasıdır.

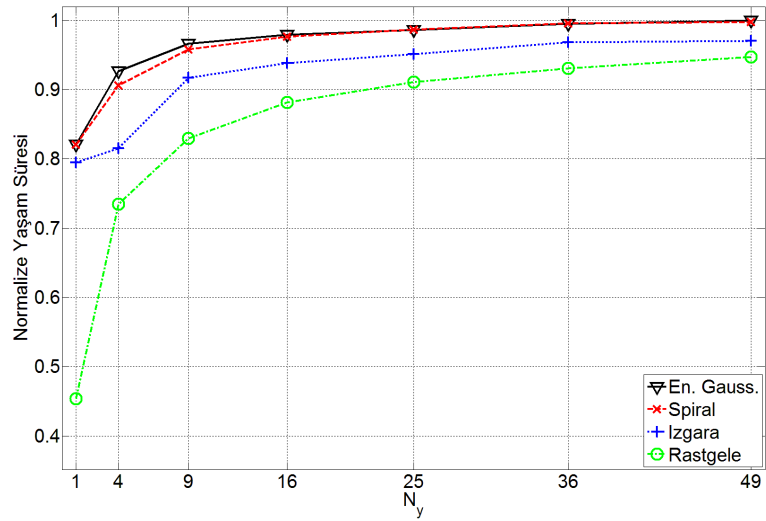
Sonuçlarda genel olarak ağ yaşam süresinin ağ alanı arttıkça azaldığı gözlemlenmektedir. Bunun en önemli nedeni ağ alanı arttıkça düğümler arası ortalama



(a) $200 \times 200 m^2, N_w = 50$

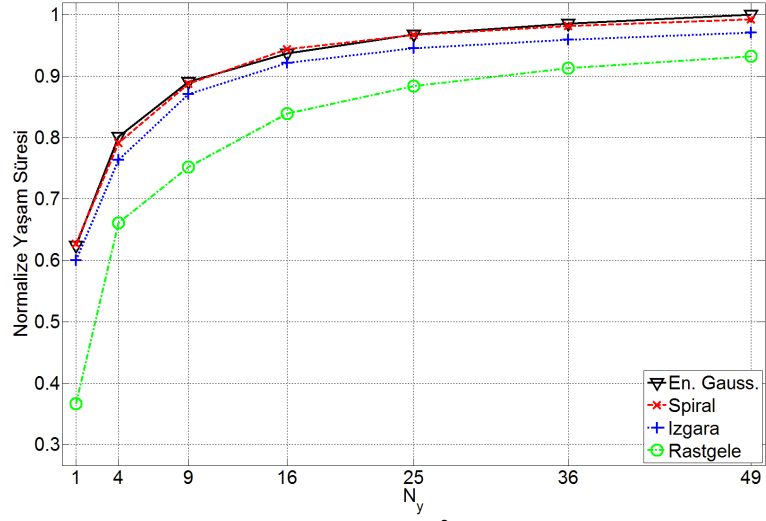


(b) $200 \times 200 m^2, N_w = 75$

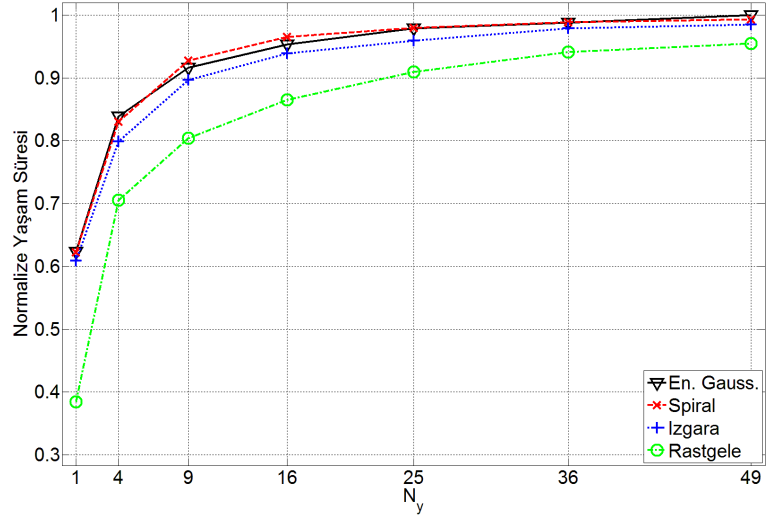


(c) $200 \times 200 m^2, N_w = 100$

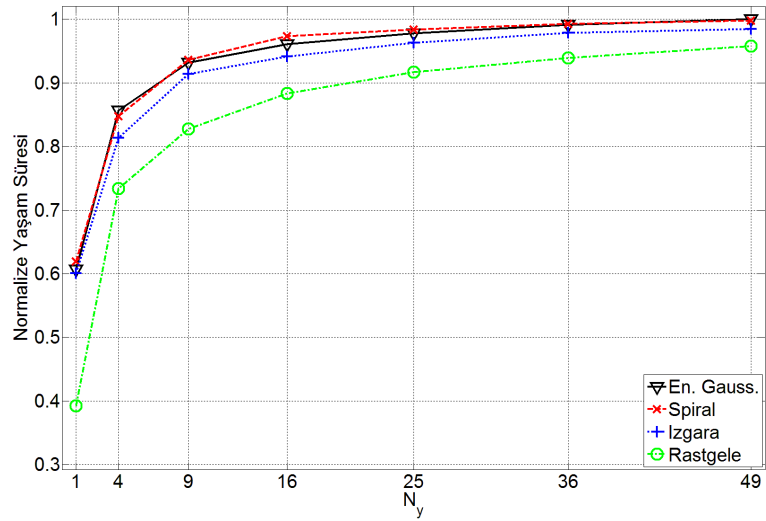
Şekil 6.2: $200 \times 200 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak ağ yaşam süresindeki değişim (a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).



(a) $300 \times 300 m^2, N_w = 50$

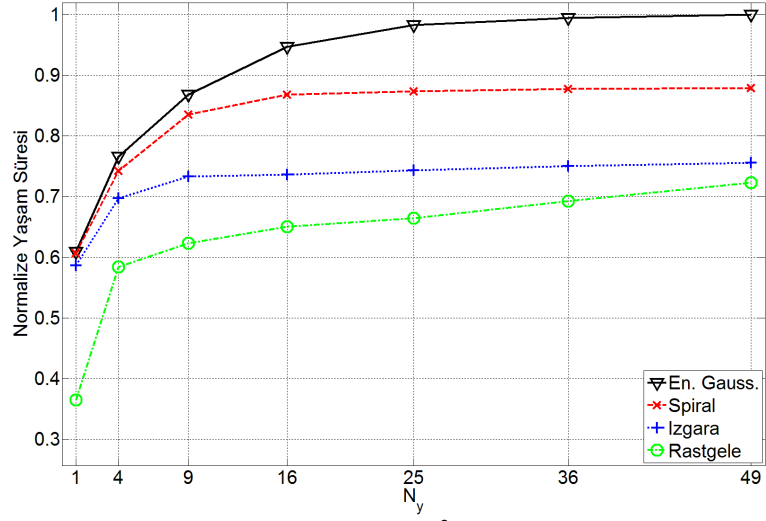


(b) $300 \times 300 m^2, N_w = 75$

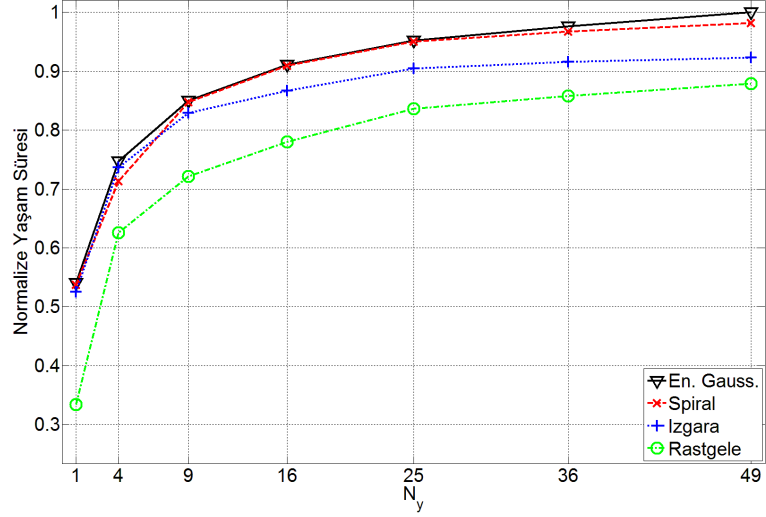


(c) $300 \times 300 m^2, N_w = 100$

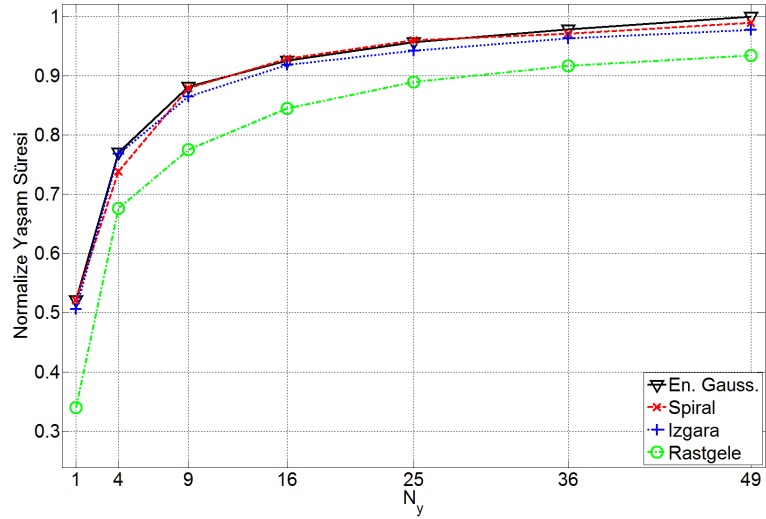
Şekil 6.3: $300 \times 300 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak ağ yaşam süresindeki değişim (a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).



(a) $400 \times 400 m^2, N_w = 50$



(b) $400 \times 400 m^2, N_w = 75$



(c) $400 \times 400 m^2, N_w = 100$

Şekil 6.4: $400 \times 400 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak ağ yaşam süresindeki değişim (a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).

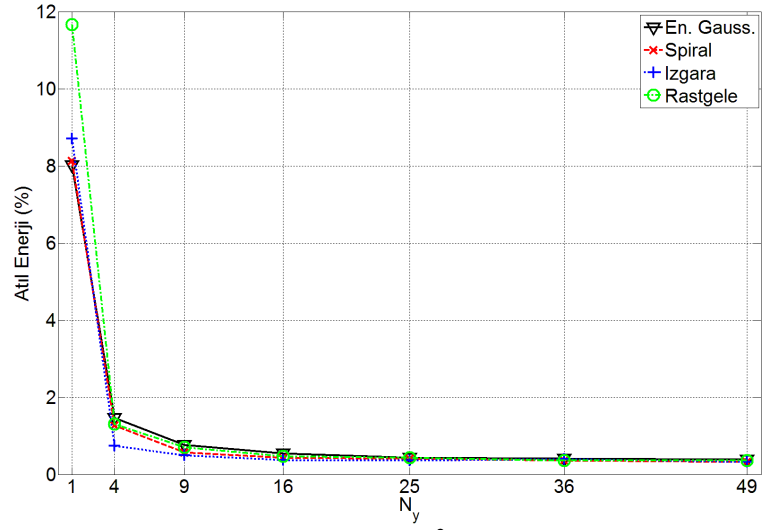
uzaklığın artması ve iletim enerjisinin de daha büyük olmasıdır. Şekillerdeki en önemli gözlemlerden bir diğeri ise toplam hareket edilebilir nokta sayısının (N_y) 16'ya kadar artırılmasının yaşam süresini hızlıca artırırken, 16'dan sonraki artışlarda ise çok fazla yaşam süresini etkilememesidir. Buradan çıkarılacak sonuç, 16 baz istasyonu konumunun eniyi sonuca eşit veya çok yakın sonuçlara ulaşmak için yeterli olmasıdır.

Algılayıcı düğümlerin ağ yaşam süresi sona erdikten sonra geriye atıl olarak kalan enerjileri KAA enerji verimliliğinin ölçülmesinde önemli bir metrik olabilir. Bunun nedeni en uzun yaşam süresine erişebilmek için ağdaki bütün algılayıcı düğümlerin enerjilerini benzer hızlarda ve dengeli bir biçimde harcamaları gerekliliğidir. Atıl kalan enerji ise genellikle yoğun-bölge yakınlarındaki algılayıcı düğümlerin erken biçimde enerjilerini tüketmelerinden kaynaklanmaktadır. Ağda baz istasyonu konumunun değiştirilmesi ile erken ölen bu düğümlerin yükü yoğun-bölgede sürekli yer değiştirdiğinden daha büyük bir algılayıcı düğüm kümesi tarafından taşınmakta ve daha uzun ağ yaşam süresi değerlerine erişilebilmektedir.

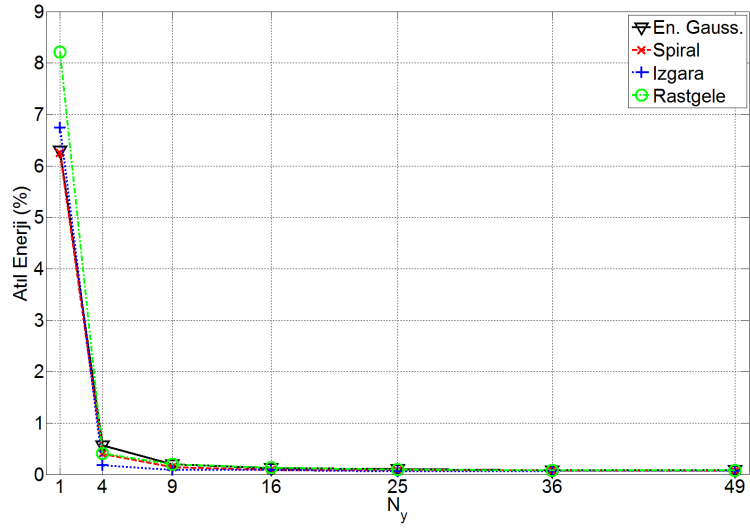
Şekil 6.5, 6.6 ve 6.7'de görülebileceği gibi baz istasyonu hareketi için gerekli konum kümesinin boyutu büyüdükçe atıl kalan ortalama enerji değerleri de küçülmekte, dolayısıyla daha uzun yaşam süreleri elde edilmektedir. Fakat, atıl kalan enerji değerleri ağ yaşam süresi değerlerinde de olduğu gibi baz istasyonu konum kümesi büyüdükçe sürekli daha da küçülen hızlarla azalmaktadır. Ayrıca, atıl kalan enerji değerleri yoğun ağ topolojilerinde ($200 \times 200 m^2$ algılama alanında 75 ve 100 düğüm bulunduğu yapılandırmada) N_y değeri büyüdükçe neredeyse sıfıra yaklaşmaktadır (Şekil 6.5(b) ve 6.5(c)). Bunun aksine seyrek ağ yapılandırmalarında ($400 \times 400 m^2$ algılama alanında 50 düğüm bulunduğu yapılandırmada) atıl kalan enerji en büyük N_y değeri için bile belirli bir değer altına inmemektedir (Şekil 6.7(a)'de atıl kalan enerji değeri $N_y = 49$ için minimum %12 olarak ölçülmüştür).

Fakat yine de, atıl kalan enerjilerin minimize edilmesi en uzun ağ yaşam süresi değerine ulaşmak için yeterli olmamaktadır. Örnek olarak $400 \times 400 m^2$ algılama alanında 50 ve 75 düğüm bulunduğu yapılandırmalarda (Şekil 6.7(a) ve 6.7(b)) atıl kalan enerjiler birbirlerine çok yakın olmalarına rağmen aynı yapılandırmalarda elde edilen ağ yaşam süresi değerleri önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Şekil 6.4(a) ve 6.4(b)).

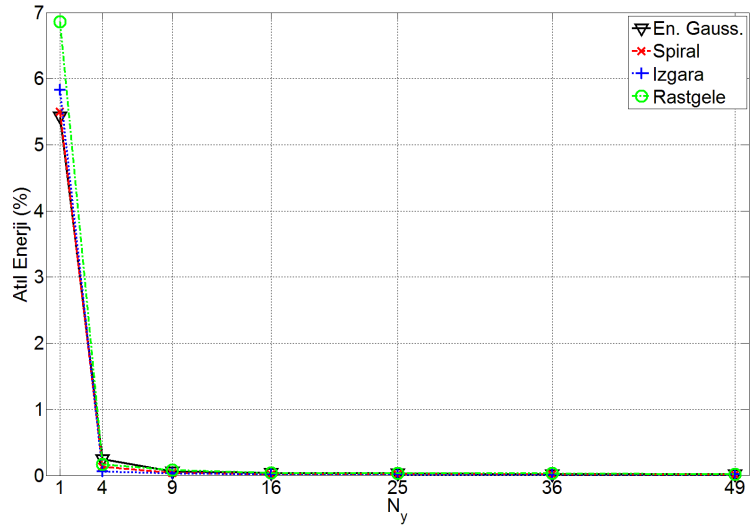
Deneylerde ölçülen bir diğeri metrik olan seçilen ortalama sanal baz istasyonu sayısı (N_z) bütün hareket örüntülerinde artan konum kümesi boyutu (N_y) ile bir artış



(a) $200 \times 200 m^2, N_w = 50$

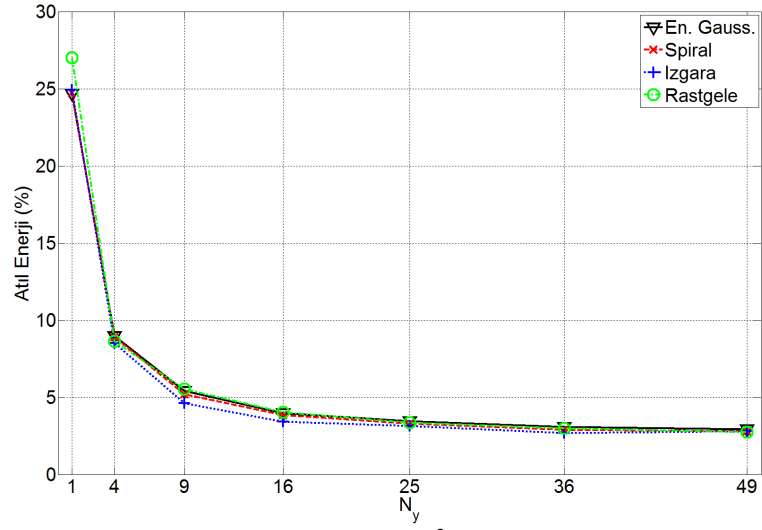


(b) $200 \times 200 m^2, N_w = 75$

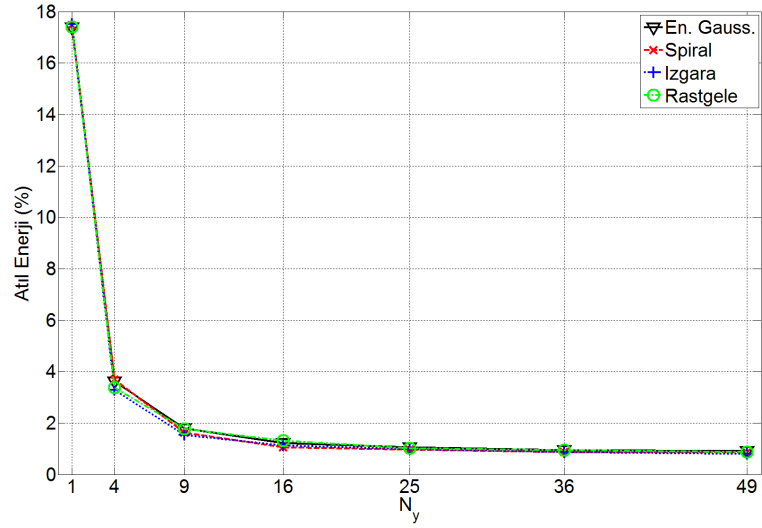


(c) $200 \times 200 m^2, N_w = 100$

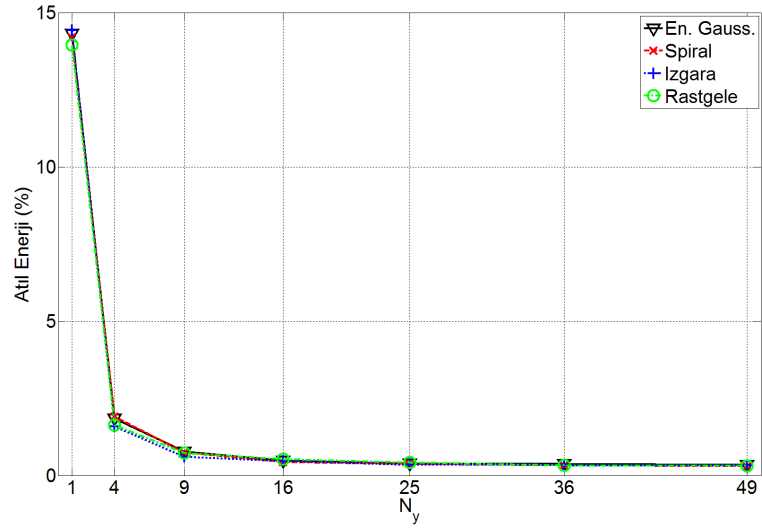
Şekil 6.5: $200 \times 200 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak atıl kalan algılayıcı düğüm enerjisi değişimi (%). a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$.



(a) $300 \times 300 m^2$, $N_w = 50$

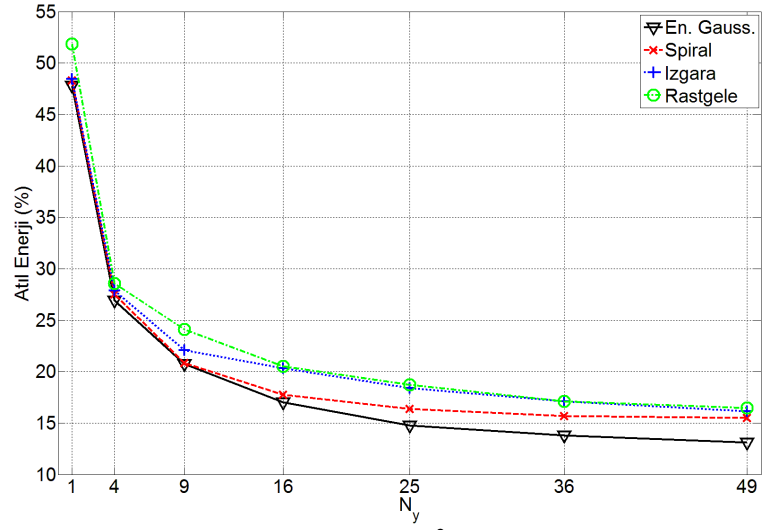


(b) $300 \times 300 m^2$, $N_w = 75$

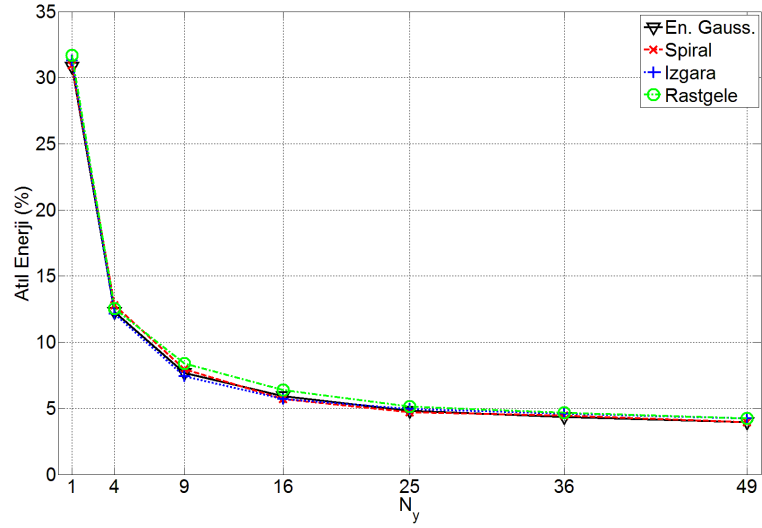


(c) $300 \times 300 m^2$, $N_w = 100$

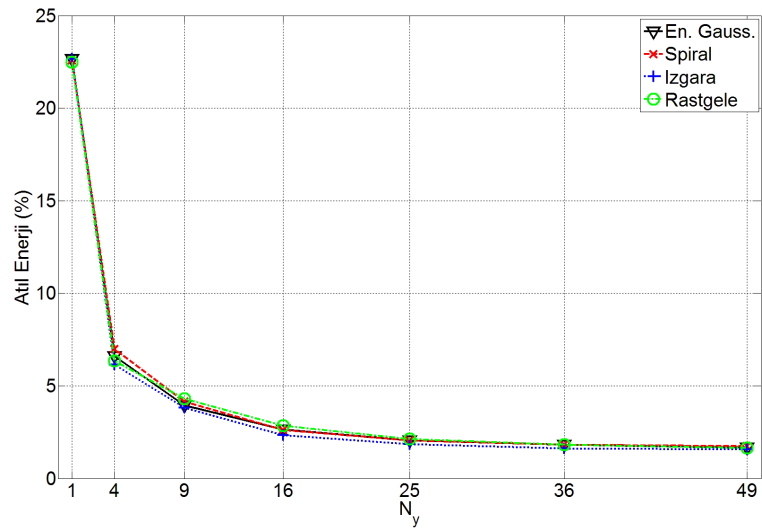
Şekil 6.6: $300 \times 300 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak atıl kalan algılayıcı düğüm enerjisi değişimi (%). a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$.



(a) $400 \times 400 m^2, N_w = 50$

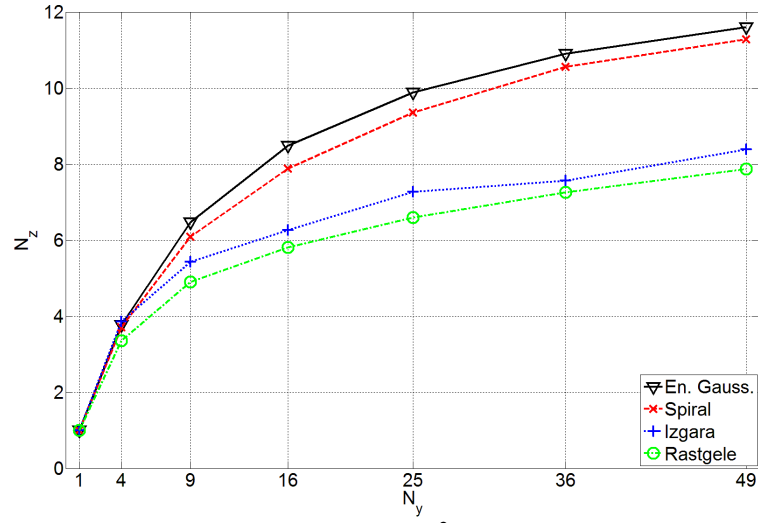


(b) $400 \times 400 m^2, N_w = 75$

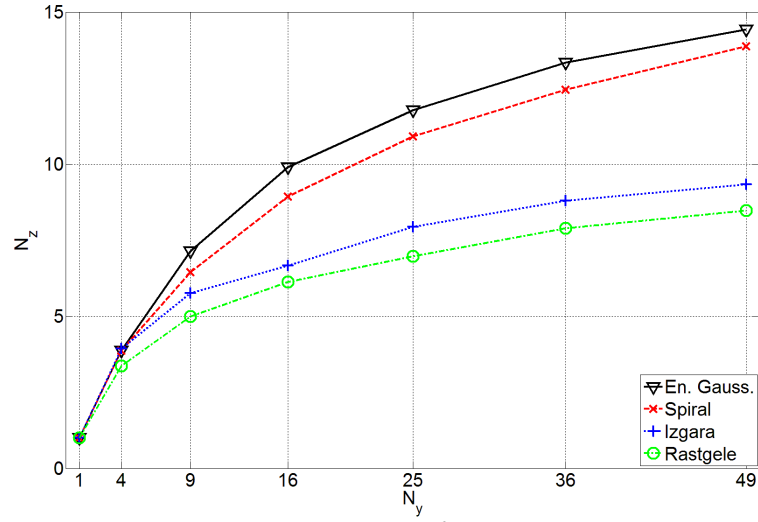


(c) $400 \times 400 m^2, N_w = 100$

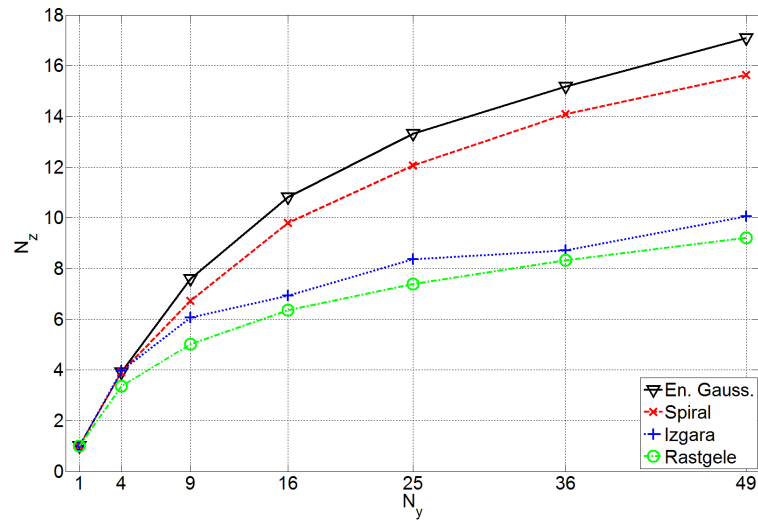
Şekil 6.7: $400 \times 400 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak atıl kalan algılayıcı düğüm enerjisi değişimi (%). a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$.



(a) $200 \times 200 m^2$, $N_w = 50$

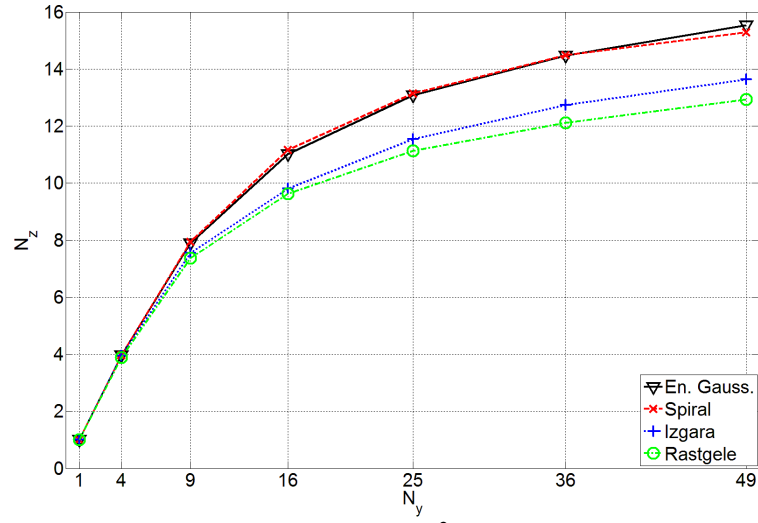


(b) $200 \times 200 m^2$, $N_w = 75$

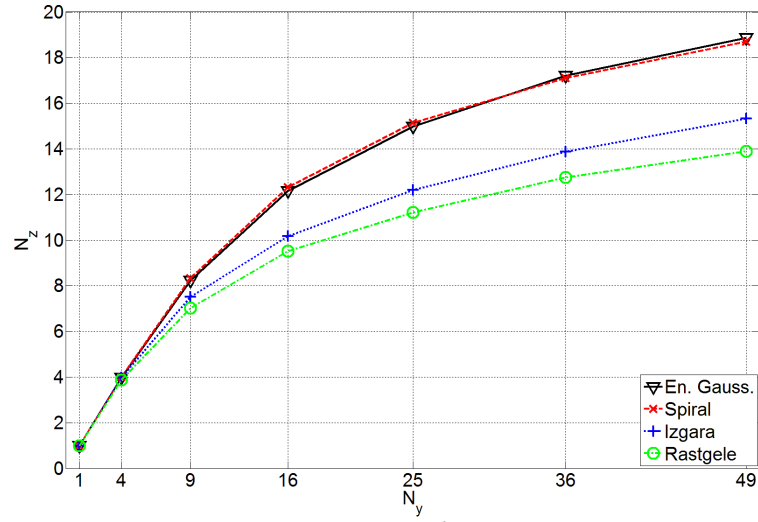


(c) $200 \times 200 m^2$, $N_w = 100$

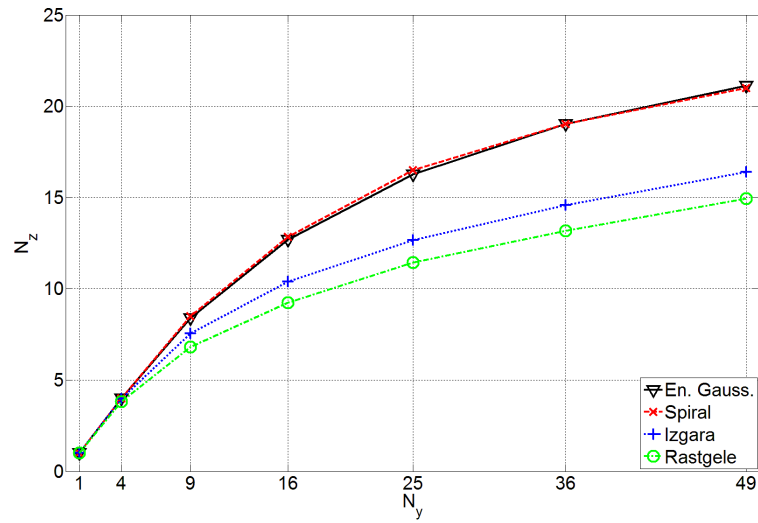
Şekil 6.8: $200 \times 200 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak seçilen ortalama sanal baz istasyonu sayısı değişimi (N_z , a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).



(a) $300 \times 300 m^2, N_w = 50$

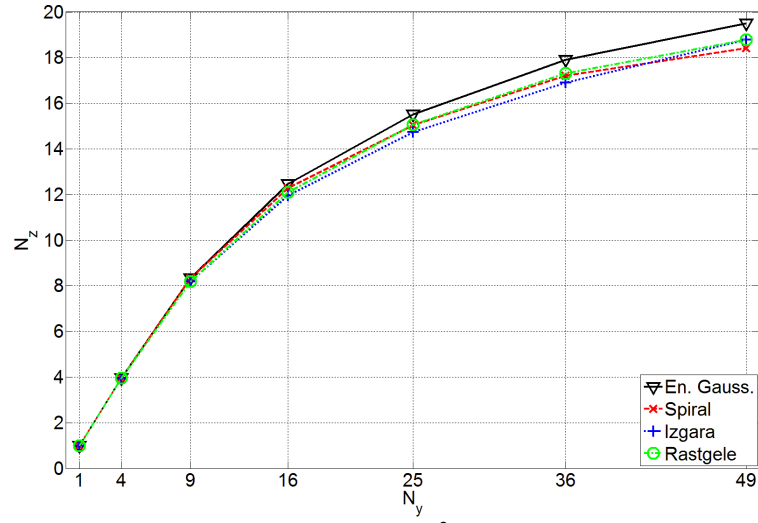


(b) $300 \times 300 m^2, N_w = 75$

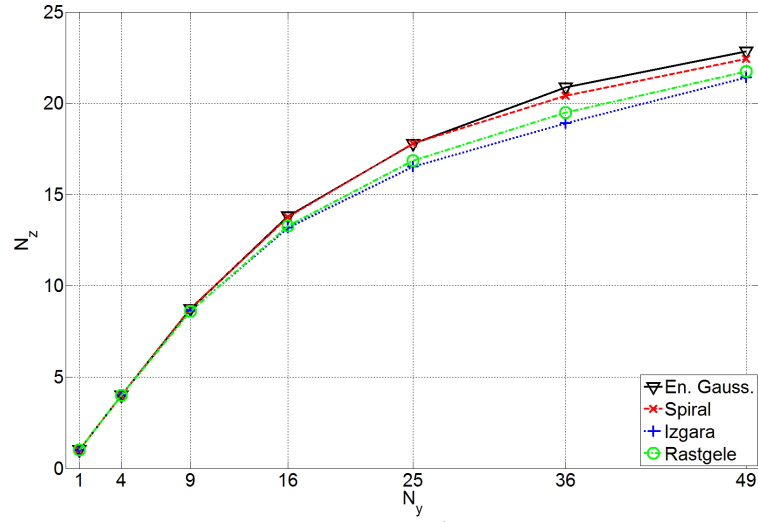


(c) $300 \times 300 m^2, N_w = 100$

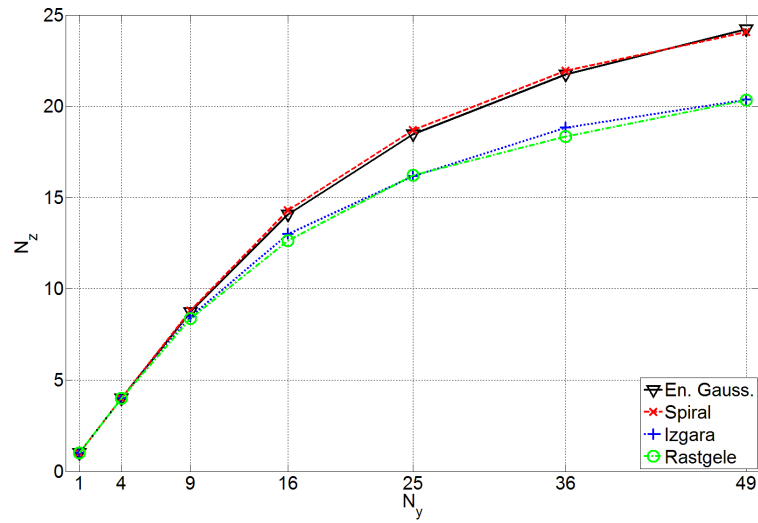
Şekil 6.9: $300 \times 300 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak seçilen ortalama sanal baz istasyonu sayısı değişimi (N_z , a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).



(a) $400 \times 400 m^2, N_w = 50$



(b) $400 \times 400 m^2, N_w = 75$



(c) $400 \times 400 m^2, N_w = 100$

Şekil 6.10: $400 \times 400 m^2$ algılama alanında N_y (baz istasyonu konum kümesi boyutu) değerine bağlı olarak seçilen ortalama sanal baz istasyonu sayısı değişimi (N_z , a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).

göstermektedir (Şekiller 6.8, 6.9 ve 6.10). Bu artış diğer metriklerde de olduğu gibi konum kümesi boyutu N_y arttıkça azalan bir oranda büyümektedir. Örnek olarak rastgele hareket örüntüsünde $300 \times 300 m^2$ algılama alanında 100 algılayıcı düğüm ile ($N_w = 100$), $N_y = 4$, $N_y = 9$, $N_y = 25$ ve $N_y = 49$ için yapılan deneylerde elde edilen yaşam süreleri değerleri sırasıyla 3.81, 6.82, 11.43, ve 14.95 olmaktadır (6.9(c)). Genel olarak bütün deneylerde kullanılan baz istasyonu konumları sayısı Gauss ve spiral örüntülerinde, ızgara örüntüsünden ve ızgara örüntüsünde de rastgele örüntüden daha fazla olmaktadır.

Gauss ve spiral hareket örüntülerinde sanal baz istasyonu konum yoğunluğu ağın geometrik merkezine olan mesafeyle orantılı olarak artmakta ve mesafe büyüdükçe azalmaktadır. Bu sayede ağın merkezine yaklaşıldıkça gezgin baz istasyonunun hareket edebileceği daha fazla aday konum sağlanmış olur. Bununla birlikte, ızgara hareketlilik örüntüsünde sanal baz istasyonu konumları algılama alanı boyunca düzgün olarak dağıtılmışlardır. Dolayısıyla, özellikle algılama alanının çevresine daha yakın konumda olan aday pozisyonlarının önemli bir kısmı optimal konumlar değildir. Tek bir gezgin baz istasyonu için, ağın geometrik merkezine yakın konumlarda daha yüksek yoğunlukta aday baz istasyonu konumu kullanılması daha iyi bir seçimdir çünkü, bu sayede yoğun bölge probleminden etkilenen düğümlerde daha iyi yük dengelenmesi sağlanmakta ve ağ ömrü uzamaktadır.

Burada yapılan çalışmalarda hareketli bir baz istasyonunu mekaniksel hareketi için gereken enerji maliyetinin yapılan analizlerde hesaba katılmadığı unutulmalıdır. Aslında, çalışmalarda ortaya çıkan sonuçlarda baz istasyonu hareketi için gerekli toplam adım sayısının oldukça sınırlı olduğu ortaya çıkmıştır (en uzun ağ yaşam süresinin sağlanması için en fazla 25 hareketlilik adımı yeterli olmuştur). Ayrıca, bu çalışmada baz istasyonu tarafından her adımda katedilecek mesafe eniyilenerek toplam hareket mesafesinin 2 kilometre ile sınırlanması sağlanmıştır ki, bu mesafenin daha da fazla eniyilenmesi mümkündür. Bu nedenle, mobil baz istasyonu gibi davranan bir robot herhangi bir pil ikmali yapmadan yani baz istasyonunun mekanik hareketi için harcanan enerji bir darboğaz oluşturmadan veri toplama görevi yerine getirilebilir [10]. Alternatif olarak, gezgin baz istasyonu üzerine yerleştirilecek bir güneş paneli ve şarj edilebilir bataryalar sayesinde harcanacak olan mekanik enerjinin önemli bir kısmı yenilenebilir kaynaklardan temin edilebilir [26].

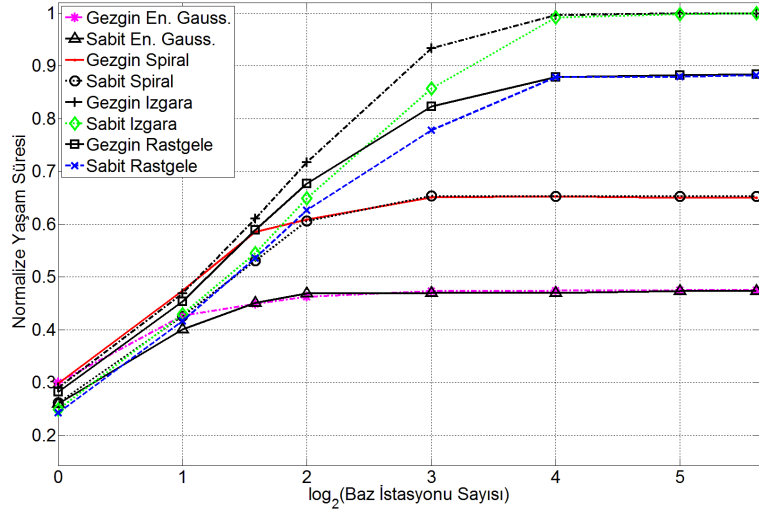
Gezgin baz istasyonunun ağ üzerinde operasyona başlamadan önce yeniden ko-

numlandırılacak uygun pozisyonların hesaplanması ve baz istasyonuna hareketi için transfer edilmesi gerekmektedir. Pratik bir uygulamada, baz istasyonunun veri toplamaya en uygun pozisyonları ziyaret edebilmesi için kendi konum bilgisini de elde edebilmesi gerekmektedir. Baz istasyonu eş zamanlı konum bilgisi baz istasyonu üzerine entegre edilmiş bir GPS cihazı ile kolaylıkla elde edilebilir. Eğer baz istasyonunun kendi konumunu tespit edebilmesini sağlayabilecek bir imkanı bulunmuyorsa veya konum belirleme donanımı işlev dışıysa, bu durumda en iyi alternatif baz istasyonunun rastgele bir hareket örüntüsü ile hareket etmesidir. En verimli hareket örüntüsü olmasa da bu durumda rastgele hareket örüntüsüyle önemli kazanımlar sağlanabilir.

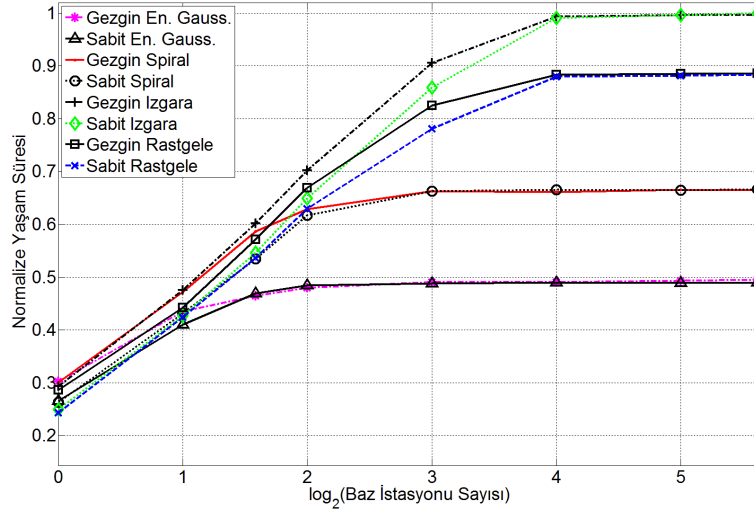
Çoklu baz istasyonu modelleri için alınan toplu sonuçlar Şekil 6.11, 6.12 ve 6.13’de gösterilmektedir. Şekillerde yatay eksen eş zamanlı alım yapabilen baz istasyonu sayısını, dikey eksen ise ağın normalleştirilmiş toplam yaşam süresini göstermektedir. Alınan sonuçlar rastgele, ızgara, spiral ve eniyileştirilmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüleri için farklı algılama alanı büyüklükleri ve algılayıcı düğüm sayılarında elde edilmiş değerlerdir. Burada ağ yaşam süresinin baz istasyonu sayısının bir fonksiyonu olarak verilmesinin nedeni, baz istasyonu sayısının artırılmasıyla algılayıcı düğümler için daha kısa haberleşme mesafelerinin ve dolayısıyla da daha düşük ortalama enerji tüketiminin mümkün olmasıdır.

Şekil 6.11, 6.12 ve 6.13’de açıkça görüldüğü gibi, eş zamanlı alım yapabilen baz istasyonu sayısı arttıkça ağın yaşam süresi de artmaktadır. Ancak, ağ yaşam süresindeki artış oranı belirli bir sayıdan daha fazla baz istasyonu kullanılmaya başlandıktan sonra çok küçük olmaktadır yani bir doyuma ulaşılmaktadır. Örneğin, ızgara hareketlilik örüntüsü ile birden fazla hareketli baz istasyonu kullanıldığında baz istasyonu sayısı 16’dan büyük olduğun durumda maksimum ağ ömrünün %98’ine ulaşılmaktadır. Aynı eğilim spiral ve rastgele hareket örüntüleri içinde geçerlidir. Bu davranış, azalan marjinal verimler kanunu ile açıklanabilir.

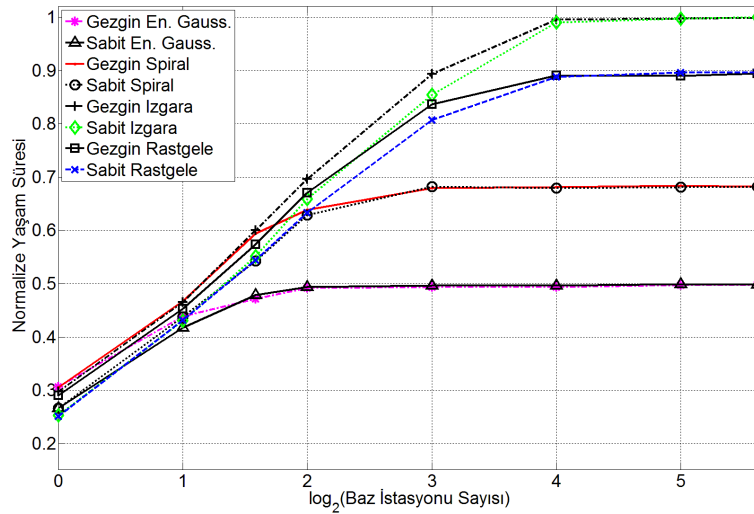
Bir başka ilginç ve önemli gözlem, bütün baz istasyonu hareketlilik örüntülerinde çoklu baz istasyonu kullanımı tek bir mobil baz istasyonu kullanıldığı duruma kıyasla ağ ömrünü önemli ölçüde iyileştirmiş olmasıdır. Bu artış seyrek ağ topolojilerinde, kullanılan baz istasyonu sayısındaki artışla doğrusal orantılı olarak ağ ömründe bir artışa neden olmaktadır. Benzer şekilde, ağ yoğunluğu daha da arttıkça ilişki doğrusal olmayan bir şekil almaktadır. Şekil 6.13(a), 6.13(b) ve 6.13(c)’deki deney sonuçlarına göre algılama alanı boyutunun $\geq 400 \times 400 m^2$ ve



(a) $200 \times 200 m^2, N_w = 50$

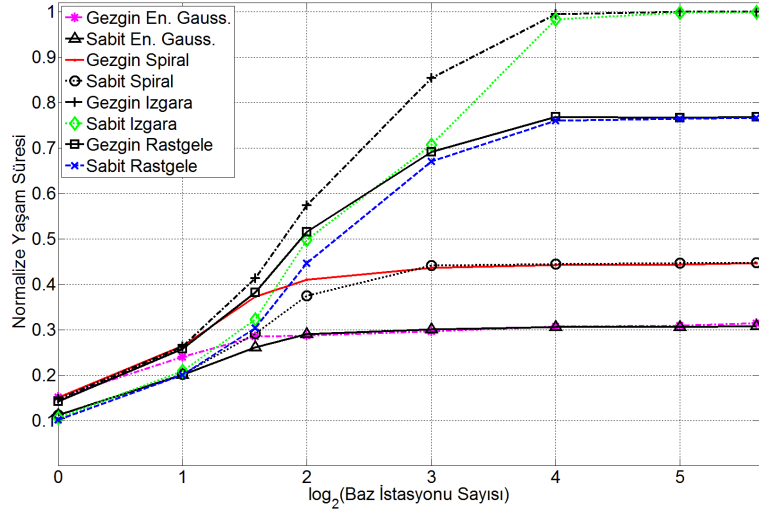


(b) $200 \times 200 m^2, N_w = 75$

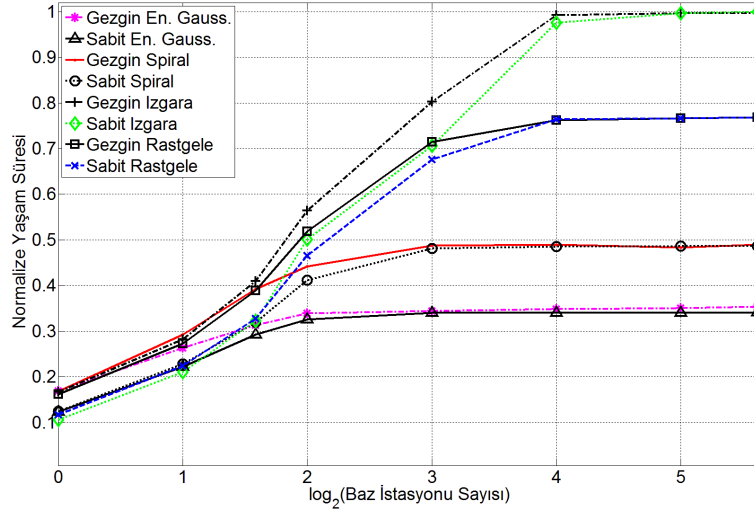


(c) $200 \times 200 m^2, N_w = 100$

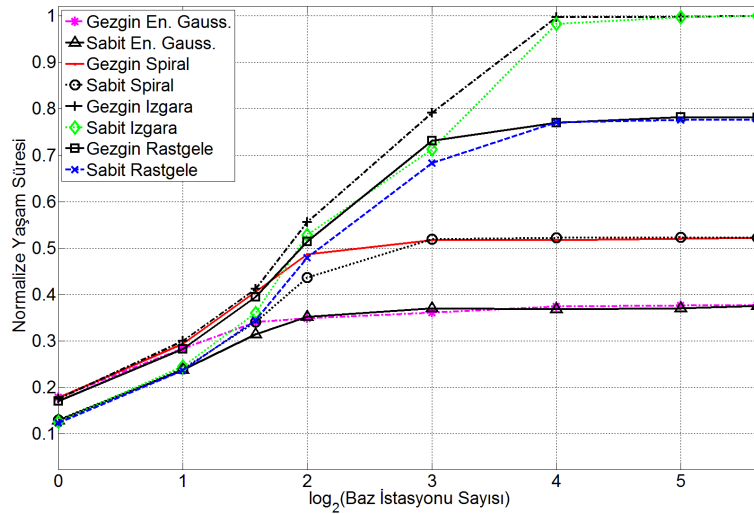
Şekil 6.11: Çok baz istasyonlu sistemlerde baz istasyonu sayısına bağlı olarak normalleştirilmiş ağ yaşam süresinin değişimi ($200 \times 200 m^2$ alanda, a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).



(a) $300 \times 300 m^2$, $N_w = 50$

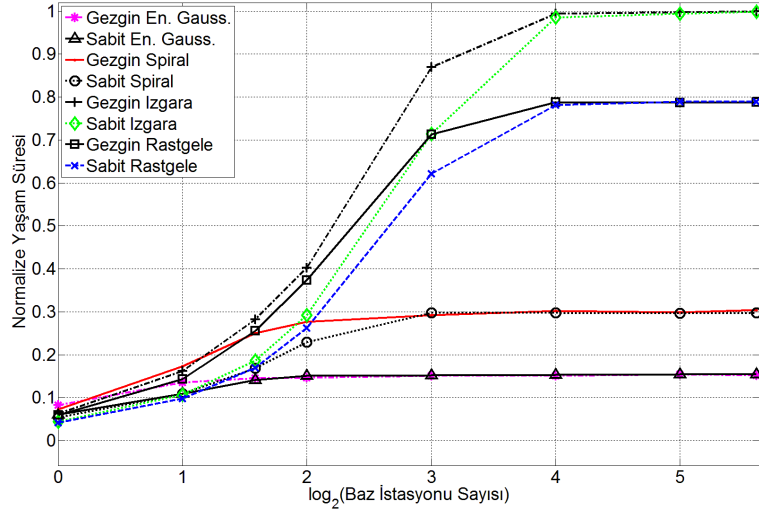


(b) $300 \times 300 m^2$, $N_w = 75$

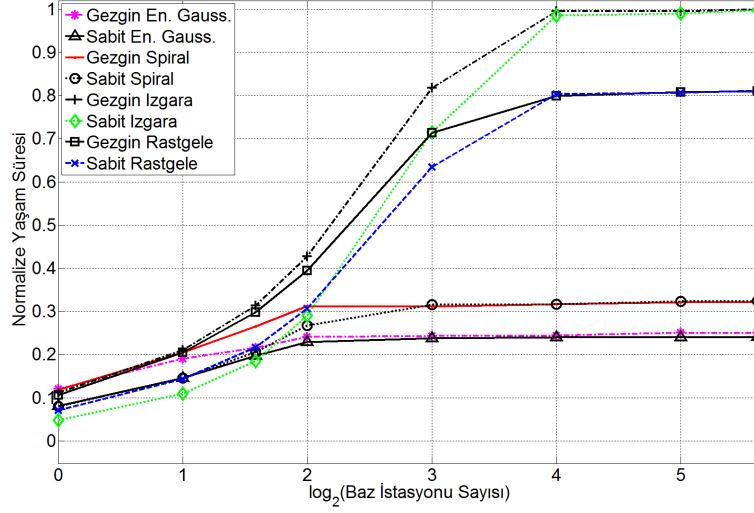


(c) $300 \times 300 m^2$, $N_w = 100$

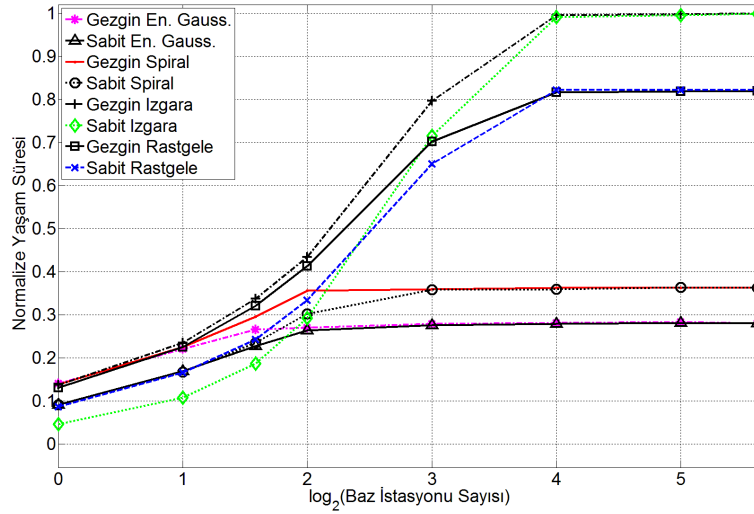
Şekil 6.12: Çok baz istasyonlu sistemlerde baz istasyonu sayısına bağlı olarak normalleştirilmiş ağ yaşam süresinin değişimi ($300 \times 300 m^2$ alanda, a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).



(a) $400 \times 400 m^2$, $N_w = 50$



(b) $400 \times 400 m^2$, $N_w = 75$



(c) $400 \times 400 m^2$, $N_w = 100$

Şekil 6.13: Çok baz istasyonlu sistemlerde baz istasyonu sayısına bağlı olarak normalleştirilmiş ağ yaşam süresinin değişimi ($400 \times 400 m^2$ alanda, a) $N_w = 50$, b) $N_w = 75$, c) $N_w = 100$).

baz istasyonu sayısının ≤ 16 olduğu durumlarda ağ yaşam süresi baz istasyonu sayısı ile orantılı olarak artmaktadır. 16'dan daha fazla eş zamanlı baz istasyonu kullanılması ise gözlenebilir herhangi bir başarıyı iyileşmesi sağlamamıştır.

Deneylerde en dramatik artış ızgara hareketlilik örüntüsünde birden fazla sabit konumlu baz istasyonu modeli ile elde edilmiştir. Burada çoklu baz istasyonu kullanıldığı takdirde, ağ yaşam süresi sonuçları 22 kat artış göstermektedir. Örnek olarak ızgara hareket örüntüsü için, algılama alanı boyutunun $400 \times 400 m^2$, algılayıcı düğüm sayısının 50 ($N_w = 50$) ve baz istasyonu sayısının 1, 4, 16 olduğu durumlarda normalleştirilmiş ağ yaşam süresi değerleri Şekil 6.13(a)'da da gösterildiği gibi sırasıyla, 0.045, 0.40 ve 0.99 olarak ölçülmüştür.

Çoklu baz istasyonlarında genel eğilim ızgara hareket örüntüsünün en yüksek ağ yaşam süresini verirken, spiral ve eniyelenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsünün en düşük ağ yaşam süresini vermesi şeklindedir. Rastgele hareket örüntüsü ise bu örüntülerin arasında kalan bir ağ yaşam süresi değeri vermektedir. Ayrıca ızgara ve rastgele hareket dağılımları arasında en az %10 performans farkı olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark ağ yoğunluğu seyrekleştikçe daha da büyümektedir. Örnek olarak bu çalışmadaki en seyrek deney senaryosu olan algılama alanı boyutunun $400 \times 400 m^2$, algılayıcı düğüm sayısının 50 ($N_w = 50$) ve baz istasyonu sayısının 16 olduğu deney senaryosunda ızgara hareket örüntüsü rastgele hareket örüntüsünden %21 ve spiral hareket örüntüsünden ise %70 daha fazla ağ yaşam süresi sağlamaktadır. Böyle bir davranışın nedeni, büyük algılama ağlarında enerji dengeleme ihtiyacının daha belirgin olmasıdır. Başka bir deyişle, daha küçük algılama alanlarında büyük ağlara oranla algılayıcı düğümler enerji dağılımını daha verimli olarak dengeleyebilirler. Bu sonuç aynı zamanda yoğun-bölge probleminin olumsuz etkilerinin seyrek ve geniş algılama ağlarında daha belirgin olduğu şeklinde tercüme edilebilir.

Çoklu baz istasyonu modeli için yapılan deney sonuçlarından elde edilen en iyi performans değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Sonuçlara göre 16 hareketli baz istasyonuna sahip model ağın yaşam süresini, algılayıcı düğüm sayıları 50, 75 ve 100 için ($N_w = 50$, $N_w = 75$ ve $N_w = 100$) sırasıyla 22.15, 22.22 ve 22.24 kez artırmaktadır. Benzer şekilde, 16 sabit baz istasyonuna sahip model ağın yaşam süresini, algılayıcı düğüm sayıları 50, 75 ve 100 için sırasıyla 22.03, 22.10 ve 22.16 kez artırmaktadır. Buradaki karşılaştırmalarda referans alınan değer tek sabit baz istasyonu bulunan senaryo konfigürasyonunda alınan yaşam süresi değeridir.

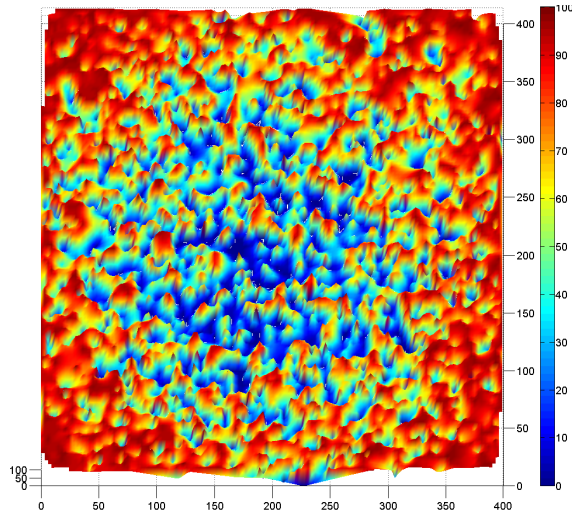
Çizelge 6.2: Çoklu baz istasyonu kullanımının KAA yaşam süresine olan etkisi (Izgara tabanlı hareket örüntüsü).

Algılama Alanı Boyutu	Düğüm Sayısı	Baz İstasyonu Sayısı	Baz İstasyonu tipi	Ağ Yaşam Süresindeki Artış
400x400m ²	50	1	Sabit	1.00X
400x400m ²	50	16	Sabit	22.03X
400x400m ²	50	1	Hareketli	1.40X
400x400m ²	50	16	Hareketli	22.15X
400x400m ²	75	1	Sabit	1.07X
400x400m ²	75	16	Sabit	22.10X
400x400m ²	75	1	Hareketli	2.50X
400x400m ²	75	16	Hareketli	22.22X
400x400m ²	100	1	Sabit	1.10X
400x400m ²	100	16	Sabit	22.23X
400x400m ²	100	1	Hareketli	3.06X
400x400m ²	100	16	Hareketli	22.24X

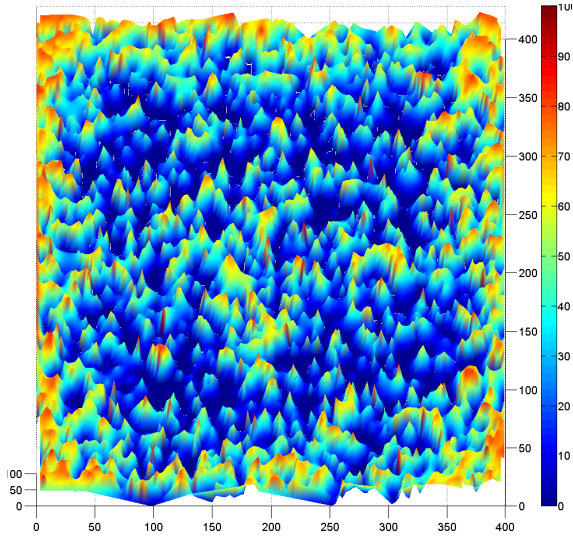
Deney sonuçlarının bir diğer kayda değer çıkarımı, hareketli yada sabit konumlu birden fazla baz istasyonunun kullanıldığında, düzgün dağılımlı hareket örüntülerinin düzgün dağılımlı olmayan hareket örüntülerinden daha iyi performans göstermesidir. Düzgün dağılımlı olan rastgele ve ızgara hareket örüntüleri, düzgün dağılımlı olmayan spiral ve eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntülerinden daha uzun süreli ağ yaşam süreleri vermiştir.

Daha önceden tek bir mobil baz istasyonu için düzgün dağılımlı olmayan merkez yoğun dağılımların diğer düzgün dağılımları performans olarak geride bıraktığı gösterilmişti. Fakat çoklu baz istasyonlu sistemlerde düzgün dağılımlar daha iyi performans vermektedirler. Ağ performansındaki bu değişimin nedeni 6.14 ve 6.15 numaralı şekiller incelenirse daha iyi bir biçimde anlaşılabilir.

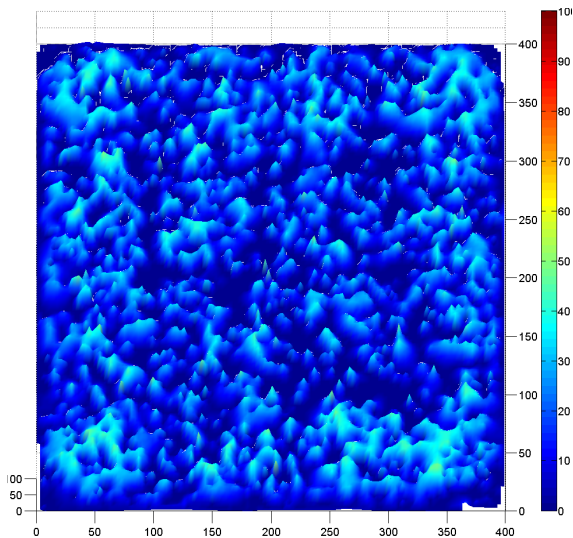
Bu şekillerde, 50 algılayıcı düğümün 400x400m² algılama alanına dağıtıldığı çoklu baz istasyonu konfigürasyonlarında ağın yaşam süresi sona erdikten sonra düğümlerde artık olarak geriye kalan düğüm enerjisi(%) dağılımları yüzey grafikleri olarak gösterildi. Burada, sırasıyla daha açık renkler(kırmızıya yakın) arta kalan enerjiyi, daha koyu renkler(maviye yakın) ise tüketilen enerjiyi temsil etmektedir. Bu figürler özetle, ağda eş zamanlı olarak kullanılmakta olan baz istasyonu sayısı arttırıldıkça, algılayıcı düğümlerde harcanan enerjilerinde daha dengeli bir şekilde dağıtıldığını göstermektedir. Bu sayede ağın yaşam süresindeki iyileşmeler daha iyi açıklanabilir.



(a) 1 statik baz istasyonu

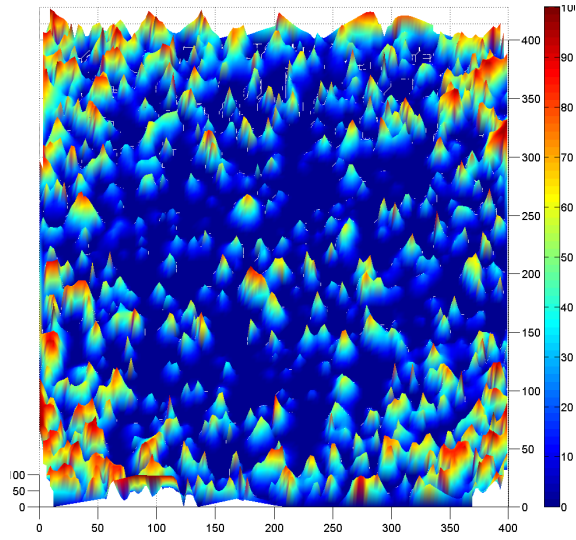


(b) 4 statik baz istasyonu

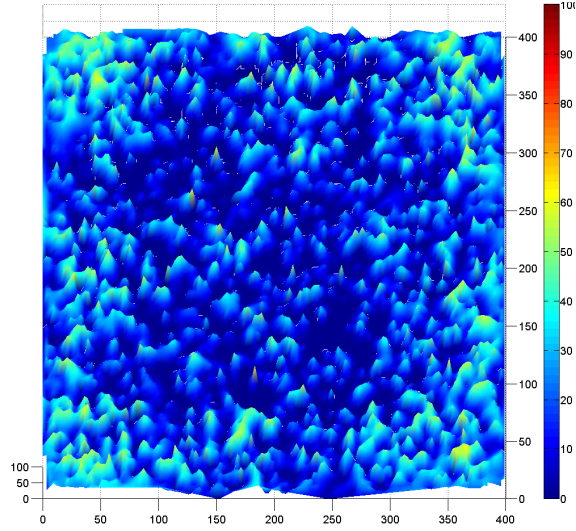


(c) 16 statik baz istasyonu

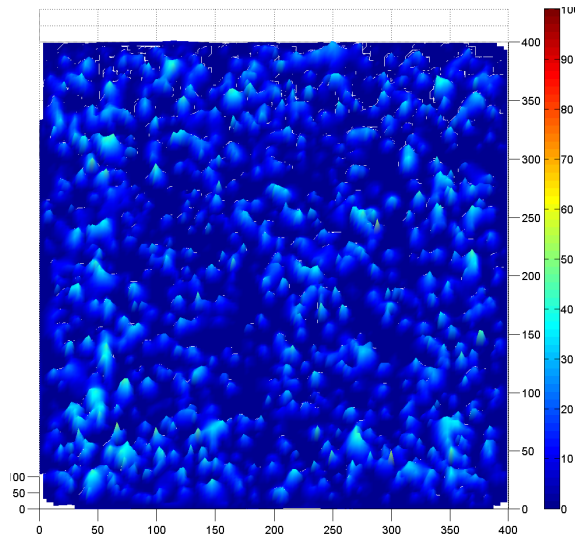
Şekil 6.14: Sabit konumlu baz istasyonlarında farklı sayıda baz istasyonu (a) 1, b) 4 ve c) 16) kullanıldığında, ağ sona ermesinden sonra geriye artarak kalan düğüm enerjisi(%) dağılımları (50 düğüm, $400 \times 400 m^2$ algılama alanı).



(a) 1 gezgin baz istasyonu



(b) 4 gezgin baz istasyonu



(c) 16 gezgin baz istasyonu

Şekil 6.15: Gezgin baz istasyonlarında farklı sayıda baz istasyonu (a) 1, b) 4 ve c) 16) kullanıldığında, ağ sona ermesinden sonra geriye artarak kalan düğüm enerjisi(%) dağılımları (50 düğüm, $400 \times 400 m^2$ algılama alanı).

KAA'larda verimliliğin ölçülmesinde, ağdaki algılayıcı düğümlerin enerjilerini ne ölçüde kullanabildiklerinin önemli bir metrik olduğu olduğu açıktır. Bunun nedeni, algılayıcı düğümlerin boşta kalan enerji seviyelerinin mümkün olduğunca düğümler arasında birbirine eşit olması gerektiğidir. Çünkü verimli bir KAA yapısında sağlanabilecek en uzun ağ yaşam süresi değeri algılayıcı düğümlerin enerjilerini kendi aralarında dengeli bir biçimde harcayarak tüketmeleri ile elde edilebilir.

Genellikle algılayıcı düğümlerde atıl olarak kalan kullanılmamış enerji değerleri baz istasyonu çevresindeki yoğun-bölgelerde bulunan düğümlerin ölümleriyle ağın yaşam süresinin erken sonlanmasından kaynaklanmaktadır. Eğer bir algılayıcı düğüm enerjisini daha hızlı tüketir ve diğer düğümlerden daha önce ölür ise KAA görevini düzgün olarak yerine getiremez. Bunun bir sonucu olarak da, tüm ağ çöker ve diğer algılayıcı düğümlerin kalan enerji seviyeleri artık kullanılamaz hale gelir.

Şekil 6.14'te sabit konumlu baz istasyonları için farklı sayıda baz istasyonu kullanıldığı durumlarda, ağ sona ermesinden sonra geriye artık olarak kalan düğüm enerjisi(%) dağılımları gösterilmiştir. Benzer şekilde Şekil 6.15'te gezgin baz istasyonları için farklı sayıda baz istasyonu kullanıldığı durumlarda, ağ sona ermesinden sonra geriye artık olarak kalan düğüm enerjisi(%) dağılımları gösterilmiştir.

Yoğun-bölge sorunun etkileri Şekil 6.14(a)'da çok belirgin bir şekilde gözlemlenebilir. Burada görünen durum ağın dış tarafa yakın bölgelerindeki enerji tükenmeden ağın merkezine yakın bölgelerde enerjinin çoğunun tükenmiş olmasıdır. Bu enerji dağılımı verimsiz bir enerji dengelemesini gösterir ve bu nedenle bu ağ yapılandırması benzer yapılandırmalardan ve olması gerekenden çok daha erken bir sürede sona erer.

Ancak, sabit tek bir baz istasyonu yerine gezgin bir baz istasyonu kullanıldığı durumda enerji dengelenmesi açısından bir miktar iyileşme görülmektedir. Şekil 6.15(a)'da hareketli tek bir baz istasyonu ve 6.14(a)'da sabit konumlu tek bir baz istasyonunun aynı şartlar altında kullanıldığında oluşan atıl enerji seviyelerinin yüzey grafikleri verilmiştir. Şekillerde görülebileceği gibi, hareketli bir baz istasyonu kullanıldığında algılama alanı dışına yakın bazı küçük bölgeler dışında enerji dağılımı daha dengeli bir hale gelmektedir.

Çoklu baz istasyonu yapılandırmaları tek baz istasyonlu yapılandırmalarla karşı-

laştırdığımızda enerji dengelenmesinin çok baz istasyonlu yapılandırmalarda çok daha dengeli olduğu ve yoğun-bölge sorununun etkisinin çoğunlukla kaybolduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.14(b) ve Şekil 6.15(b)'de 4 sabit konumlu baz istasyonu ve 4 gezgin konumlu baz istasyonu ile yapılan deneylerden alınan atıl enerji seviyeleri verilmiştir. Bu sonuçlar, çok baz istasyonlu yapılandırmaların enerji dengelendirmesini tek baz istasyonlu yapılandırmalardan çok daha verimli bir şekilde gerçekleştirebildiklerini göstermektedir. Ayrıca, eşit sayıda gezgin baz istasyonu ve sabit konumlu baz istasyonu kullanıldığı durumda, gezgin baz istasyonlarının KAA ağında enerji verimliliğini sabit konumlu baz istasyonlardan daha iyi sağladığı tespit edilmiştir. Kullanılan baz istasyonu sayısı daha da artırıldığında ise deneylerden alınan sonuçlar enerji dağılımının daha dengelendiğini ve KAA yaşam süresinin daha uzun olduğunu göstermiştir. Şekil 6.14(c) ve Şekil 6.15(c)'de sırasıyla 16 sabit konumlu ve 16 gezgin konumlu baz istasyonu kullanıldığına elde edilen atıl enerji figürleri gösterilmiştir. Bu figürler yaptığımız çıkarımı daha güçlü bir şekilde teyit etmektedir.

Bu sonuçlar çok baz istasyonlu ağ yapılandırmalarında yoğun-bölge probleminin olumsuz etkilerini yitirmesi ile açıklanabilir. Alınan neticeler baz istasyonu sayısının arttıkça yoğun-bölge probleminin etkisinin o ölçüde kaybolduğunu göstermektedir.

Çok baz istasyonlu yapılandırmalarda sabit konumlu ve gezgin baz istasyonları için ilginç performans değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 6.11, 6.12 ve 6.13'deki sonuçlardan da görülebileceği gibi, 16 ve daha fazla eş zamanlı baz istasyonu kullanımının ($N_y \geq 16$) ağ ömrünü artırıcı herhangi bir olumlu etkisi tespit edilmemiştir.

Örnek olarak, gezgin ve sabit konumlu baz istasyonlarında rastgele, ızgara, spiral ve eniyilenmiş Gauss hareket örüntüleri için 16 ve üzeri baz istasyonu kullanıldığında ($N_y \geq 16$) normalize ağ yaşam süresi değerleri 0.98 den daha büyüktür.

Ancak, $400 \times 400 m^2$ algılama alanında 50, 75 ve 100 algılayıcı düğüm ile spiral hareket örüntüsünü kullanan 4 gezgin baz istasyonu, aynı yapılandırmada kullanılan 8 sabit konumlu baz istasyonu performansına denk bir performans sergilemişlerdir.

Buna ek olarak, $400 \times 400 m^2$ algılama alanında rastgele hareket örüntüsü ile hareket eden 8 gezgin baz istasyonu, ızgara hareketlilik örüntüsü ile dağıtılmış 8

sabit konumlu baz istasyonuyla benzer performans sergilemektedir(Şekil 6.13(a), 6.13(b) ve 6.13(c)). Bu nedenle, eğer algılama alanında konum belirlemede çeşitli güçlükler yaşıyorsa gezgin baz istasyonlarını rastgele hareket örüntüsüne geçerek hareket etmeleri uygun bir tercih olabilir.

Deneylerden gözlemlenen diğer bir ilginç sonuç ise, $400 \times 400 m^2$ algılama alanında 75 ve 100 algılayıcı düğümün bulunduğu yapılandırmada 3 gezgin baz istasyonu ile alınan başarımın aynı yapılandırmada 4 sabit konumlu baz istasyonu ile alınan başarımından daha iyi olduğudur (Şekil 6.13(b) ve 6.13(c)). Bu deney senaryolarında eğer 4 sabit konumlu baz istasyonu maliyeti, 3 gezgin baz istasyonu maliyetinden daha düşük ise sabit konumlu baz istasyonlarının seçilmesi hem işlev hem de kullanılabilirlik bakımından daha tercih edilebilir bir seçenek olmaktadır. Be tercih yapılmadan önce gezgin ve sabit konumlu baz istasyonları için bir maliyet analizi çalışması yapılması gereklidir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, KAA yaşam süresini uzatmak amacıyla çoklu gezici baz istasyonu yeniden konumlandırılması için dört farklı hareketlilik örüntüsünün (spiral, ızgara, rastgele ve eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüleri) etkilerini incelemiş bulunuyoruz. Ayrıca, benzer konfigürasyonlar altında birden fazla gezici ve sabit konumlu baz istasyonu için alınan sonuçları karşılaştırdık. Adil koşullar altında hareketlilik örüntülerinin performans özelliklerini değerlendirebilmek için, baz istasyonu konum kümesi ve veri akışı açısından optimum ağ çalışma koşulları altında hesaplamalar yapıldı. Diğer bir deyişle, bu çalışmada elde edilen tüm ağ yaşam süresi değerleri, inceleme kapsamında belirli senaryo parametreleri için optimum ulaşılabilir çözümlerdir. Çalışmada geliştirilmiş olan karma tamsayı programlama çerçeveleri veri akışlarını, baz istasyonu pozisyon değişimlerini ve her pozisyondaki bekleme zamanlarını her bir sanal baz istasyonu için algılayıcı düğüm dağılımı ve hareket örüntüsüne göre optimize ederek hesaplamaktadır. Ayrıca, bu çalışmada Mica2 algılayıcı düğümlerinin enerji tüketim karakteristikleri ve maksimum iletim aralığı özelliklerini kullanıldı. Burada yapılan modelleme ve formülasyonlar, bizlere, KAA tasarım uzayını baz istasyonu sayısı, algılayıcı düğüm sayısı ve algılama alanı büyüklüğü parametreleri açısından incelememizi sağlamıştır. Hem gezgin, hem de sabit konumlu baz istasyonları ağ yaşam süresi açısından yukarıda belirtilen hareketlilik örüntüleri kullanılarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın motivasyonu olan ve çalışma kapsamında ele alınan problemin, KAA literatüründe daha önceden sistematik olarak araştırılmadığı da göz önüne alınarak Bölüm 1.2'te bazı soru ifadeleri belirlenmişti. Bu sorulara ilişkin cevaplar aşağıda verilerek çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Yapılan bu çalışmanın başlıca özgün katkıları listelenmek gerekirse:

1. Hareketlilik örüntülerinin performansı eş zamanlı alıcıların sayısına bağlı olarak değişmektedir. Tek bir alıcı için en uzun ağ ömrü, eniyilenmiş Gauss dağılımlı ve spiral hareketlilik örüntüsü ile elde edilmekteyken, çoklu baz istasyonları kullanıldığında, diğer bir deyişle baz istasyonu sayısı ≥ 2 olduğu durumda, hem gezgin hem de sabit konumlu baz istasyonları için

ızgara hareketlilik örüntüsü en iyi ağ yaşam süresi değerini vermektedir. Öte yandan, çoklu baz istasyonu modelinde 2'den daha fazla sayıda baz istasyonu kullanıldığında en kötü performansı spiral hareket örüntüsü vermektedir. Dahası, rastgele hareket deseni 2'den daha fazla sayıda baz istasyonu kullanıldığı tüm deneylerde alıcı sayısından bağımsız olarak ızgara ve spiral/eniyilenmiş Gauss hareketlilik desenleri arasında bir performans sergilemiştir. Özetlemek gerekirse, tek bir alıcı baz istasyonu kullanıldığında düzgün olmayan merkezci bir hareket örüntüsü daha iyi performans sağlarken; birden fazla baz istasyonu kullanıldığında homojen dağılıma sahip düzenli bir hareket örüntüsü daha uzun ağ yaşam süresi sağlamaktadır.

2. Çok baz istasyonlu konfigürasyonlarda tek baz istasyonlu konfigürasyonlara göre en az 20 kat daha fazla ağ ömrü elde edilmiştir. Bazı deney senaryolarında ise 22 kat daha fazla yaşam sürelerine ulaşılmıştır. Deney senaryolarının çoğunda baz istasyonu sayısı ≥ 16 seçildiğinde optimum ağ yaşam süresi değeri elde edilmiştir. Bu nedenle, baz istasyonu sayısını 16'dan daha fazla artırmak ağ yaşam süresini uzatmak için gerekli değildir. Çoklu gezgin baz istasyonları için, 16 baz istasyonlu ızgara örüntülü düzgün dağılımlı baz istasyonu konumlandırma örüntüsü, tüm deneylerde en iyi performansı vermiştir.
3. Baz istasyonu sayısı > 16 için, sabit ve mobil baz istasyonları, birbirlerine yakın performans göstermektedir. Ancak, 2 ve 16 arasında bir sayıda baz istasyonu kullanıldığı durumlarda, gezgin baz istasyonları sabit baz istasyonlarına göre %10 – 15 daha fazla ağ yaşam süresi sağlamaktadır.
4. Sabit konumlu ve gezgin baz istasyonları için, baz istasyonu sayısını 16'dan fazla artırma işleminin gözle görülür bir performans artışı sağlamadığı sonucuna varılmıştır. Sayının 16'dan daha az olması durumunda gezgin baz istasyonları, sabit baz istasyonlarına göre daha iyi bir performans sağlamıştır.
5. Mobil baz istasyonlarının kurulumu ve yönetimi, yüksek enerji ihtiyacı ve algılama alanında pozisyonlarının belirlenmesi gereksinimleri nedeniyle kendine özgü zorlukları bulunmaktadır. Ayrıca bir mobil baz istasyonunun maliyeti, sabit konumlu bir baz istasyonuna göre daha yüksek olmaktadır. Örnek olarak Şekil 6.13(b) ve Şekil 6.13(c)'de gösterilen $400 \times 400m^2$ algılama alanında 75 ve 100 algılayıcı düğüm için alınan deney sonuçlarına göre 3 gezgin baz istasyonu 4 sabit konumlu baz istasyonuna daha yakın fakat, 5

sabit konumlu baz istasyonundan daha kötü bir performans sergilemiştir. Bu nedenle eğer 4 sabit baz konumlu istasyonu maliyeti, 3 hareketli baz istasyonu maliyetinden daha düşük olursa gezgin baz istasyonları yerine sabit konumlu baz istasyonları kullanımı daha mantıklı bir seçenek olabilir.

Çoklu baz istasyonu modelinde baz istasyonu sayısı ≥ 16 durumlarda ızgara hareketlilik örüntüsü kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilen ağ yaşam süresi değeri, rastgele ve spiral hareket örüntüleri kullanılan sistemlere göre sırasıyla %25 ve %330 daha fazla olabilmektedir (Şekil 6.13(a)). Ayrıca gezgin tek bir baz istasyonu kullanıldığı durumda eniyilenmiş Gauss dağılımlı hareket örüntüsü kullanılarak elde edilen sistemin ağ yaşam süresi değeri ızgara ve rastgele hareket örüntüleri kullanılarak elde edilen ağ yaşam süresi değerlerine göre sırasıyla %17 ve %22 daha fazla olmaktadır.

Bu farklılığın nedeni rastgele ve ızgara hareket örüntülerinin aksine, eniyilenmiş Gauss dağılımlı ve spiral dağılımlı hareket örüntülerinin izledikleri rota ile algılama alanını geometrik merkeze yaklaştıkça daha detaylı olarak örneklemeleridir. Tek bir hareketli baz istasyonu için, bu sayede yoğun bölge problemine karşı daha fazla olası eniyilenmiş konum sağlanıp ağın yaşam süresinin daha da artırılabilmesi mümkün olabilir. Ancak, birden fazla hareketli baz istasyonu kullanıldığı durumda ızgara tabanlı hareket örüntüsü baz istasyonlarını ağ etrafına düzenli olarak dağıtmaktadır. Bu sayede algılayıcı düğümler için daha kısa haberleşme mesafeleri mümkün olduğundan daha az enerji harcanmakta ve dolayısıyla daha uzun ağ yaşam süreleri elde edilmektedir.

Alınan sonuçlar, eş zamanlı olarak kullanılan baz istasyonu sayısının ağ ömrünü uzatmak için çok büyük olması gerekmediğini göstermektedir. Aslında, 16'dan daha az sayıda baz istasyonu kullanarak maksimum eş zamanlı baz istasyonu ile elde edilebilecek ağ yaşam süresinin %98'ine ulaşmak mümkündür. Ayrıca, ızgara hareketlilik örüntüsünü kullanarak sadece 8 gezici baz istasyonu ile elde edilebilecek ağ yaşam süresinin %80'ine ulaşmak mümkün olabilmektedir.

Özetlemek gerekirse, bu çalışmada hem gezici hem de sabit konumlu baz istasyonları ile birden çok baz istasyonlu yapılandırmalar incelendi ve bu yapılandırmalarda gezici bir baz istasyonu için farklı hareket örüntülerinin analizi yapıldı. Ek olarak gezici bir baz istasyonu için eniyilenmiş hareket örüntüsü modeli geliştirildi. Alınan sonuçlar, çok baz istasyonlu sistemlerde, yoğun-bölge sorununun çoğunlukla ortadan kalktığını göstermektedir. İlginç bir şekilde, deneylerden alı-

nan sonuçlar 8 ve daha fazla sayıda baz istasyonu kullanıldığında yoğun-bölge sorununun ağırlığını önemli ölçüde yitirdiğini göstermektedir. Fakat, bu durumda en uzun ağ yaşam süresi değerine ulaşabilmek için düzgün dağılımlı baz istasyonu hareket örüntüsü kullanımı olmazsa olmaz bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] N. Abdul Latiff, N. Abdullatiff, and R. Ahmad. Extending wireless sensor network lifetime with base station repositioning. In *Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2011 IEEE Symposium on*, pages 241–246, sept. 2011.
- [2] K. Akkaya, M. Younis, and W. Youssef. Positioning of base stations in wireless sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, 45(4):96–102, april 2007.
- [3] I. Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114, Aug. 2002.
- [4] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, Mar. 2002.
- [5] I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu. Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad hoc networks*, 2(4):351–367, 2004.
- [6] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia. Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad hoc networks*, 3(3):257–279, 2005.
- [7] Z. Alliance. Ieee 802.15. 4, zigbee standard. On <http://www.zigbee.org>, 2009.
- [8] J. Allred, A. B. Hasan, S. Panichsakul, W. Pisano, P. Gray, J. Huang, R. Han, D. Lawrence, and K. Mohseni. Sensorflock: an airborne wireless sensor network of micro-air vehicles. In *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 117–129. ACM, 2007.
- [9] G. Anastasi, A. Falchi, A. Passarella, M. Conti, and E. Gregori. Performance measurements of motes sensor networks. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless*

and mobile systems - *MSWiM '04*, page 174, New York, New York, USA, Oct. 2004. ACM Press.

- [10] G. Antonelli, F. Arrichiello, S. Chiaverini, S. Contrafatto, and R. Setola. Use of a robot platoon to implement mobile ad-hoc network in rescue scenario - preliminary experimental results. In *Safety, Security and Rescue Robotics, 2007. SSRR 2007. IEEE International Workshop on*, pages 1–6, Sept 2007.
- [11] T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. In *Intelligent Control, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation*, pages 719–724. IEEE, 2005.
- [12] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, volume 3, pages 1713–1723. IEEE, 2003.
- [13] K. Bicakci, H. Gultekin, and B. Tavli. The impact of one-time energy costs on network lifetime in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 13:905–907, 2009.
- [14] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman. The general algebraic modeling system. *A User's Guide GAMS Development Co, Washington*, 1998.
- [15] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman, and U. America. The general algebraic modeling system. *GAMS Development Corporation*, 1998.
- [16] O. Cayirpunar, E. K. Urtis, and B. Tavli. The impact of base station mobility patterns on wireless sensor network lifetime. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, pages 2701–2706, Sept 2013.
- [17] A. Chakrabarti, A. Sabharwal, and B. Aazhang. Communication power optimization in a sensor network with a path-constrained mobile observer. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 2(3):297–324, Aug. 2006.
- [18] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, and S. Nikolettseas. Efficient data propagation strategies in wireless sensor networks using a single mobile sink. *Computer Communications*, 31(5):896–914, 2008.

- [19] I. Chatzigiannakis, A. Kinalis, S. Nikolettseas, and J. Rolim. Fast and energy efficient sensor data collection by multiple mobile sinks. In *Proceedings of the 5th ACM international workshop on Mobility management and wireless access*, pages 25–32. ACM, 2007.
- [20] D. Chen, M. Nixon, and A. Mok. *Why WirelessHART*. Springer, 2010.
- [21] M. Cheng, X. Gong, and L. Cai. Joint routing and link rate allocation under bandwidth and energy constraints in sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8:3770–3779, 2009.
- [22] Z. Cheng, M. Perillo, and W. B. Heinzelman. General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies. *Mobile Computing, IEEE Trans. on*, 7(4):484–497, 2008.
- [23] J. W. Chinneck. Practical optimization: a gentle introduction. *Systems and Computer Engineering*, Carleton University, Ottawa. <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html>, 2006.
- [24] H. Claussen, L. Ho, H. Karimi, F. Mullany, and L. Samuel. I, base station: Cognisant robots and future wireless access networks. In *Consumer Communications and Networking Conference, 2006. CCNC 2006. 3rd IEEE*, volume 1, pages 595–599. IEEE, 2006.
- [25] G. B. Dantzig. *Linear programming and extensions*. Princeton university press, 1998.
- [26] P. Das. Solar energy utilization for geographical exploration. In *Non Conventional Energy (ICONCE), 2014 1st International Conference on*, pages 69–72, Jan 2014.
- [27] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 44:115 – 121, 2006.
- [28] U. B. Desai, B. Jain, and S. Merchant. Wireless sensor networks: technology roadmap. In *Workshop on Wireless Sensor Networks at IITB on April*, volume 20, page 2007. Citeseer, 2007.
- [29] M. Di Francesco, S. K. Das, and G. Anastasi. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: a survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 8(1):7, 2011.

- [30] P. Dutta and D. Culler. Epic: An open mote platform for application-driven design. In *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 547–548. IEEE Computer Society, 2008.
- [31] A. El Kateeb, A. Ramesh, and L. Azzawi. Wireless sensor nodes processor architecture and design. In *Advanced Information Networking and Applications-Workshops, 2008. AINAW 2008. 22nd International Conference on*, pages 892–897. IEEE, 2008.
- [32] S. C. Ergen and P. Varaiya. On multi-hop routing for energy efficiency. *Communications Letters, IEEE*, 9(10):880–881, 2005.
- [33] F. Fabbri, C. Buratti, and R. Verdone. A multi-sink multi-hop wireless sensor network over a square region: Connectivity and energy consumption issues. In *GLOBECOM Workshops, 2008 IEEE*, pages 1–6, Nov 2008.
- [34] R. Fish, M. Flickinger, and J. Lepreau. Mobile emulab: A robotic wireless and sensor network testbed. In *IEEE INFOCOM*, 2006.
- [35] L. Friedmann and L. Boukhatem. In *International Conference on Networking and Services (ICNS '07)*, pages 90–90. IEEE, June 2007.
- [36] S. Gao, H. Zhang, and S. Das. Efficient data collection in wireless sensor networks with path-constrained mobile sinks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 10(4):592–608, April 2011.
- [37] S. Gao, H. Zhang, and S. K. Das. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(4):592–608, Apr. 2011.
- [38] F. Gielow, M. Nogueira, and A. Santos. *Wireless Sensor Networks and Energy Efficiency*. IGI Global, 2012.
- [39] C. P. Guide. Crossbow technology inc. *Inc., webpages*, pages 1–3.
- [40] R. Jaichandran, A. Irudhayaraj, and J. Raja. Effective strategies and optimal solutions for hot spot problem in wireless sensor networks (wsn). In *Information Sciences Signal Processing and their Applications (ISSPA), 2010 10th International Conference on*, pages 389–392, 2010.
- [41] S. Jain, R. C. Shah, W. Brunette, G. Borriello, and S. Roy. Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 11(3):327–339, 2006.

- [42] S. Janansefat, I. Senturk, K. Akkaya, and M. Gloff. A mobile sensor network testbed using irobots. 2012.
- [43] D. Jea, A. Somasundara, and M. Srivastava. Multiple controlled mobile elements (data mules) for data collection in sensor networks. In *Distributed Computing in Sensor Systems*, pages 244–257. Springer, 2005.
- [44] M. I. Khan, W. N. Gansterer, and G. Haring. Static vs. mobile sink: The influence of basic parameters on energy efficiency in wireless sensor networks. *Computer communications*, 36(9):965–978, May 2013.
- [45] C. Konstantopoulos, G. Pantziou, D. Gavalas, A. Mpitziopoulos, and B. Marmalis. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(5):809–817, May 2012.
- [46] R. V. Kulkarni and G. K. Venayagamoorthy. Particle swarm optimization in wireless-sensor networks: A brief survey. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 41(2):262–267, 2011.
- [47] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer, et al. Tinyos: An operating system for sensor networks. pages 115–148, 2005.
- [48] J. Li, K. Li, and W. Zhu. Improving sensing coverage of wireless sensor networks by employing mobile robots. In *Robotics and Biomimetics, 2007. (ROBIO 2007), IEEE International Conf. on*, pages 899–903, 2007.
- [49] W. Liang and J. Luo. Network lifetime maximization in sensor networks with multiple mobile sinks. In *Local Computer Networks (LCN), 2011 IEEE 36th Conference on*, pages 350–357. IEEE, 2011.
- [50] W. Liang, J. Luo, and X. Xu. Prolonging network lifetime via a controlled mobile sink in wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [51] K.-S. Low, H. Nguyen, and H. Guo. Optimization of sensor node locations in a wireless sensor network. In *Natural Computation, 2008. ICNC'08. Fourth International Conference on*, volume 5, pages 286–290. IEEE, 2008.
- [52] J. Luo and J. P. Hubaux. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference*

- of the *IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 3, pages 1735–1746. IEEE, 2005.
- [53] D. F. Macedo, L. H. Correia, A. L. dos Santos, A. A. Loureiro, J. M. S. Nogueira, and G. Pujolle. A comprehensive evaluation of transmission power control on mobile ad hoc networks. *Computer Science Department of the Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil, Tech. Rep. RT.DCC.003*, 2008.
- [54] D. Malone, K. Duffy, and D. Leith. Modeling the 802.11 distributed coordination function in nonsaturated heterogeneous conditions. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 15:159–172, 2007.
- [55] M. Marta and M. Cardei. Using sink mobility to increase wireless sensor networks lifetime. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008. WoWMoM 2008. 2008 International Symposium on a*, pages 1–10. IEEE, 2008.
- [56] M. Marta and M. Cardei. Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks. *Pervasive and Mobile computing*, 5(5):542–555, 2009.
- [57] I. MathWorks. *MATLAB: the language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7*, volume 9. MathWorks, 2005.
- [58] T. MatWorks. Matlab manual. *The MatWorks, Inc*, 2001.
- [59] G. V. Merrett and Y. K. Tan. *Wireless sensor networks: Application-Centric design*. InTech, 2010.
- [60] K. Mikhaylov and J. Tervonen. Energy consumption of the mobile wireless sensor networks node with controlled mobility. 2013.
- [61] A. Mollanejad, L. M. Khanli, and M. Zeynali. Dbsr: Dynamic base station repositioning using genetic algorithm in wireless sensor network. In *Computer Engineering and Applications (ICCEA), 2010 Second International Conference on*, volume 2, pages 521–525. IEEE, 2010.
- [62] F. Nack. An overview on wireless sensor networks. *Institute of Computer Science (ICS) University, Berlin*, 2010.
- [63] P. H. Pathak and R. Dutta. Centrality-based power control for hot-spot mitigation in multi-hop wireless networks. *Computer Communications*, 35(9):1074–1085, May 2012.

- [64] W. Y. Poe and J. B. Schmitt. Placing Multiple Sinks in Time-Sensitive Wireless Sensor Networks using a Genetic Algorithm, 2008.
- [65] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 19(2):40–50, 2002.
- [66] M. Rahimi, R. Baer, O. Iroezi, J. Garcia, J. Warrior, D. Estrin, and M. Srivastava. Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. In *Proc. ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 192–204, 2005.
- [67] J. Rao and S. Biswas. Network-assisted sink navigation for distributed data gathering: Stability and delay-energy trade-offs. *Computer Communications*, 33(2):160–175, 2010.
- [68] V. Rodoplu and T. H. Meng. Minimum energy mobile wireless networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 17(8):1333–1344, 1999.
- [69] L. B. Saad and B. Tourancheau. Multiple Mobile Sinks Positioning in Wireless Sensor Networks for Buildings. In *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pages 264–270. IEEE, June 2009.
- [70] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 1(2):215–233, 2003.
- [71] A. Somasundara, A. Ramamoorthy, M. B. Srivastava, et al. Mobile element scheduling for efficient data collection in wireless sensor networks with dynamic deadlines. In *Real-Time Systems Symposium, 2004. Proceedings. 25th IEEE International*, pages 296–305. IEEE, 2004.
- [72] A. Somasundara, A. Ramamoorthy, M. B. Srivastava, et al. Mobile element scheduling with dynamic deadlines. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 6(4):395–410, 2007.
- [73] L. Song and D. Hatzinakos. Architecture of wireless sensor networks with mobile sinks: Sparsely deployed sensors. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 56(4):1826–1836, 2007.
- [74] B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey. *Ad Hoc Networks*, 3:7281–323, 2005.

- [75] S. Tang, J. Yuan, X. Li, Y. Liu, G. Chen, M. Gu, J. Zhao, and G. Dai. Dawn: Energy efficient data aggregation in wsn with mobile sinks. In *Quality of Service (IWQoS), 2010 18th International Workshop on*, pages 1–9, June 2010.
- [76] W. the free encyclopedia. Sosus - sound surveillance system., Aug 2015.
- [77] C. Tunca, S. Isik, M. Y. Donmez, and C. Ersoy. Distributed mobile sink routing for wireless sensor networks: A survey. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 16(2):877–897, 2014.
- [78] D. Vass and A. Vidács. Positioning mobile base station to prolong wireless sensor network lifetime. In *Proceedings of the 2005 ACM conference on Emerging network experiment and technology*, pages 300–301. ACM, 2005.
- [79] M. Vecchio and R. López-Valcarce. Improving area coverage of wireless sensor networks via controllable mobile nodes: A greedy approach. *Journal of Network and Computer Applications*, 48(0):1–13, 2015.
- [80] Z. Vincze, R. Vida, and A. Vidacs. Deploying Multiple Sinks in Multi-hop Wireless Sensor Networks. In *IEEE International Conference on Pervasive Services*, pages 55–63. IEEE, July 2007.
- [81] J. Wang, L. Zuo, J. Shen, B. Li, and S. Lee. Multiple mobile sink-based routing algorithm for data dissemination in wireless sensor networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2014.
- [82] R. Wilcox. *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing*. Statistical modeling and decision science. Elsevier/Academic Press, 2005.
- [83] xbow. Mica motes., jun 2015.
- [84] G. Xing, T. Wang, W. Jia, and M. Li. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station. In *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 231–240. ACM, 2008.
- [85] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12):2292–2330, Aug. 2008.
- [86] S. Yu, B. Zhang, C. Li, and H. Mouftah. Routing protocols for wireless sensor networks with mobile sinks: a survey. *Communications Magazine, IEEE*, 52(7):150–157, July 2014.

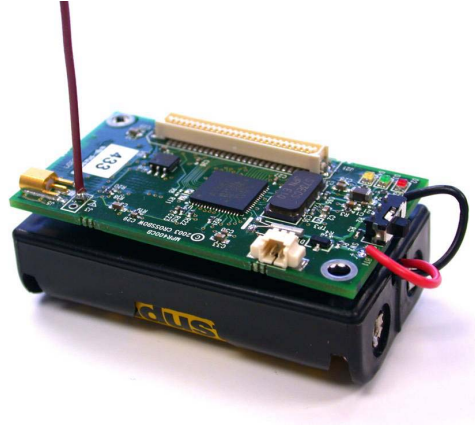
- [87] J. Yuan, S.-J. Tang, C. Wang, D. De, X.-Y. Li, W.-Z. Song, and G. Chen. A real-time rescue system: towards practical implementation of robotic sensor network. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 458–466. IEEE, 2011.

EKLER

A. Kablosuz Algılayıcı Geliştirme Platformları

A.1 MICA2

Crossbow firması tarafından üretilen MICA2 platformunda Atmel ATmega128L tabanlı MPR400 işlemci ve radyo haberleşme kartı kullanılmıştır. Kullanılan radyo haberleşmesi 868/916 MHz bandında ve maksimum 38.4 Kbps bant genişliğinde gerçekleştirilmektedir. MICA2 düğümü üzerinde bulunan 51 pinli genişleme yuvasına bağlanabilen birçok algılayıcı arabirim kartı bulunmaktadır. Bu kartlardan MIB510/MIB520 kullanıldığında MICA2 bir algılayıcı düğüm olmanın dışında bir baz istasyonu olarak ta işlev görebilir. MIB510/MIB520 kartaları aynı zamanda hem programlama ve veri iletişimi için bir seri/USB arabirimi sağlar. 1/4 dalga dipol anten kullanımı ile teorik olarak açık alanda maksimum 150 metre haberleşme menziline sahiptir. Şekil A.1'de örnek bir MICA2 düğümü gösterilmiştir.



Şekil A.1: MICA2 algılayıcı düğümü.

A.2 MICAz

Yine Crossbow firması tarafından üretilen MICAz platformunda Atmel ATmega128L tabanlı MPR2400 işlemci ve radyo haberleşme kartı kullanılmıştır. MICAz platformunda (MPR2400) IEEE 802.15.4 radyo (ZigBee uyumlu) ile yüksek hızda haberleşme (250 kbps) ve donanımsal şifreleme ile güvenliği (AES-128) bir arada

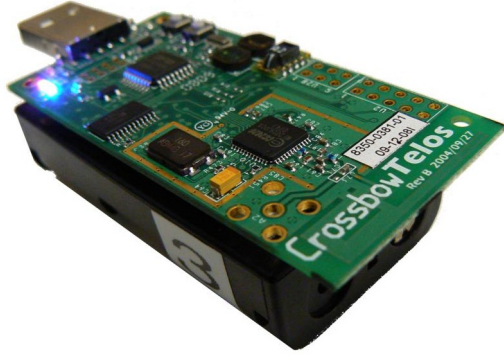
sunmaktadır. Ayrıca, doğrudan dizi yayılma spektrumlu (İngilizce: Direct sequence spread spectrum - DSSS) radyo ile girişime dayanıklılık ve veri güvenliği sağlanmış olur. 51-pinli bağlantı konnektörü ile Analog Girişler, Dijital giriş/çıkışlar, I2C, SPI ve UART arayüzleri desteklenmektedir. MICAz 1/2 dalga boyu dipol anten kullanımı ile teorik olarak açık alanda maksimum 75-100 metre haberleşme menziline desteklenmektedir. Şekil A.2’de örnek bir MICAz düğümü gösterilmiştir.



Şekil A.2: MICAz algılayıcı düğümü.

A.3 Telos B

MICA2 ve MICAz düğümleri alan dağıtım amaçları için daha uygun olmalarına rağmen Telos B düğümü deneysel çalışmalara daha uygundur. Crossbow firması tarafından üretilmekte olan Telos B düğümleri USB üzerinden programlama ve veri toplama özelliğine sahiptir ve bu sayede laboratuvarında geliştirme amaçları için kullanılması daha uygun olmaktadır. Bu düğümler IEEE 802.15.4/ZigBee uyumlu radyo (2,4-2,4835 GHz) kullanarak 250Kbps hızlarına varan veri transferi sağlayabilmektedir. Telos B’nin diğer özellikleri olarak 10KB belleğe sahip 8 MHz hızında çalışan düşük güç tüketimli TI MSP430 mikrodenetleyici, veri kaydı için 1MB harici flaş, entegre anten, aydınlanma, sıcaklık ve nem algılayıcısı (TPR2420 ile opsiyonel) gibi özellikler verilebilir. Şekil A.3’te örnek bir Telos B algılayıcı düğümü gösterilmiştir.



Şekil A.3: Telos B algılayıcı düğümü.

A.4 IRIS 2.4GHz

MICA2, MICAz ve TelosB düğümlerinden farklı olarak IRIS algılayıcı düğümünde daha uzun mesafelere iletişim sağlayabilen bir radyo haberleşme kartı bulunmaktadır. Bu düğüm açık alanda en az 300 metre (1/4 dalga boyu dipol anten ile) ve kapalı alanda ise en az 50 metre (1/4 dalga boyu dipol anten ile) haberleşme mesafesi bulunmaktadır. Kullanılan radyo alıcı/vericisi en fazla 250 Kbps veri transfer hızında haberleşme sağlayabilen ISM bandında (2,4-2,48 GHz) çalınan IEEE 802.15.4 tabanlı, küresel olarak uyumlu bir donanımdır. IRIS MIB510/MIB520 genişleme kartları ile kullanıldığında bir algılayıcı düğüm olmanın dışında bir baz istasyonu olarak ta işlev görebilir. Ayrıca MIB510/MIB520 hem programlama hem de veri iletişimi için bir seri / USB arabirimi sağlamaktadır. IRIS Atmel ATmega1281 tabanlı önceki düğümlerden daha performanslı bir işlemci kartı (XM2110CA) kullanılmaktadır. Tek bir işlemci kartı (XM2110) algılayıcılardan veri okuma, veri işleme ve radyo haberleşmesi işlemlerini eş zamanlı olarak çalıştırmak için yapılandırılabilir. Mica2 ve MICAz düğümlerinde olduğu gibi, IRIS aynı zamanda analog giriş, dijital I/O, I2C, SPI ve UART gibi arayüzleri destekleyen 51 pinli bir bağlantı arayüzüne sahiptir. Şekil A.4'te örnek bir IRIS algılayıcı düğümü gösterilmiştir.

A.5 IRIS OEM Edition

IRIS OEM Edition özellikle ağ örgüsü yapısında haberleşme ağları için tasarlanmış bir algılayıcı düğümdür. Bu düğüm sadece bir posta pulu boyutlarındadır. Radyo haberleşmesi IEEE 802.15.4 ZigBee uyumludur(2,4 GHz, küresel uyumlu



Şekil A.4: IRIS 2.4GHz algılayıcı düğümü.

ISM bandında). Bu nedenle 250kbps veri hızını destekler. Üzerinde bulunan 68 pinli bağlantı arayüzü üzerinden aydınlanma, sıcaklık, PH, barometrik basınç, akustik, manyetik, hızlanma/titreşim vb. algılayıcıların entegrasyonu kolaylıkla sağlanabilmektedir. Düşük güç tüketimi ve güvenilir örgü ağ yapısının sağlayabilmek için, XMesh™ yazılım teknolojisini kullanmaktadır.

A.6 IMote 2.0

IMote 2.0 düğümünde Texas Instruments firması tarafından geliştirilmiş CC2420 IEEE 802.15.4 uyumlu radyo alıcı/vericisi kullanılmıştır. CC2420 2.4GHz bandında 16 kanal üzerinden 250Kbps veri hızını destekler. 30 metre ortalama haberleşme menziline sahip kart üzerine mpntajlı bir radyo antenine sahiptir. Daha uzun mesafelerde haberleşme sağlayabilen antenlerin montajı için kart üzerinde SMA bağlantı soketi bulunmaktadır. Bu düğüm üzerinde 13 - 416MHz arasında hızlarda çalışabilen Intel PXA271 XScale® İşlemci kullanılmaktadır. PXA271 üzerinde ayrıca multimedya işlemlerini hızlandırmak için bir kablosuz MMX DSP işlemcisi bulundurmaktadır. Microsoft .NET Micro, Linux, TinyOS gibi işletim sistemlerini desteklemektedir. Çalışmak için sadece 3 adet AAA boyutunda pil kullanır. Imote2 ayrıca Li-Ion veya Li-Poly şarj edilen piller için yerleşik bir şarj arayüzüne sahiptir. IMote 2.0 üzerinde 32 MB boyutunda SRAM ve 32MB boyutunda Flash RAM bulundurur. Ek olarak IMote 2.0 üzerinde dijital Görüntü

İşleme gerektiren uygulamalarda kullanılabilen kullanışlı bir kamera arayüzü mevcuttur. Şekil A.5'te örnek bir IMote algılayıcı düğümü gösterilmiştir.



Şekil A.5: IMote 2.0 algılayıcı düğümü.

A.7 SunSPOT

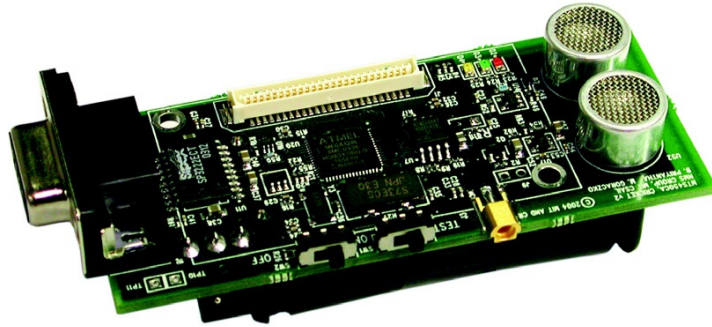
Sun Laboratuvarlarında geliştirilmiş olan SunSPOT (İngilizce: Sun Small Programmable Object Technology - SunSPOT) Java tabanlı bir geliştirme platformudur. Bu düğüm ARM 920T mikroişlemcisini kullanır. Kullanılan radyo IEEE 802.15.4 ZigBee protokolünü desteklemektedir. SunSPOT ayrıca program verilerinin saklanması için 512K RAM ve dış verilerin saklanması için 4MB dış Flash belleğe sahiptir. Şekil A.6'da örnek bir SunSPOT algılayıcı düğümü gösterilmiştir.

A.8 CRICKET MCS410

MCS410CA CRICKET Mote, MICA2 algılayıcı düğümünün konum tespiti yapabilen bir sürümüdür. Kriket Mote standart MICA2 donanımına ek olarak bir ultrasonik alıcı/vericisi içerir. Ultrasonik ses dalgaları kullanarak gezgin platformlarda doğrusal uzaklık ölçümleri yapılabilir. Şekil A.7'de örnek bir CRICKET algılayıcı düğümü gösterilmiştir.



Şekil A.6: SunSPOT algılayıcı düğümü.



Şekil A.7: CRICKET MCS410 algılayıcı düğümü.

A.9 Epic

Epic UC Berkeley'de [30] uygulama odaklı tasarım için geliştirilmiş açık kaynaklı bir kablosuz algılayıcı ağ platformudur. Modüler bileşen ve bloklar kullanılarak geliştirme yaklaşımı sayesinde, daha geniş bir topluluğa erişilmesi ve daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılması sağlanmaya çalışılmıştır. Epic sisteminin aynı zamanda düşük maliyetli ve hızlı üretilebilen bir sistem olması amaçlanmıştır. Şekil A.8'de örnek bir Epic algılayıcı düğümü gösterilmiştir.



Şekil A.8: Epic algılayıcı düğümü.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ÇAYIRPUNAR, Ömer

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 27.11.1983, Ankara

Medeni hali : Evli

Telefon : (0 535) 684 24 54

Faks :

e-mail : ocayirpunar@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2015
Y. Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2009
Lisans	ORTA Doğu Teknik Üniversitesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-	TÜBİTAK UZAY Teknolojileri Araştırma Enstitüsü	Araştırmacı
2006-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Burslu Doktora Öğrencisi

Yabancı Dil

İngilizce (İyi)

İspanyolca (Az)

Deneyim ve Beceriler

İşletim Sistemleri:	MS: CE, XP, 2000, Vista, Windows 7 Linux: Ubuntu, FreeBSD, Pardus
Programlama Dilleri:	C, C++, C#, Java, Visual Basic, Python, HTML, MySQL, Microchip C30, Assembly
Yazılım:	Matlab, Mplab, Eclipse, Microsoft Visual Studio, Arduino, Proteus, GAMS, SVN, Adobe Photoshop, Macromedia Flash, Dreamweaver, 3ds Max
Donanım:	Intel ve AMD 32/64 bit işlemci platformları Beagle Board, Gumstix vb. Intel Xscale ve ARM gömülü sistem platformları dsPIC, PIC ve Atmel mikro denetleyiciler Texas Instruments MSP430 ultra-low-power mikrodenetleyicileri
Network:	WI-FI (IEEE 802.11 a/b/g) Kablosuz haberleşme Bluetooth (IEEE 802.15.1), ZigBEE (IEEE 802.15.4) TCP/IP, UDP haberleşme protokolleri Şifreleme ve Veri Güvenliği
Diğer:	Robotik sistem tasarlama ve geliştirme Görüntü işleme IMU, GPS, sonar, lazer tarayıcı algılayıcı entegrasyonu Baskı devre tasarlama

Yayımlar

1. Ö. Çayırpunar, E. Kadioğlu Ürtiş, B. Tavlı, ve S. Uludağ Analyzing Sojourn Routine Optimality for Mobile Multiple Sinks with Energy Efficiency for Wireless Sensor Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Green Communications and Networking: Second Issue*, under review, Vol. ?, no. ?, 2016, pp. ?-?.
2. Ö. Çayırpunar, E. Kadioğlu Ürtiş ve B. Tavlı, Optimal base station mobility patterns for wireless sensor network lifetime maximization, *Sensors Journal*,

IEEE, PP(99):1-1, 2015.

3. Ö. Çayırpunar, E. Kadioğlu Ürtiş ve B. Tavlı, The Impact of Base Station Mobility Patterns on Wireless Sensor Network Lifetime Optimization, *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2013*, Londra, İngiltere, Eylül 2013.
4. Ö. Çayırpunar, E. Kadioğlu Ürtiş ve B. Tavlı, Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Yaşam Süresi Enbüyüklemesi için Gezgin Baz İstasyonu Konumlandırma Eniyilemesi, *21. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Girne, KKTC, Nisan 2013.
5. O. Cayirpunar, Improving the Performance of Cooperative Search by Using Communication and Coordination in Multi Robot Systems, *Master's thesis*, TOBB University of Economics and Technology, Ankara, Turkey, October 2009.
6. O. Cayirpunar, V. Gazi, B. Tavli, E. Cervera, U. Witkowski, and J. Penders, Experimental Study on the Effects of Communication Range on Cooperative Robotic Search in Complex Environments, *ROBOCOMM 2009*, Odense, Denmark, April 2009.
7. Y. Atas, O. Cayirpunar, S. B. Akat, V. Gazi, and L. Alboul, Laser Based Cooperative Multi-Robot Map Building for Indoor Environments, *in Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment*, Brussels, Belgium, January 2009.
8. A.Samiloglu, O.Cayirpunar, V.Gazi, and A.Koku, An experimental set-up for multi-robot applications, *in International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots(SIMPAR 2008)*, 2008.
9. O.Cayirpunar, V.Gazi, and B.Tavli, Dynamic Robot Networks for Search and Rescue Operations, *in Proceedings of the EURON/IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Surveillance of the Environment*, Benicassim, Spain, January 2008.

Projeler

- Orman yangınlarının tespit ve denetlenmesi amaçlı İnsansız Hava Aracı Projesi (ETUIHA)
- ODTÜ Robot Topluluğu, Güneş Enerjili Araba Projesi
- ODTÜ Robot Topluluğu, Hidrojen Enerjili Araba Projesi
- ODTÜ Bilim ve Teknoloji Müzesi, Müze tanıtım robotu projesi

Hobiler

Hobi robotik, model uçaklar, popüler bilim, kitap okuma, masa tenisi,