

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**

**ENERJİ HASADI YAPABİLEN TELSİZ DUYARGA  
AĞLARININ YAŞAM SÜRESİNİ ARTIRAN YENİ BİR  
DAĞITIK BAĞLI BASKIN KÜME ALGORİTMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÖMER GÜLEÇ**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2020**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**



**ENERJİ HASADI YAPABİLEN TELSİZ DUYARGA  
AĞLARININ YAŞAM SÜRESİNİ ARTIRAN YENİ BİR  
DAĞITIK BAĞLI BASKIN KÜME ALGORİTMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÖMER GÜLEÇ**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2020**

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2019FEBE015 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**



**ÖMER GÜLEÇ**

## ÖZET

### ENERJİ HASADI YAPABİLEN TELSİZ DUYARGA AĞLARININ YAŞAM SÜRESİNİ ARTIRAN YENİ BİR DAĞITIK BAĞLI BASKIN KÜME ALGORİTMASI

DOKTORA TEZİ

ÖMER GÜLEÇ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SEZAI TOKAT)  
(EŞ DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ELİF HAYTAOĞLU)  
DENİZLİ, TEMMUZ - 2020

Telsiz duyurga ağı (TDA), dağıtık olarak konumlandırılmış ve birbirleri ile kablosuz iletişim kuran duyurga düğümlerinden oluşan ağıdır. TDA'lar endüstriyel, askeri, tarım, zirai, sağlık, güvenlik ve akıllı sistemler gibi alanlarda kolay kurulum, kolay bakım, düşük maliyet gibi özelliklerden dolayı sıklıkla tercih edilmekte ve bu alanlarda TDA'larla ilgili çeşitli uygulamalar geliştirilmektedir. TDA'ları oluşturan duyurga düğümlerinin kısıtlı enerjiye sahip olması, enerjilerinin etkin bir şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. TDA'ların başlıca sorunlarından biri olan enerji tüketiminin azaltılması ve dolaylı olarak ağ yaşam süresinin artırılmasına yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. TDA'larda iletişim omurgasının oluşturulmasında bağlı baskın kümenin (BBK) kullanılması, enerjinin etkin bir şekilde kullanılmasına yönelik önemli bir yöntemdir.

Çevresel kaynaklardan enerji hasadı yapabilen duyurga düğümlerinin ağa dâhil edilmesi ise bir diğer enerji etkin yöntemdir. Ağı oluşturan duyurga düğümlerinin enerjileri ağ yaşam süresi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle TDA'ların yaşam süresi, enerjisi ilk biten duyurga düğümünün yaşam süresi olarak düşünülebilir. Bu tezde, GEHABBK adı altında enerji hasadı yapan düğümlerin bulunduğu akıllı çevresel uygulamalar için geliştirilmiş TDA'larda yaşam süresini artıran yeni bir dağıtık BBK algoritması geliştirilmiştir. GEHABBK algoritması, SensEH benzetim ortamında geliştirilmiş olup geleneksel sel tabanlı yöntemler ve literatürde yer alan bir diğer enerji etkin algoritma ile karşılaştırılmıştır.

Benzetim sonuçlarına göre GEHABBK algoritması ile ağın yaşam süresi, geleneksel sel tabanlı yöntemlere göre 6 kat, BBK tabanlı enerji etkin yöntemlere göre 1.4 kat artırılmıştır. Bunun yanı sıra, BBK oluşturma süreci tüm TDA'nın yaşam süresinin sadece %15'ine karşılık gelmektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Telsiz Duyurga Ağları, Enerji Hasadı, Dağıtık Bağlı Baskın Kümeler, Ağ Yaşam Süresi

## ABSTRACT

### A NOVEL DISTRIBUTED CONNECTED DOMINATING SET ALGORITHM THAT PROLONGS LIFETIME OF ENERGY HARVESTING WIRELESS SENSOR NETWORKS

PH.D THESIS  
ÖMER GÜLEÇ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. SEZAI TOKAT)  
(CO-SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ELİF HAYTAOĞLU)  
DENİZLİ, JULY 2020

Wireless sensor network (WSN) is a network consists of distributely positioned sensor nodes that communicate wirelessly with each other. WSNs are frequently preferred in industry, military, agriculture, health care, security areas and smart systems due to features such as low cost, easy installation, easy maintenance and thus various applications have been developed. WSNs that insist of sensor nodes which have limited energy require the efficient energy usage. There are many studies in the literature about one of the main problems of WSNs is the energy conservation which is directly related with increasing the network lifetime. The use of connected dominating sets (CDS) as communication backbones in WSNs is a method for using energy effectively.

The inclusion of the nodes which can harvest energy from enviromental resources is another energy efficient method. The energy of sensor nodes is directly releated to network lifetime. Thus, the network lifetime is considered the same of a node whose lifetime is the shortest. In this thesis, a novel distributed CDS algorithm for extending lifetime of WSNs with energy harvester nodes in smart agriculture applications, namely CDSSEHA, has been developed. The proposed algorithm has been developed in the SenseEH simulation environment and compared with traditional flood based methods and another energy efficient algorithm in the literature.

According to the simulation results, with the CDSSEHA algorithm, the network lifetime has been increased 6 times compared to traditional flood-based methods and 1.4 times compared to CDS based energy efficient method. Furthermore, the CDS construction process constitutes only about 15% of the whole lifetime.

**KEYWORDS:** Wireless Sensor Networks, Energy Harvester, Distributed Connected Dominating Sets, Network Lifetime

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TELSİZ DUYARGA AĞLARI</b> .....	<b>4</b>
2.1 Telsiz Duyargalar .....	4
2.1.1 Telsiz Duyarga Çeşitleri .....	5
2.1.1.1 Tmote Sky Duyargası.....	5
2.1.1.2 TelosB Duyargası.....	7
2.1.1.3 MICAz Duyargası .....	7
2.1.1.4 Z1 Duyargası.....	8
2.2 Duyargalarda Kullanılan Yönlendirme Protokolleri .....	8
2.2.1 IEEE 802.15.4 İletişim Protokolü.....	8
2.2.2 CoAP İletişim Protokolü.....	9
2.2.3 RPL İletişim Protokolü .....	9
2.2.4 6LoWPAN İletişim Protokolü .....	9
2.3 Telsiz Duyarga Ağları .....	11
2.3.1 Telsiz Duyarga Ağları ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....	12
2.4 Telsiz Duyarga Ağları İçin Geliştirilmiş Benzetim Ortamları .....	15
2.4.1 TinyOS İşletim Sistemi ve TOSSIM Benzetim Aracı .....	16
2.4.2 Contiki İşletim Sistemi ve Cooja Benzetim Uygulaması .....	18
2.4.3 TinyOS ile Cooja Benzetim Araçlarının Karşılaştırılması .....	22
2.4.4 SensEH Benzetim Ortamı .....	23
2.4.4.1 SensEH Enerji Hasadı Modeli .....	24
2.4.4.2 SensEH Yazılım Mimarisi .....	26
<b>3. TELSİZ DUYARGA AĞLARINDA ÇİZGE KURAMI</b> <b>UYGULAMALARI VE ENERJİ HESABI</b> .....	<b>28</b>
3.1 Çizge Kuramı ve Uygulamaları.....	28
3.1.1 Düğüm Ağırlıklı Çizge .....	28
3.1.2 Bağımsız Küme.....	29
3.1.3 Baskın Küme.....	29
3.1.4 Bağlı Baskın Küme .....	30
3.1.5 Ağırlıklı Bağlı Baskın Küme .....	30
3.2 Telsiz Duyarga Ağlarında Enerji Hesaplamaları.....	31
3.2.1 Telsiz Duyargalardaki Enerji Tüketimi .....	35
3.2.2 Telsiz Duyarga Ağlarında Enerji Hasadı ve Teknikleri.....	37
<b>4. ALGORİTMALAR</b> .....	<b>41</b>
4.1 Dağıtık LMW Algoritması .....	41

4.2	Güneş Enerjisi Hasadı Yapan Düğümlerin Bulunduğu Akıllı evresel Uygulamalar İçin Geliştirilmiş TDA’larda Yaşam Süresini Artıran Dağıtık Bağlı Baskın Küme Algoritması (GEHABBK).....	50
4.2.1	GEHABBK Algoritmasının Kapsayan Düğümleri Seçme Aşaması .....	51
4.2.2	GEHABBK Algoritmasının Kapsayan Düğümleri Bağlama Aşaması .....	55
4.2.3	GEHABBK Algoritmasının Herhangi Bir evresel Uygulama üzerinde alıştırılması .....	59
4.2.4	GEHABBK Algoritmasının Literatürde Yer Alan Diğer Uygulamalar ile Karşılaştırılması .....	61
4.2.5	GEHABBK Algoritması ile Diğer Yöntemlerden Elde Edilen Benzetim Sonuçlarının Analizi.....	72
4.3	İyileştirilmiş GEHABBK Algoritması .....	77
4.3.1	İyileştirilmiş GEHABBK Algoritmasının Sıradan Düğümler İçin Geliştirilen Ağırlık Hesaplaması .....	78
4.3.2	İyileştirilmiş GEHABBK Algoritmasının Enerji Hasadı Yapabilen Hasatçı Düğümler İçin Geliştirilen Ağırlık Hesaplaması .....	81
4.3.3	�rnek Bir TDA �zerinde GEHABBK, İyileştirilmiş GEHABBK ve Dağıtık LMW Algoritmaların Karşılaştırması .....	82
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>90</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>93</b>
<b>7.</b>	<b>�ZGEMİş.....</b>	<b>115</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Bir telsiz duyarganın mimarisi .....	4
Şekil 2.2: Moteiv firmasına ait Tmote Sky duyargası .....	6
Şekil 2.3: Tipik bir TDA / IoT işletim sistemi yapısı .....	16
Şekil 2.4: TOSSIM üzerinden MICAz duyargasının yapılandırılması.....	17
Şekil 2.5: TOSSIM örnek uygulama ekran görüntüsü .....	18
Şekil 2.6: Hafıza kipi için SensEH zincir uygulaması.....	24
Şekil 2.7: Pin kipi için SensEH zincir uygulaması .....	24
Şekil 2.8: SensEH sınıf diyagramı.....	27
Şekil 3.1: Örnek çizgeler üzerinde bağımsız kümelerin gösterimi.....	29
Şekil 3.2: Örnek çizgeler üzerinde baskın kümelerin gösterimi.....	29
Şekil 3.3: Örnek çizgeler üzerinde bağlı baskın kümelerin gösterimi.....	30
Şekil 3.4: TDA'larda enerji hasadı yöntemleri.....	38
Şekil 4.1: Dağıtık LMW algoritması .....	43
Şekil 4.2: Dağıtık LMW algoritmasının ilk fazının sonucunda oluşan BK.....	48
Şekil 4.3: Dağıtık LMW algoritmasının ikinci fazında yer alan DÖA algoritmasının izlediği yol.....	48
Şekil 4.4: GEHABBK algoritmasında yer alan hasatçı düğümlerin durum değişimlerini gösteren sonlu durum diyagramı.....	51
Şekil 4.5: GEHABBK algoritmasında yer alan sıradan düğümlerin durum değişimlerini gösteren sonlu durum diyagramı.....	54
Şekil 4.6: GEHABBK algoritmasında yer alan hasatçı düğümler için BK algoritması.....	56
Şekil 4.7: GEHABBK algoritmasında yer alan sıradan düğümler için BK algoritması.....	58
Şekil 4.8: GEHABBK algoritmasında örnek bir çevresel veri ölçme uygulaması .....	60
Şekil 4.9: YKLBBK algoritmasında düğümlerin renk durumları .....	64
Şekil 4.10: YKLBBK algoritmasında TURUNCUTEKLİF işlemi sonrası.....	64
Şekil 4.11: YKLBBK algoritmasında SARITEKLİF işlemi sonrası.....	66
Şekil 4.12: YKLBBK algoritmasında kapsayan ve kapsanan düğümler.....	66
Şekil 4.13: Örnek bir TDA'da YKLBBK algoritmasıyla oluşturulan BK.....	67
Şekil 4.14: Sel yöntemi kullanan örnek bir TDA .....	68
Şekil 4.15: Sel yöntemi kullanan ve hasatçı düğümler içeren örnek bir TDA .	68
Şekil 4.16: YKLBBK algoritmasının örnek bir TDA'da gerçekleştirilmesi ....	69
Şekil 4.17: GEHABBK algoritmasının örnek bir TDA'da gerçekleştirilmesi .	69
Şekil 4.18: SL, SLH, YKLBBK ve GEHABBK algoritmalarının ortalama etkin yaşam süreleri.....	73
Şekil 4.19: Düğümlerin enerji ortalamalarının zamanla değişim grafiği .....	74
Şekil 4.20: Düğümlerin zamanla harcadıkları ortalama enerji miktarları .....	76
Şekil 4.21: Örnek uygulamadaki ortalama enerji seviyeleri.....	77
Şekil 4.22: 26 adet düğümden oluşan örnek bir TDA yapısı.....	79
Şekil 4.23: İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasında 8 numaralı sıradan düğümün ağırlık oranı hesabı.....	81
Şekil 4.24: İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazının ilk turu sonucunda hesaplanan düğümlerin ağırlık oranları.....	83

<b>Şekil 4.25:</b> İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazının 2. turu sonucunda hesaplanan düğümlerin ağırlık oranları.....	84
<b>Şekil 4.26:</b> İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazının 3. turu sonucunda hesaplanan düğümlerin ağırlık oranları.....	85
<b>Şekil 4.27:</b> Dağıtık LMW algoritmasının ilk fazında oluşan örnek bir BK .....	86
<b>Şekil 4.28:</b> İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazında oluşan örnek BK .....	86
<b>Şekil 4.29:</b> 26 adet düğüme sahip bir TDA'da en uygun durumda oluşan BBK.....	87
<b>Şekil 4.30:</b> Dağıtık LMW algoritmasıyla oluşturulan örnek bir BBK .....	88
<b>Şekil 4.31:</b> GEHABBK algoritmasıyla oluşturulan örnek bir BBK .....	88
<b>Şekil 4.32:</b> İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasıyla oluşturulan örnek bir BBK.....	89

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Moteiv firmasına ait Tmote Sky duyargası teknik özellikleri .....	6
<b>Tablo 2.2:</b> Memsic firmasına ait MICAz duyargası teknik özellikleri .....	7
<b>Tablo 2.3:</b> ZigBee ile 6LoWPAN karşılaştırması .....	10
<b>Tablo 2.4:</b> Contiki işletim sisteminin ağ yapısını yapısı .....	21
<b>Tablo 2.5:</b> TOSSIM ile Cooja karşılaştırılması.....	22
<b>Tablo 3.1:</b> Mica düğümünün enerji tüketimi.....	37
<b>Tablo 3.2:</b> Enerji hasadı teknolojileri enerji yoğunlukları .....	38
<b>Tablo 3.3:</b> Bazı enerji kaynaklarının karakteristikleri.....	39
<b>Tablo 4.1:</b> Benzetim parametreleri.....	71
<b>Tablo 4.2:</b> Algoritmaların ortalama etkin yaşam süreleri .....	73
<b>Tablo 4.3:</b> Algoritmaların enerji tüketim oranları.....	74
<b>Tablo 4.4:</b> GEHABBK ile YKLBBK algoritmalarının BBK oluşturma fazlarının karşılaştırılması .....	75
<b>Tablo 4.5:</b> Diğer algoritmalar ile elde edilen etkin yaşam sürelerinin GEHABBK algoritması ile karşılaştırılması .....	75

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>IoT</b>	:	Internet of Things
<b>TDA</b>	:	Telsiz Duyarga Ağı
<b>WiFi</b>	:	Wireless Fidelity
<b>GPRS</b>	:	General Packet Radio Service
<b>LoRa</b>	:	Long Range
<b>KBPS</b>	:	Kilobit Per Second
<b>RAM</b>	:	Random Access Memory
<b>CoAP</b>	:	Constrained Application Protocol
<b>RPL</b>	:	Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
<b>6LoWPAN</b>	:	IPv6 over Low -Power Wireless Personal Area Networks
<b>HTTP</b>	:	Hyper-Text Transfer Protocol
<b>MQTT</b>	:	Message Queuing Telemetry Transport
<b>ICMP</b>	:	Internet Control Message Protocol
<b>IEEE</b>	:	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>MAC</b>	:	Medium Access Control
<b>TSCH</b>	:	Time Slotted Channel Hopping
<b>IPv6</b>	:	Internet Protocol version 6
<b>6TiSCH</b>	:	IPv6 over the TSCH
<b>REST</b>	:	Representational State Transfer
<b>DODAG</b>	:	Destination Oriented Directed Acyclic Graph
<b>TCP</b>	:	Transmission Control Protocol
<b>UDP</b>	:	User Datagram Protocol
<b>PHY</b>	:	Physical Layer
<b>USB</b>	:	Universal Serial Bus
<b>UART</b>	:	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>SPI</b>	:	Serial Peripheral Interface
<b>I<sup>2</sup>C</b>	:	Inter-Integrated Circuit
<b>I/O</b>	:	Input/Output
<b>ADC</b>	:	Analog-Digital Converter
<b>DAC</b>	:	Digital-Analog Converter
<b>LLN</b>	:	Low-power and Lossy Networks
<b>MPEG-7</b>	:	Moving Picture Experts Group version 7
<b>SNR</b>	:	Signal to Noise Ratio
<b>GUI</b>	:	Graphical User Interface
<b>BK</b>	:	Baskın Küme
<b>BBK</b>	:	Bağlı Baskın Küme
<b>ABBK</b>	:	Ağırlıklı Bağlı Baskın Küme
<b>EABBK</b>	:	En Az Ağırlıklı Bağlı Baskın Küme
<b>UGDM</b>	:	Unit Disk Graph Medium
<b>DGRM</b>	:	Directed Graph Radio Medium
<b>ESB</b>	:	Embedded Sensor Board
<b>IPv4</b>	:	Internet Protocol version 4
<b>MPPT</b>	:	Maximum Power Point Tracking
<b>PV</b>	:	Photovoltaics
<b>AC/DC</b>	:	Alternating Current/Direct Current
<b>MBK</b>	:	Maksimal Bağımsız Küme
<b>MBBK</b>	:	Minimum Bağlı Baskın Küme

<b>KSYN</b>	:	Kapsayan
<b>KSNN</b>	:	Kapsanan
<b>BSİZ</b>	:	Belirsiz
<b>MYMBBK</b>	:	Minimum Yönlendirme Maliyetli Bağlı Baskın Küme
<b>CCA</b>	:	Clear Channel Assessment
<b>LED</b>	:	Light Emitting Diode
<b>RF</b>	:	Radio Frequency
<b>LMW</b>	:	Locally Maximum Weight
<b>DÖA</b>	:	Derin Öncelikli Arama
<b>TBBK</b>	:	Tekrar Edilebilir Bağlı Baskın Küme

## SEMBOL LİSTESİ

$E$	:	Enerji
$E_{dinleme}$	:	Duyarganın dinleme modunda harcadığı enerji
$E_{iletme}$	:	Duyarganın iletim modunda harcadığı enerji
$E_{alma}$	:	Duyarganın mesaj alma modunda harcadığı enerji
$E_{uyku}$	:	Duyarganın uyku modunda harcadığı enerji
$E_{devre}$	:	Duyargayı oluşturan devre elemanlarının harcadığı enerji
$I_m$	:	Duyargadaki mikroişlemcinin çektiği akım
$I_l$	:	Mikroişlemcinin düşük güç modunda çektiği akım
$I_t$	:	Duyarganın iletim modunda çektiği akım
$I_r$	:	Duyarganın alma modunda çektiği akım
$I_{devre}$	:	Duyargayı oluşturan devre elemanlarının harcadığı akım
$t_m$	:	Mikroişlemcinin aktif olduğu süre
$t_l$	:	Mikroişlemcinin düşük güç modunda geçirdiği süre
$t_t$	:	Duyarganın iletim modunda geçirdiği süre
$t_r$	:	Duyarganın alma modunda geçirdiği süre
$t_{devre}$	:	Duyargayı oluşturan devre elemanlarının çalışma süresi
$V$	:	Kaynak gerilimi
$P$	:	Güç
$t$	:	Zaman
$I$	:	Akım
$i$	:	Dağıtık LMW algoritmasında herhangi bir $i$ düğümü
$\delta$	:	Dağıtık LMW algoritmasında bir düğümün hasat zaman aralığı
$\epsilon$	:	Dağıtık LMW algoritmasında bir düğümün enerji tüketim aralığı
$\omega_i$	:	Dağıtık LMW algoritmasında herhangi bir $i$ düğümünün ağırlığı
$t_c$	:	Dağıtık LMW algoritmasında herhangi bir düğüm için anlık zaman
$NeiList_{it}$	:	Dağıtık LMW algoritmasında herhangi bir $i$ düğümünün $t$ anındaki komşu düğüm listesi
$DList_{it}$	:	Dağıtık LMW algoritmasında herhangi bir $i$ düğümünün $t$ anındaki kapsayan komşu düğümler listesi
$ID$	:	Herhangi bir düğümün belirteç değeri
$\Phi$	:	Dağıtık LMW algoritmasında işaretlenecek düğümler listesi
$m$	:	GEHABBK algoritmasında herhangi bir $m$ düğümü
$\Gamma_m$	:	GEHABBK algoritmasında herhangi bir $m$ düğümünün komşu düğüm listesi
$\Gamma_{akt}$	:	GEHABBK algoritmasında herhangi bir düğümünün aktif komşu düğüm listesi
$treeID$	:	GEHABBK algoritmasında ağaç belirteç değeri
$e_m$	:	GEHABBK algoritmasında herhangi bir $m$ düğümünün kalan enerjisi
$\Gamma^{tree_m}$	:	GEHABBK algoritmasında herhangi bir $m$ düğümünün ait olduğu ağacın komşu düğüm listesi
$I_m$	:	İyileştirilen GEHABBK algoritmasında herhangi bir sıradan belirsiz durumdaki komşu düğümleri
$I_o$	:	İyileştirilen GEHABBK algoritmasında sıradan komşu düğümler

- $I_e$  : İyileştirilen GEHABBK algoritmasında enerji hasadı yapabilen komşu düğümler
- $E_m$  : İyileştirilen GEHABBK algoritmasında sıradan bir  $m$  düğümünün enerji hasadı yapabilen komşu düğümleri
- $E_o$  : İyileştirilen GEHABBK algoritmasında sıradan bir düğümünün enerji hasadı yapabilen komşu düğümleri
- eşikdeğeri $_m$ : İyileştirilen GEHABBK algoritmasında enerji hasadı yapabilen bir  $m$  düğümünün enerji eşik değeri

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın planlanması, hazırlanması ve sonuçlanmasında bana yol gösteren, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve hiçbir zaman emeklerini, anlayışlarını ve zamanlarını eksik etmeyen çok değerli hocalarım, danışmanım Sayın Prof. Dr. Sezai TOKAT'a ve eş danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Elif HAYTAOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora süreci boyunca Tez İzleme Komitesi'nde yer alan, bana rehberlik eden ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ'ye ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Meriç ÇETİN'e çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, desteklerini, güvenlerini ve sevgilerini daima hissettiğim anneme, babama ve sevgili eşime tüm kalbimle teşekkür ederim.



# 1. GİRİŞ

Teknolojideki ve dünyadaki hızlı değişimlerle birlikte gerek kitlesel gerek cihazlar arası iletişim, önemli bir gereksinim haline gelmiştir. Özellikle son yıllarda Endüstri 4.0 ve Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramları, kablosuz iletişim araçlarının da gelişmesine doğrudan katkıda bulunmuştur. Akıllı fabrikalar, birbirleriyle etkileşimli robotlar, akıllı ev otomasyonları gibi yeni nesil uygulamaların oldukça yaygın hale gelmeye başlaması ile bu gereksinim giderek artmıştır. Bu nedenle, yüksek işlem gücüne sahip, daha akıllı, daha düşük enerji tüketimine sahip, kolay taşınabilir, yüksek kapasiteli kablosuz iletişim araçları ve yeni nesil yonga (mikroçip) teknolojisiyle güçlendirilmiş duyurga (sensör) sistemleri geliştirilmektedir.

Telsiz duyurgalar; ışık, basınç, radyoaktivite, sıcaklık ve nem (Cheng ve diğ. 2016) gibi çevresel ve fiziksel büyüklükleri ölçmek için tasarlanmış, düşük güçte çalışan ve duyurga teknolojisinin, sinyal işleme, telsiz iletişimi ve bilgisayar bilimlerinin bir araya getirilerek oluşturulduğu, enerjileri oldukça kısıtlı otonom elektronik devrelerdir (Kabashkin ve Kundler 2017). Duyurgalar ölçtükleri veriyi, bağlı buldukları ağa veya merkezi bir istasyona iletirler.

Telsiz duyurga ağı (TDA); çevresel parametreleri algılamak amacıyla, çok sayıda düşük enerjiye sahip duyurganın dağıtık bir şekilde coğrafi bir alana konumlandırılmasıyla oluşturulan ağlardır (Varsa ve Sridharan 2019, Hwang ve diğ. 2017).

TDA'lar; askeri alanlarda (Lee ve diğ. 2009, Winkler ve diğ. 2008, Arora ve diğ. 2004), hedef tespiti ve takibinde (Abrardo ve diğ. 2017, Xiao ve diğ. 2016, Xue ve diğ. 2009) ekolojik çevrede (Wang ve diğ. 2015, Martinez ve diğ. 2004), sağlık sektöründe (Abreu ve diğ. 2017, Hadjidj ve diğ. 2013, Domingo 2012), deprem, yangın, sel ve kasırga gibi doğa afet izlemede (Ragnoli ve diğ. 2020, Devasena ve Sowmya 2015, Dlodlo ve Kalezhi 2015, Guang-Hui ve diğ. 2006, Hartung ve diğ. 2006, Estrin ve diğ. 2002), yapıların sağlamlık durumlarını izleyen uygulamalarda (Sohn ve diğ. 2004), akıllı ev uygulamalarında (Tsai ve diğ. 2020, Pau ve Salerno 2019, Pirbhulal ve diğ. 2017, Ransing ve Rajput 2015, Basu ve diğ. 2013), hayvan

takip sistemlerinde (Loreti ve diğ. 2019, Nath ve Azharuddin 2019, Luque ve diğ. 2016, Radoi ve diğ. 2015), akıllı çiftliklerde ve tarımsal alanlarda (Kamath ve diğ. 2019, Khan ve diğ. 2019, Khan ve Kumar 2019, Daskalakis ve diğ. 2018, Alskaf ve diğ. 2017, Jawad ve diğ. 2017, Meda ve diğ. 2017, Shinghal ve diğ. 2010, Villarrubia ve diğ. 2017, Hedley ve diğ. 2012), giyilebilir teknolojilerde ve vücut alan ağlarında (Ullah ve diğ. 2019, Kalaiselvi ve diğ. 2018, Zhou ve diğ. 2017, Zhang ve diğ. 2016), düşük maliyet, düşük güç tüketimi, zorlu çevresel alanlarda dahi kolay kurulum, kolay veri toplama gibi nedenlerden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir (Cong ve diğ. 2018).

Telsiz duyurga ağlarının temel amacı, duyurgalar tarafından ölçülen verinin periyodik olarak bir hedefe iletilmesidir (Chen ve diğ. 2017, Li ve diğ. 2016, Rashid ve Rehmani 2016, Saleem ve diğ. 2015, Joo ve Shroff 2014). Bu veri, merkezi sistemlerde doğrudan bir istasyona, dağıtık sistemlerde ise komşu düğümler üzerinden bir hedefe gönderilmektedir. Her iki yapıda da veri paketlerinin bozulması, iletilmemesi ya da kaybolması gibi olumsuz durumlarla karşılaşılabilir. Bu nedenle, TDA'larda verinin yönlendirilmesi için geliştirilecek algoritmalar oldukça önem taşımaktadır.

Duyurgaların kısıtlı enerjiye sahip olması da TDA'larda karşılaşılan önemli sorunlardan biridir. Oluşturulan bir TDA'nın doğada uzun süre görevini yerine getirmesi beklenir. Ancak TDA'yı meydana getiren duyurgaların zamanla enerjilerinin tükenmesi veya dış etmenlere bağlı olarak devre dışı kalması, TDA'nın yapısını bozabileceği için ağın görevini yerine getirememesine neden olmaktadır. TDA'lar ile ilgili yapılan birçok uygulamada, ağ üzerinde bulunan herhangi bir düğümün enerjisinin bitmesiyle ağın yaşam süresinin sona erdiği kabul edilmektedir (Mukherjee ve diğ. 2015). Bu nedenle, TDA'nın yaşam süresini artırmaya yönelik enerji etkin uygulamalar ve algoritmalar geliştirilmektedir.

Tez kapsamında, enerji hasadı yapabilen düğümlerin yer aldığı TDA'ların yaşam süresini artıran yeni bir dağıtık algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, ağ üzerinde bulunan herhangi bir düğümün enerjisinin bitmesiyle ağın yaşam süresinin sona erdiği kabul edilerek, bu sürenin artırılmasına yönelik geliştirilen algoritmadır. Geliştirilen bu algoritma, benzetim ortamlarında geliştirilmiş, test edilmiş, sonuçları geleneksel sel tabanlı yöntemler ve literatürde bulunan bir enerji etkin dağıtık bağlı

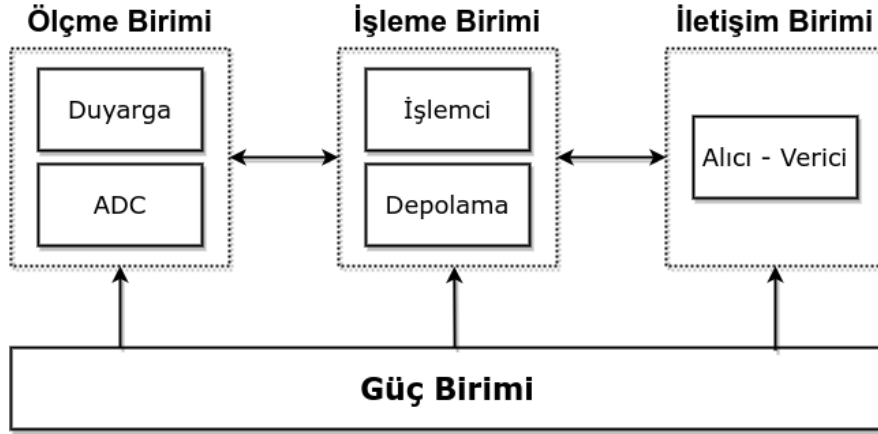
baskın küme algoritması ile karşılaştırılmıştır. Benzetim ve karşılaştırma sonuçlarına göre, geliştirilen algoritmanın enerji hasadı yapabilen düğümlerin bulunduğu ve dağıtık bağlı baskın küme iletişim omurgasının kullanıldığı telsiz duyarga ağlarında ağın yaşam süresini oldukça arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca bu algoritma, farklı alanlarda kurulacak enerji hasadının yapılabileceği tüm TDA'lar için kullanılabilir. Bunun yanı sıra, algoritmada yer alan ve düğümleri kapsayan düğüm hale getirerek bağlı baskın kümeye seçilmesini sağlayan düğüm ağırlıkları yeniden modellenmiştir. İyileştirilen algoritma, kapsayan düğüm seçiminde düğüm tipi, komşu düğüm sayısı, komşu düğümlerin kalan enerjileri, komşu düğümlerin tipleri gibi etkenleri göz önünde bulundurmaktadır. Böylece tez kapsamında geliştirilen algoritmanın iyileştirilmiş hali de sunulmuştur.

Tezin organizasyonu ise şu şekildedir; telsiz duyargaların teknik özellikleri, duyargalarda kullanılan iletişim protokolleri, TDA'lar ve TDA'lar için geliştirilmiş benzetim ortamları Bölüm 2'de anlatılmaktadır. Bölüm 3'te çizge kuramı, uygulamaları ve TDA'lar ile ilişkileri ile TDA'larda enerji tanımları ve hesaplamaları verilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen algoritma ile literatürde yer alan enerji etkin algoritmaların ayrıntılı anlatımı ve bu algoritmaların birbirleri ile karşılaştırma sonuçları Bölüm 4'te verilmiştir. Son olarak Bölüm 5'te ise geliştirilen algoritmaların katkısı tartışılmıştır.

## 2. TELSİZ DUYARGA AĞLARI

### 2.1 Telsiz Duyargalar

Telsiz duyarga düğümleri; ölçme, işleme, iletişim gibi süreçleri yürüten, ölçülen verinin saklandığı ve iletildiği, TDA'yı oluşturan en önemli öğelerdir (Dargie ve Poellabauer 2010). Telsiz duyarga düğümleri temel olarak Şekil 2.1 ile gösterilen ölçme birimi, işleme birimi, iletişim birimi ve güç birimi olmak üzere dört alt bölümden oluşmaktadır (Shaikh ve Zeadally 2016).



Şekil 2.1: Bir telsiz duyarganın mimarisi (Dragos ve Smarsly 2015).

Endüstriyel iletişim ağlarının kurulumunda kablolama maliyeti metre başına 130\$ ile 650\$ arasında değişkenlik gösteriyorken, telsiz duyargaların kullanımı bu maliyeti %20 - %80 oranında düşürmektedir (Sensors Magazine 2004). Böylece maliyetlerin düşürülmesi ile elde edilen kazanç, endüstride kurulacak telsiz duyarga ağları sayesinde üretimin sürekli kontrol edilmesi, arıza ve afet durumlarının önüne geçilmesi, kurulacak ağların bakım giderleri gibi amaçlar için daha etkin bir şekilde kullanılabilir.

Telsiz duyargaların en önemli avantajı taşınabilir olmalarıdır. Bir duyarganın bozulması ya da farklı bir yerde konumlandırılacak olması durumunda duyarganın yerinin değiştirilmesi oldukça kolaydır. Duyargaların endüstride yer alan şaft gibi hareket eden donanımlara konumlandırılması, kritik verilerin ölçümünde kolaylık

sağlamaktadır (Wang ve diğ. 2006). Bunun yanı sıra duyargaların hareket eden araçlara yerleştirilmesi ile mobil takip sistemleri geliştirilmiştir.

Duyargalar birbirleriyle ve merkezi bir istasyon ile kablosuz olarak iletişim kurarlar. Bu iletişim WiFi (Adu-Manu ve diğ. 2018), ZigBee (Dewi ve diğ. 2020), Bluetooth (Kamalinejad ve diğ. 2015), SigFox (Jawad ve diğ. 2017), 2G/3G/4G/5G (Velinov ve Mileva 2016), LoRa (Ragnoli ve diğ. 2020) gibi kablosuz iletişim yöntemleri ile gerçekleştirilir (Jawad ve diğ. 2017). Kablosuz iletişim için duyargalarda ölçülen çevresel verilerin iletilmesinde Bölüm 2.2’de bahsedilen bazı yönlendirme protokolleri kullanılmaktadır.

### **2.1.1 Telsiz Duyarga Çeşitleri**

Literatürde Tmote Sky, TelosB, MICAz ve Z1 gibi birçok telsiz duyarga çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan bazılarının geliştirilmesi ve üretimi sona ermiş olup bazıları ise farklı şirketler tarafından farklı isimler ile üretilmeye devam etmektedir.

#### **2.1.1.1 Tmote Sky Duyargası**

Literatürde en çok tercih edilen duyargalardan biri olan Tmote Sky (Tmote Sky Datasheet 2005) duyargası, çok az enerji harcayan, USB ve IEEE 802.15.4 standartlarını destekleyen, sıcaklık, ışık, nem gibi endüstriyel ölçümleri rahatlıkla yapabilen duyargadır. Tmote Sky duyargası, UC Berkeley’de geliştirildikten sonra Moteiv şirketi tarafından piyasaya sürülmüştür. Texas Instruments MSP430 işlemcisine, 2.4 GHz’lik CC2420 RF yongasına, veri ölçümünde 8 ADC kanalına, ışık, sıcaklık ve nem duyargalarına ve USB port desteğine sahip olan ve Şekil 2.2 ile gösterilen Tmote Sky duyargası, 2 adet AA pil ile 150 m’ye kadar bir alan içinde çalışabilmektedir. Tmote Sky duyargasının teknik özellikleri Tablo 2.1 ile verilmiştir.



Şekil 2.2: Moteiv firmasına ait Tmote Sky duyargası (Tmote Sky Datasheet 2005).

Tablo 2.1: Moteiv firmasına ait Tmote Sky duyargası teknik özellikleri (Tmote Sky Datasheet 2005).

	<b>Teknik Özellikler</b>
Mikro kontrolör	Texas Instruments MSP430 8MHz
MAC Protokolü	IEEE 802.15.4
RF Yongası	Texas Instruments CC2420 2.4 GHz
Transfer Oranı	250 Kbps
Alan	150 m dış alan, 50 m'ye kadar iç alan
Ara yüzler	USB, UART, SPI, I <sup>2</sup> C, Dijital I/O
RAM	10K bayt
Seri Bellek	1024K bayt
Analog - Dijital Çevirici	12 bit ADC, 8 kanal 0-3 V giriş
Dijital - Analog Çevirici	12 bit DAC, 2 port
Frekans Bandı	2400 MHz'den 2483.5 MHz'e ISM bandı
Ağırlık	17.7 g
Güç	3V
Uyumluluk	TinyOS ve Contiki OS
Batarya	2 x AA pil

### 2.1.1.2 TelosB Duyargası

TelosB duyargası (TelosB Datasheet 2003), Tmote Sky duyargası ile aynı özelliklere sahiptir. Her iki duyarganın da farklı isimlendirilmesinin nedeni ise duyargaları geliştiren, 2003 yılında Sentilla adını alan Moteiv şirketi ile Crossbow şirketlerinin aynı tasarımı paylaşmaları ancak farklı isimlendirme yapmalarından kaynaklanmaktadır (Lajara ve diğ. 2010).

### 2.1.1.3 MICAz Duyargası

MICAz (Crossbow Technology Micaz Datasheet 2003) duyargası, Mica ailesine ait olan ve CrossBow şirketi tarafından geliştirilen ikinci ve üçüncü nesil duyargalardır. MoteWorks ve Contiki sistemleri ile bütünleşik çalışabilmektedir. Mica duyargası üzerinde hiçbir ölçüm birimi bulunmamasına rağmen MICAz duyargası da Tmote Sky duyargası gibi sıcaklık, nem, basınç, ışık, sismik, akustik, manyetik vb. ölçümler için kullanılabilir (Johnson ve diğ. 2009). MICAz duyargasının teknik özellikleri Tablo 2.2 ile verilmiştir.

**Tablo 2.2:** Memsic firmasına ait MICAz duyargası teknik özellikleri (Crossbow Technology Micaz Datasheet 2003).

	<b>Teknik Özellikler</b>
Mikro kontrolör	Texas Instruments MSP430 8MHz 10K RAM 48K Flash
MAC Protokolü	IEEE 802.15.4
RF Yongası	Texas Instruments CC2420 2.4 GHz
Transfer Oranı	250 Kbps
Alan	75-100 m dış alan, 20-30 m iç alan
Ara yüzler	USB, UART, SPI, I <sup>2</sup> C
Ağırlık	18 g
Güç	3V
Uyumluluk	Tiny OS ve Contiki OS
Batarya	2 x AA

#### **2.1.1.4 Z1 Duyargası**

Zolertia firmasının ürettiği Z1 duyargası, Tmote Sky duyargasının bazı özelliklerinin geliştirilmiş halidir. 6LoWPAN ve ZigBee uyumlu 2.4 GHz IEEE 802.15.4 protokolünü kullanan ve 16 MHz MSP430F2617 mikroişlemciye sahip duyarga, 92 KB flash belleğe ve 10 KB belleğe sahiptir (Zolertia Z1 Datasheet 2006). Zolertia firması Z1 duyargasını artık üretmemekte olup IoT uygulamaları için Firefly ve Re-Mote duyargalarını üretmektedir.

Bölüm 2.4'te de anlatılacağı üzere, tez kapsamında geliştirilen algoritmalar için benzetim ortamlarının duyarga destekleri dikkate alınmıştır. Bu nedenle bu çalışma için, algoritmaların geliştirilmesinde kullanılan benzetim ortamının doğrudan destek sağladığı ve literatürde en çok tercih edilen duyargalardan biri olan Tmote Sky duyargası seçilmiştir.

## **2.2 Duyargalarda Kullanılan Yönlendirme Protokolleri**

TDA'larda ve Nesnelerin İnterneti uygulamalarında yer alan duyargalar iletişim halinde aldıkları verileri bir başka duyargaya ya da merkezi bir istasyona iletim sürecini IEEE 802.15.4 (Hwang ve diğ. 2017), CoAP (Moritz ve diğ. 2012), RPL (Zhang ve diğ. 2017) ve 6LoWPAN (Caicedo-Ortiz ve diğ. 2018) gibi yönlendirme protokolleri üzerinden gerçekleştirmektedirler. TDA'larda veri paketlerinin yönlendirilmesi ve iletimi önemli bir konudur. Bu nedenle TDA'lar kurulurken seçilecek iletişim protokolünün kayıpsız, güvenilir ve sürekli olması gerekmektedir.

### **2.2.1 IEEE 802.15.4 İletişim Protokolü**

Telsiz duyarga düğümleri, iletişim standardı olarak genellikle IEEE 802.15.4 protokolünü kullanırlar. IEEE Standartlar Birliği, 2012 yılında IEEE 802.15.4e adı altında Nesnelerin İnterneti sistemlerine uygun olacak şekilde IEEE 802.15.4 standardında MAC katmanının geliştirilmesi ile zaman-aralıklı kanal atlama (TSCH) mekanizması içeren yeni bir iletişim protokolü yayınlamıştır (Hwang ve diğ. 2017).



IEEE 802.15.4e protokolünün önemli özellikleri ise, veri iletiminde kullanılan frekans atlamalarının güvenilirliği artırması ve düğümlere zaman aralığı planlama imkânı sunmasıdır (Guglielmo ve diğ. 2014, IEEE Standards Association 2011). IEEE 802.15.4e protokolünde yer alan TSCH mimarisi IPv6 ile uyumlu hale getirilerek, düşük güçlü ve kayıplı ağların yüksek hızlı omurgalar ile bağlantısını sağlayan 6TiSCH mimarisi geliştirilmiştir (Ünlü ve diğ. 2017).

### **2.2.2 CoAP İletişim Protokolü**

Kısıtlı Uygulama Protokolü (CoAP), kaynakları sınırlı duyargalar için tasarlanmış makineden makineye iletişim gereksinimlerini sağlayan, kaynak keşfi ve kimliklemesi yapan, asenkron iletişim sunan ve REST mimarisi ile güvenilir mesaj değişimi sağlayan uygulama katman protokolüdür (Khattak ve diğ. 2014, Bormann ve diğ. 2012).

### **2.2.3 RPL İletişim Protokolü**

RPL, düşük güçlü ve kayıplı ağlar için çevrimsel olmayan hedef-yönelimli yönlü çizge (DODAG) yönlendirme topolojisi oluşturan IPv6 yönlendirme protokolüdür (Winter ve diğ. 2012). Diğer bir deyişle RPL yönlendirme tekniği, TDA'yı kökü merkezi bir istasyon olan çevrimsel olmayan yönlü çizgeye dönüştürmektedir. RPL böylece TDA'da yer alan herhangi bir düğümden ağın kök düğümüne erişim maliyetini en aza indirmeye çalışmaktadır. Literatürde birçok enerji etkin RPL iletişim protokolü kullanan çözümler geliştirilmiştir.

### **2.2.4 6LoWPAN İletişim Protokolü**

Düşük güçlü kişisel alan ağları için IPv6 protokolü (6LoWPAN) ise TCP/UDP/IPv6 protokollerini IEEE 802.15.4 protokolüne adapte etmek için geliştirilmiş olan ve TDA'larda PHY/MAC katman protokolünün kullanıldığı katmanı ifade eder. 6LoWPAN mimarisinin birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar kısaca şöyledir (Ma ve Luo 2008);

- Popülerleşme: IP ağlarının geniş çapta olması ile IPv6 protokolünün yeni nesil İnternet uygulamalarında kullanılması sayesinde tercih edilen mimaridir.
- Uygulanabilirlik: IP yığınının geniş çapta tanınması ile kolay uygulanabilir durumdadır.
- Geniş Adres Alanı: Geniş ölçekteki ve yüksek yoğunluktaki TDA'lar için ayrılmış geniş adres alanı sunmaktadır.
- Mekândan Bağımsız Adres Kurulumu: Düğümlerin sahip olduğu IPv6 adreslerini MAC adreslerine dayandıran 6LoWPAN mimarisi, DHCP sunucuları gibi sunucu altyapıları gereksinimini ortadan kaldırmaktadır.
- Erişim Kolaylığı: 6LoWPAN protokolü kullanan herhangi bir TDA, uzakta yer alan başka bir IP tabanlı ağdan hiçbir kapı sunucusu kullanılmaksızın kolaylıkla erişilebilir durumdadır.

TDA'larda kullanılan bir diğer iletişim protokolü olan ZigBee ile 6LoWPAN mimarisinin karşılaştırılması (Cody-Kenny ve diğ. 2009) Tablo 2.3'te verilmiştir.

**Tablo 2.3:** ZigBee ile 6LoWPAN karşılaştırması (Cody-Kenny ve diğ. 2009).

	<b>ZigBee</b>	<b>6LoWPAN</b>
Bellek Gereksinimi	8K	4K
Başlık Boyutu	8 - 16 bayt	2 - 11 bayt
Ağ Boyutu	65K	2 <sup>64</sup>
RF Radyo Desteği	802.15.4	802.15.4
Taşıma Katmanı	-	UDP/TCP
Mesh Ağ Desteği	ZigBee	Çoklu
İnternet Bağlanırlığı	ZigBee Geçidi (Gateway)	Köprü (Bridge) / Yönlendirici (Router)

### 2.3 Telsiz Duyarga Ağları

Birçok telsiz duyarganın genel bir amaç doğrultusunda dağıtık bir şekilde bir araya gelerek oluşturdukları ağlara Telsiz Duyarga Ağları adı verilmektedir (Singh ve diğ. 2020). Ağı oluşturan farklı kullanım alanlarına bağlı olarak konumlandırılmış duyargalar çevredeki fiziksel ya da kimyasal değişkenleri belirli sürelerde ölçerek birbirlerine ya da merkezi bir istasyona iletirler. TDA'lar sayesinde sürekli veri akışının olduğu sistemlerde izleme, koruma, tahmin etme, önleme gibi karar verme süreçleri kolaylıkla yürütülmektedir. TDA'larda bulunan tipik bir duyarga üzerinde bulunan piller ile çalışmaktadır. Bu nedenle kısıtlı enerji kaynağı ile sürekli veri ölçümü ve iletimi yapmakta oldukları için enerjilerini de mümkün olduğunca verimli kullanmaları gerekmektedir. Ancak verinin ölçülmesi ile iletiminde doğal çevrede kayıplar yaşanmaktadır. İletilmek istenen veri paketleri bazen iletilecek duyarga ya da istasyona gönderilememekte ve iletim trafiği içinde paketlerin çakışması sonucu paket kaybı yaşanmaktadır. Bu nedenle TDA'lar düşük güçlü ve kayıplı ağlar (LLN) olarak da adlandırılırlar (Park ve diğ. 2012).

Bir TDA uygulamasının aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenmektedir (Pour 2016). Bu özellikler;

- Ağın yaşam süresi uzun olmalıdır. Bir TDA kurulumundan sonra TDA'yı oluşturan duyargalara erişim çevresel şartlara bağlı olarak zor olabilir. Bu nedenle amacına uygun kurulmuş bir TDA uzun süre aynı şekilde çalışması gerekmektedir.
- Genellikle geniş alanlarda daha çok olayların takip edilebilmesi için büyük ağların kurulması hedeflenir bu nedenle TDA konumlandırılırken ağın boyutu iyi belirlenmelidir.
- Hataların en aza indirilmesi gerekmektedir. Hatalı kurulmuş bir TDA gereksiz kaynak tüketirken eksik ölçümler gerçekleştirir. Bunun yanında, duyarga seviyesinde çevreden alınacak periyodik ölçümün yapılamaması, merkezi bir istasyona iletimde ise bu durum paket kaybının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Her iki durumda da ölçümler eksik ya da hatalıdır ve gönderilen veri güvenilir değildir.

Yukarıda listelenen bu özellikler ise iletişimde bazı ölçütleri beraberinde getirmektedir. Bu ölçütler;

- TDA’larda az enerji tüketimi yapılmalıdır. Yüksek ağ yaşam süresi için enerjinin korunması ve tüketiminin daha etkin şekilde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, enerjinin en çok kullanıldığı duyargalardan duyargalara ya da merkezi istasyona veri iletimi işleminde harcanacak enerji daha az olmalıdır.
- TDA’lar çoklu-atlama (*multi-hop*) iletişim ile uyumlu olmalıdır. TDA’da yer alan bir duyarga, merkezi istasyona uzaklığından dolayı istasyon ile doğrudan iletişim kuramamaktadır. Duyarganın ölçtüğü veri diğer duyargalar üzerinden istasyona iletilir. Böylece ağ üzerinde atlamalı bir yapı oluşmaktadır.
- TDA’lar, ağ boyutu artırıldığında dâhi düğümler arası iletişimin sürekli ve iletişim protokolünün de güvenilir olacağı şekilde ölçeklenebilir olmalıdır.
- TDA’larda iletilen veri güvenilir olmalıdır. Ağ üzerinde paket kayıplarının olmasına rağmen güvenilir veri iletiminin sağlanması en temel zorluklardan birisidir.

Tüm bu özellikler ve ölçütler göz önüne alınarak kurulacak TDA’lar, daha kolay erişilebilen, daha güvenli, daha kayıpsız ve daha uzun yaşam süresine sahip olacaktır. Böylece TDA’lar üzerinde çalışacak uygulamalar da daha az arıza veren, daha esnek ve daha verimli uygulamalar haline gelecektir.

### **2.3.1 Telsiz Duyarga Ağları ile İlgili Yapılan Çalışmalar**

Literatürde farklı alanlar için birçok TDA uygulaması geliştirilmiştir. Bu alanların başında ise çevresel ve zirai uygulamalar gelmektedir. Örneğin, Daskalakis ve diğ. (2018), yaprakların su ihtiyacını ölçerek bitkilerin sulama sistemini kontrol edebilen ve bu sayede gereksiz su tüketiminin önüne geçen düşük maliyetli ve düşük güç tüketen yeni bir TDA uygulaması geliştirmişlerdir. Kamath ve diğ. (2019), görsel duyarga olarak Raspberry Pi ile iletişim yöntemi olarak Bluetooth kullanarak çeltik tarlası ekinlerinin izlenebilmesi için telsiz görüntü duyarga ağı geliştirmişlerdir.

Khan ve diğ. (2018), TDA'lar yardımıyla ekinlerin sulanması için sudan yararlanma ve karar verme destekli enerji etkin bir sistem geliştirmişlerdir. Meda ve diğ. (2017), tarla içinde rastgele dolaşarak farklı alanlardan veri toplayan gezici duyargalara sahip bitki izleme sistemi geliştirmişlerdir. Toplanan veriler ana istasyon tarafından analiz edilerek bitkileri herhangi bir bakteriyel ya da mantar hastalığından korumayı hedeflemişlerdir.

Villarrubia ve diğ. (2017), ekinlerin izlenmesi ve sulama kontrolü için bulanık mantık uygulaması içeren bir TDA yapısı geliştirmişlerdir. Shinghal ve diğ. (2010), patates üretim veriminin artırılması için ekinleri izleyen ve sulama ve gübreleme gibi işleri takip eden bir TDA uygulaması geliştirmişlerdir. Hedley ve diğ. (2012) ise, topraktan alınan nem verisini ana istasyona enerji etkin bir yol üzerinden gönderirken enerji kaybını en aza indirgeyen bir yöntem geliştirmişlerdir. Khan ve Kumar (2019), bir duyarga ile gezici bir istasyon arasında düşük maliyetli bir yol bulan ve ekin alanlarının izlenmesi için geliştirilen TDA'lardaki gecikme ve enerji tüketimini azaltmak için gezici istasyonun izleyeceği rotayı bulan algoritma geliştirmişlerdir.

Radoi ve diğ. (2015), Retuerta atlarına giydirilen gezici duyargalar ile topladıkları verileri ana istasyona ileten bir takip sistemi geliştirmişlerdir. Luque ve diğ. (2016), kurbağa türleri üzerinde denemiş oldukları MPEG-7 standardı ile çevresel telsiz akustik duyarga ağı mimarisi geliştirmişlerdir. Loreti ve diğ. (2019) ise, Galapagos adasında keşfedilen pembe iguana türlerinin takibini yapabilen ve enerji hasadı mimarisine sahip bir TDA geliştirmişlerdir. Nath ve Azharuddin (2019), gergedanları avcılara karşı korumayı sağlayan bir TDA modeli ve yönlendirme algoritması ortaya koymuşlardır.

Dünya üzerinde petrol ve gaz rezervlerinin azalması ekonomik, politik ve sosyal nedenlerden dolayı yenilenebilir, yeşil enerji kaynaklarına yönelimi sağlamıştır. Rüzgâr enerjisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Bu tür bir enerji, rüzgâr türbinleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Ancak rüzgâr enerjisi santrallerinin ve türbinlerinin kullanılmasında bazı zorlukları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi ise, yapısal hasarların zamanında ve düzgün bir şekilde tespitidir. Bu nedenle Alves ve diğ. (2017), TDA'lar kullanarak, rüzgâr türbinlerinde hasar önleme sistemi geliştirmişlerdir. Bu akıllı sistem, merkezi

olmayan bir sistemdir ve tüm karar verme süreci ağ içinde düğümlerin işbirliğiyle gerçekleşmektedir.

TDA'lar, ekolojik çevre içinde birçok farklı alanda kolaylıkla kullanılabilen ağlardır. Bu alanlardan biri de okyanuslar, denizler, göller, akarsular gibi su altı alanlarıdır. Ahmad ve diğ. (2017), su altında kurulmuş olan TDA'ların, ağ yaşam süresini ve verimliliği artırmak için alan tabanlı işbirlikçi yönlendirme protokolü geliştirerek enerji tasarrufu sağlayan teknikler kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan ve SNR kazancı ile olasılık hesapları içeren matematiksel modeller, bilgisayar benzetimi yardımıyla doğrulanmıştır.

Literatürde TDA'ların güvenlik, paket kaybı ve gecikmesi, enerji tüketimi gibi sorunlarını çözmek amacıyla farklı yöntemler aranmıştır. Bu sorunların çözümü için Shi ve diğ. (2017), Shi ve diğ. (2014), Guo ve diğ. (2014), Lin ve diğ. (2009), Rao ve diğ. (2009) ağın yaşam süresini uzatmaya yönelik geliştirmeler yapmışlardır. Mohindru ve diğ. (2020), Caviglione ve Merlo (2012), Tapiador ve diğ. (2011) TDA'ların güvenlik sorunları üzerine çalışmışlardır. Duyarga düğümlerinin konumlandırılması üzerine Hashim ve diğ. (2016), Arkin ve diğ. (2014), Feng ve Zhang (2012), Wang ve diğ. (2012), Lei ve diğ. (2010), Jiang ve diğ. (2009), Chehri ve diğ. (2008), Tennina ve diğ. (2008) ile düğümlerin yer tayini üzerine ise Tomic ve diğ. (2015), Simonetto ve Leus (2014), Han ve diğ. (2013), Ji ve diğ. (2013) ve Gopakumar ve Jacob (2009) çalışmalar yapmışlardır.

Duyargaların ilettikleri veriler ile ilgili problemler de bulunmaktadır. Verinin ağ üzerinden aktarımı sırasında oluşan gecikme sorunu ile ilgili Saifullah ve diğ. (2014), Gu ve diğ. (2013), Shi ve Fapojuwo (2010) çözümler aramışlardır. İletimdeki paketlerin kaybının engellenmesi üzerine Li ve diğ. (2014), Dedeoglu ve diğ. (2012), ile Wani ve Rahnavard (2011) çalışmalar yapmışlardır. Veri iletimi sırasında oluşan trafiği azaltmaya yönelik ağ trafiğinin yönlendirilmesi ile ilgili Farjow ve diğ. (2012), Mohajerzadeh ve diğ. (2011) ile Rao ve diğ. (2011) çalışmaları bulunmaktadır. Duyargaların sınırlı enerjiye sahip olması sorununu gidermek için, Li ve diğ. (2014), Maleki ve diğ. (2014), Holland ve diğ. (2011), Gu ve diğ. (2011), Yun ve Xia (2010) ve Sankarasubramaniam ve diğ. (2003) enerji tasarrufu üzerine çalışmışlardır.

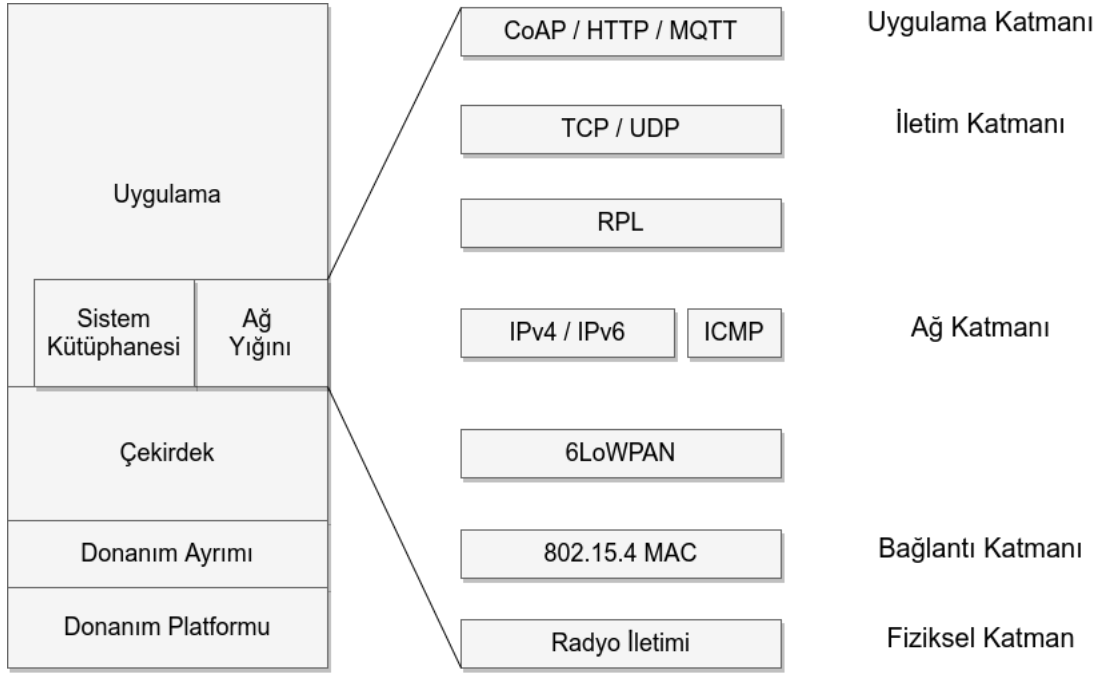
## 2.4 Telsiz Duyurga Ağları İçin Geliştirilmiş Benzetim Ortamları

Gerçek dünyada oluşturulan telsiz duyurga ağları, bazı benzetim araçları ile bilgisayar ortamında da gerçekleştirilebilmektedir. TDA'ların gerçek hayatta çalışır hale getirilmesinden önce benzetim ortamlarında test edilmesi, oluşabilecek hataları da en aza indirmektedir. Ortamda oluşacak paket kayıpları, duyurgaların kapsam dışı kalması, duyurgalar arası iletişim kopuklukları gibi sorunlar bu sayede ele alınabilmektedir.

Bazı benzetim ortamlarında duyurgalar için yazılan kodlar, doğrudan duyurgaya da yüklenebilmektedir. Böylece bir duyurga benzetim ortamında nasıl davranıyorsa gerçek dünyada da hemen hemen aynı şekilde davranacaktır.

Literatürde TDA'lar için yazılmış birçok benzetim aracı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları ns-2 (Pei ve diğ. 2009), ns-3 (Rege ve Pecorella 2016), OMNET++ (Köpke ve diğ. 2008), TOSSIM (Levis ve diğ. 2003), Cooja (Nasseri ve diğ. 2015), OPNET (Hammoodi ve diğ. 2009), J-Sim (Sobeih ve diğ. 2006), ShoX (Orfanus ve diğ. 2008), TRMSim-WSN (Mármol ve Perez 2009), WSNSim (Sinha ve diğ. 2009) gibi benzetim araçlarıdır. Bunlara ek olarak OMNET++ ortamından geliştirilmiş olan Castalia (Stehlik 2011) ve MiXiM (Köpke ve diğ. 2008) uygulamaları da bulunmaktadır. Tipik bir benzetim ortamı, uygulama, iletim, ağ, bağlantı ve fiziksel katmanlardan oluşur (Wang ve diğ. 2017). Şekil 2.3'te bir benzetim ortamının yapısı gösterilmektedir.

TDA'lar için yazılmış bu benzetim araçlarından ns-2 ve Castalia, C++ dilini desteklemekte olup grafiksel ara yüze (GUI) sahiptir. Worldsens (Fraboulet ve diğ. 2007) ve OPNET uygulamaları ise C dilini destekler ve GUI özelliğine sahiptir. TinyOS işletim sistemi üzerinde çalışan TOSSIM benzetim ortamı nesC, Python ve C dillerini desteklemektedir ancak GUI özelliği bulunmamaktadır. TOSSIM için özel olarak yazılmış GUI olan TinyVIZ (Levis ve diğ. 2003)'in geliştirilmesi sonlandırılmıştır. Contiki işletim sistemi üzerinde çalışan Cooja benzetim ortamı ise C dilini desteklemekte olup GUI özelliğine sahiptir. J-Sim, ShoX, TRNSim-WSN ile WSNSim uygulamaları ise Java dilini destekler ve GUI özelliği bulunmaktadır. Bu benzetim ortamları arasında TOSSIM hariç hepsi, TDA'ların enerji tüketim hesaplamalarını da desteklemektedir.



Şekil 2.3: Tipik bir TDA / IoT işletim sistemi yapısı (Wang ve diğ. 2017).

#### 2.4.1 TinyOS İşletim Sistemi ve TOSSIM Benzetim Aracı

Son yıllarda TDA'lara olan ilginin artması ile benzetim ortamlarının da geliştirilmesi doğru orantılı olmuştur. TinyOS işletim sistemi, 1999 yılında Berkeley Üniversitesi'nde geliştirilmiştir ve 2012'de son kararlı sürümü yayınlanmıştır.

TinyOS, üç farklı kod dosyasına sahiptir. Bunlar programa ait nesC kodunu içeren dosya, C kodunu içeren dosya ve "Makefile" dosyasıdır. nesC kodunu içeren dosya, projede kullanılacak kütüphanelerin eklenmesini, bileşenlerin tanımlanmasını ve proje içerisinde tanımlanmış değişkenlerin atanmasını sağlar. C kodunu içeren dosya ise programların yazıldığı ve TDA'nın nasıl davranacağını belirleyen kodları içerir. "Makefile" dosyası ise yazılan algoritmanın hangi duyarga tipi üzerinde çalışacağı gibi bir takım kuralları içeren dosyadır.

TinyOS işletim sistemi üzerinde çalışan TOSSIM bir ayırık olay benzetim programıdır ve öncelikli amacı TinyOS uygulamalarının benzetimine destek vermektir (Levis ve diğ. 2003). Ancak TOSSIM bazı uygulamalar için yeterli değildir. Örnek olarak enerji hesaplama konusunda doğrudan bir rolü yoktur. Bu nedenle Perla ve diğ. (2008), PowerTOSSIM adında bir eklenti geliştirilmiştir. Bu



eklenmesi sayesinde TOSSIM üzerinden TDA'ların enerji hesaplamaları ile duyargaların pil modellemeleri yapılabilmektedir.

TinyOS, sadece 8-bit ve 16-bit platformlar olmak üzere sınırlı destek sunmaktadır. İletişim için TCP, UDP ve IPv6 protokollerini içerirken 6LoWPAN ve RPL desteği de sunmaktadır. TinyOS, bellek için derleme zamanı statik bellek paylaşıcısı (*compile-time static memory allocation*) kullanmaktadır. Ancak yığın (*heap*), fonksiyon işaretçisi (*function pointers*) ya da dinamik bellek paylaşıcısı (*dynamic memory allocation*) gibi sanal bellek kavramına sahip değildir (Wang ve diğ. 2017). Bunların dışında, TinyOS ile ilgili birçok uygulama yapılmış olmasına rağmen literatürde sınırlı kaynak ve az destek bulunmaktadır. Şekil 2.4'te, TOSSIM üzerinden benzetim için MICAz duyargasının yapılandırılması, Şekil 2.5'te TOSSIM örnek uygulaması gösterilmektedir.

```
-----
TinyOS-2.1.2 with XM1000 support and MSP430-gcc 4.6
Setting up on source path /opt/tinyos-main
-----
omer ~/workspace/lifetime $ make micaz sim
mkdir -p simbuild/micaz
  placing object files in simbuild/micaz
  writing XML schema to app.xml
  compiling lifetimeAppC to object file sim.o
ncc -c -shared -fPIC -o simbuild/micaz/sim.o -g -O0 -tossim -fnesc-nido-tosnodes=1000 -fnesc-simulate -fnesc-nido-motenumt
micasb -DDEFINED_TOS_AM_GROUP=0x22 -finline-limit=100000 -DIDENT_APPNAME=\"lifetimeAppC\" -DIDENT_USERNAME=\"omer\" -DIDEN
-data-race lifetimeAppC.nc -fnesc-dump-components -fnesc-dump=variables -fnesc-dump=constants -fnesc-dump=typedefs -fnes
/opt/tinyos-main/tos/lib/tossim/sim_noise.c: In function 'sim_noise_gen':
/opt/tinyos-main/tos/lib/tossim/sim_noise.c:291:7: warning: variable 'noiseIndex' set but not used [-Wunused-but-set-varia
int noiseIndex = 0;
^
  compiling Python support and C libraries into pytostringstream.o, tostringstream.o, and c-support.o
g++-4.8 -c -shared -fPIC -o simbuild/micaz/pytostringstream.o -g -O0 -DIDENT_APPNAME=\"lifetimeAppC\" -DIDENT_USERNAME=\"omer\" -
/tinyos-main/tos/lib/tossim/tostringstream.cxx -I/usr/include/python2.7 -I/opt/tinyos-main/tos/lib/tossim -DHAVE_CONFIG_H
/opt/tinyos-main/tos/lib/tossim/tostringstream.cxx: In function 'void SWIG_Python_AddErrorMsg(const char*)':
/opt/tinyos-main/tos/lib/tossim/tostringstream.cxx:880:42: warning: format not a string literal and no format arguments [-Wfc
PyErr_Format(PyExc_RuntimeError, msg);
^
g++-4.8 -c -shared -fPIC -o simbuild/micaz/tostringstream.o -g -O0 -DIDENT_APPNAME=\"lifetimeAppC\" -DIDENT_USERNAME=\"omer\" -DI
/tinyos-main/tos/lib/tossim/tostringstream.c -I/usr/include/python2.7 -I/opt/tinyos-main/tos/lib/tossim
g++-4.8 -c -shared -fPIC -o simbuild/micaz/c-support.o -g -O0 -DIDENT_APPNAME=\"lifetimeAppC\" -DIDENT_USERNAME=\"omer\"
/tinyos-main/tos/lib/tossim/hashtable.c -I/usr/include/python2.7 -I/opt/tinyos-main/tos/lib/tossim
linking into shared object ./_TOSSIMmodule.so
g++-4.8 -shared -fPIC simbuild/micaz/pytostringstream.o simbuild/micaz/sim.o simbuild/micaz/tostringstream.o simbuild/micaz/c-support.o -
copying Python script interface TOSSIM.py from lib/tossim to local directory

*** Successfully built micaz TOSSIM library.
omer ~/workspace/lifetime $ █
```

Şekil 2.4: TOSSIM üzerinden MICAz duyargasının yapılandırılması.

```
omer ~/workspace/lifetime $ python test.py
DEBUG (1): >>> Uygulama basladi.
DEBUG (2): >>> Uygulama basladi.
DEBUG (3): >>> Uygulama basladi.
DEBUG (4): >>> Uygulama basladi.
DEBUG (5): >>> Uygulama basladi.
DEBUG (6): >>> Uygulama basladi.
DEBUG (1): Mesaj gonderiliyor...
DEBUG (2): Mesaj gonderiliyor...
DEBUG (3): Mesaj gonderiliyor...
DEBUG (4): Mesaj gonderiliyor...
DEBUG (5): Mesaj gonderiliyor...
DEBUG (6): Mesaj gonderiliyor...
DEBUG (5): Mesaj gonderildi.
DEBUG (1): Mesaj alindi.
DEBUG (2): Mesaj gonderildi.
DEBUG (2): Mesaj alindi.
DEBUG (1): Mesaj gonderildi.
DEBUG (4): Mesaj gonderildi.
DEBUG (3): Mesaj gonderildi.
DEBUG (6): Mesaj gonderildi.
```

Şekil 2.5: TOSSIM örnek uygulama ekran görüntüsü.

#### 2.4.2 Contiki İşletim Sistemi ve Cooja Benzetim Uygulaması

Contiki işletim sistemi (Dunkels ve diğ. 2004) ise 2003 yılında Swedish Institute of Computer Science'da geliştirilmeye başlanmış ve Texas Instruments, Atmel, Cisco, ENEA, ETH Zurich, Redwire, RWTH Aachen University, Oxford University, SAP, Sensinode, Swedish Institute of Computer Science, ST Microelectronics, Zolertia gibi yerlerde görev yapan bazı geliştiriciler tarafından geliştirilmiştir. Contiki işletim sistemi günümüzde, IoT uygulamalarını destekleyen bir sistem olarak Contiki-NG adı altında geliştirilmeye devam etmektedir.

Contiki işletim sistemi; bir çekirdek, kütüphaneler, program ara yüzü ve birçok işlemden oluşmaktadır. Contiki işletim sistemi üzerinde öykülenen Cooja benzetim aracı ise Java tabanlı bir uygulamadır, bu nedenle bünyesinde ağ benzetim izlemesi, zaman tüneli, radyo iz kaydı gibi birçok eklenti bulunmaktadır (Ali 2012). Topluluğun geliştirdiği farklı eklentiler ise kolaylıkla kullanılabilir. Cooja aracı, benzetim ortamında geliştirilen uygulamaların doğrudan gerçek duyargalar üzerinde çalıştırılmasını da sağlamaktadır. Bu nedenle Cooja bir benzetim aracından daha çok öykünücüdür. Cooja, Contiki-NG adı altında son zamanlarda IoT uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Cooja eş zamanlı olarak şu katmanlarda çalışmaktadır (Marques 2017);

- a) **Ağ Katmanı:** Bu katman genel olarak yönlendirme geliştiricileri için ya da bazı donanımların önemli olmadığı diğer ağ protokolleri için kullanışlıdır. Bu katmanın en önemli öğeleri radyo yayını ve radyo cihazlarıdır. Bu tür yeni cihazların ara yüzleri Java'da kolaylıkla geliştirilebilir ve Cooja benzetim ortamına eklenebilir. Bunun yanı sıra Cooja, benzetim ortamında geliştirmenin hızlandırılması ve yüksek-seviye algoritmaların daha etkin şekilde çalıştırılabilmesi amacıyla, daha az bellek ve işlemci gücü gerektiren saf Java kod düğümlerinin de eklenebilmesini desteklemektedir.
- b) **İşletim Sistemi Katmanı:** Bu katmanın amacı işletim sistemi kodlarını çalıştırarak benzetim yapmaktır. Bu katman genellikle Contiki geliştiricilerinin test etme ve Contiki kütüphaneleri değişimlerini değerlendirmeleri için kullanışlıdır.
- c) **Makine Kodu Komut Katmanı:** Farklı yapılarıdaki düğümlerin benzetimi, Java tabanlı mikro kontrolör öykünücüleri ile yapılabilir. Bu sayede ortama eklenecek düğümler derlenmiş Contiki işletim sistemi yerine Java tabanlı bir mikro kontrolör tarafından çalıştırılırlar.

Cooja bu üç katmanın hepsinde benzetim yapabilmektedir ancak bir düğümün benzetimi bu katmanların sadece birinde yapılabilir (Stehlik 2011). Bunun yanı sıra Cooja, çapraz-seviye (*cross-level*) benzetim desteği de sunmaktadır. Örnek olarak Java ile geliştirilmiş sanal bir düğüm bu sayede diğer herhangi tipteki bir düğüm (Tmote, Z1 vb.) ile etkileşim kurarak, aynı benzetim ortamı içinde radyo paketleri gönderebilmektedir (Marques 2017).

Cooja'da kablosuz kanal modeli şu öğelerden oluşur (Stehlik 2011):

- a) **Birim Çember Çizge Ortamı (UDGM) - Sabit Kayıp:** Eski ve basit bir modeldir. İletim sınırlarının ideal disk şeklinde modellendiği ve disk içinde kalan tüm düğümlerin paketleri aldığı ancak disk dışında kalan tüm düğümlerin paketleri alamadığı bir modeldir. Benzetimi yapılan cihazın en yüksek çıkış gücü için ön tanımlı en yüksek iletim sınırı ile mevcut çıkış gücü çarpılmıştır ve ortaya çıkan iletim gücü uzaklık ile

karşılaştırılır. Yani bir düğümün iletim sınırı 100m ise ve mevcut çıkış gücü de maksimumun yarısı ise, tüm paketlerin iletiildiği diskin yarıçapı 50m'dir.

- b) **Birim Çember Çizge Ortamı - Uzaklık Kaybı:** UDGGM modelleri için yeni bir uygulamadır. İletim sınırı UDGGM sabit kayıp modeli ile aynıdır fakat bunu iki yolla genişletir. Birincisi, karışıklıklar çok basit düzeyde dikkate alınmıştır. Eğer paketler karışırsa kaybolmuşlardır (karışıklık sınırı iletim sınırından çok yüksek olabilir). Yani aynı anda yapılan tüm iletişim başarısızdır, bu durum gerçek ile çelişmektedir. İkinci olarak, iletimin ve alımın başarı oranı tanımlanabilir. Paketler *SUCCESS\_RATIO\_TX* olasılığı ile iletilir (eğer başarısız ise hiçbir paketi alamaz) ve *SUCCESS\_RATIO\_RX* olasılığı ile alınır (eğer başarısız ise sadece sorumlu düğüm paketi alamaz). Her iki oranın da varsayılan değeri 1'dir.
- c) **Yönlü Çizge Radyo Ortamı (DGRM):** Bu model hem bağımsız hem de diğer radyo ortamı uygulamaları temeli için kullanılabilir. Bu çözümün amacı, asimetrik hatlardaki iletim başarı oranını belirlemektir. Dahası, hatlardaki iletim gecikmeleri tanımlanabilir.

Cooja, bazı farklı donanım platformlarında çalışabilir. MSP430 mikroçipine ve CC240 radyo yongasına sahip Tmote Sky duyargası Cooja için en çok bilinen duyargadır (Feng 2011). Bir diğer platform ise yine MSP430 destekli ve TR1001 düşük güçlü radyo alıcısı kullanan, Berlin Üniversitesi'nde geliştirilen Gömülü Duyarga Kartı (*ESB*)'dır. ESB ses, titreşim, hareket ve sıcaklık ölçen bazı duyargalarla donatılmıştır.

Contiki işletim sistemi temel olarak düşük güçlü duyarga ağlarında IP iletişimini sağlamak için geliştirilmiştir. IPv4 ve IPv6'nın her ikisini de desteklemektedir. IEEE 802.15.4 radyo hattı üzerinden paketlerin iletimini daha etkili bir şekilde sağlayan 6LoWPAN mekanizması da desteklenmektedir. Bunun yanı sıra, bant genişliği maliyeti yüksek olduğunda ya da IPv4 ve IPv6 yığınlarının aşırı yüklenerek kullanılamaması durumunda RIME alternatif bir ağ yığını olarak kullanılabilir (Wang ve diğ. 2017). RIME yığını, düşük güçlü kablosuz sistemler için *single-hop unicast*, *single-hop broadcast*, *multi-hop unicast*, *network flooding* ve

*address-free data collection* gibi iletişim özellikleri sağlar (Nasseri ve diğ. 2015). Contiki, 8-bit donanım platformlardan 64-bit donanım platformlarına kadar birçok heterojen donanımı desteklemektedir ve ayrıca yeni donanımlara da kolaylıkla uyum sağlayabilmektedir. Bu nedenle IoT alanı için önemli bir seçimdir (Wang ve diğ. 2017). Tablo 2.4’te Contiki işletim sisteminin ağ yığın yapısı verilmiştir.

**Tablo 2.4:** Contiki işletim sisteminin ağ yığını yapısı (Zikria ve diğ. 2018).

AĞ KATMANI	Uygulama	mqtt.c, er-coap.c, httpd.c vb.
	Taşıma	tcp-socket.c, udp-socket.c
	Ağ	rpl.c, uip.c, uip6.c vb.
	Adaptasyon	sicslowpan.c vb.
MAC KATMANI	MAC	csma.c, csmac.c, tsch.c vb.
RDC KATMANI	Görev Döngüsü	contikimac.c, nullrdc.c, norhc.c
RADYO KATMANI	Radyo	cc1200.c, cc2420.c, cc2520.c vb.

Benzetim algoritmaları yazılırken Cooja’nın yapısı gereği, C dilinde yer alan bazı temel bileşenler kullanılmaktadır. Mesajlar yapı (*struct*) tipindedir. Metotlar ise işlem (*process*) veri yapısı olmak zorundadır. C yapısı gereği kullanılacak başlık (*header*) kütüphaneleri “#include” anahtar kelimesiyle eklenir. Cooja’da her bir işlemin bir adı vardır, “PROCESS\_BEGIN” ile başlatılır ve “PROCESS\_END” ile sonlandırılır. Cooja benzetim algoritmasında birçok işlem yer alabilir ve her biri sırayla tanımlanmak zorundadır. Bu model içinde yer alan işlemlerin başlaması “AUTOSTART\_PROCESS” metodu ile gerçekleşmektedir. Bu metot, ana (*main*) metot ile aynı görevdedir.

Cooja içinde sayaç modülüne ait “timer”, “etimer”, “stimer”, “ctimer” ve “rtimer” adında hazır sayaçlar bulunmaktadır. Bu sayaçlar farklı kullanım alanlarına göre görev yapmaktadır. Cooja dâhilinde “CLOCK\_SECOND” adı altında tanımlanmış zaman birimi olan saniyedeki saat tik sayısı (*tics per second*), platform bağımlı olup işlemciye göre değişim göstermektedir.

Düğümelerde bulunan LED ışıklar da kontrol edilebilir. Bunun için yine hazır olarak yazılmış metotlar da bulunmaktadır. Bunlar *leds\_on* ve *leds\_off* gibi hazır metotlardır.

### 2.4.3 TinyOS ile Cooja Benzetim Araçlarının Karşılaştırılması

TinyOS ve Contiki benzetim sistemleri benzer işler için geliştirilmiş olsalar da aralarında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Tablo 2.5 ile özetlenebilir.

**Tablo 2.5:** TOSSIM ile Cooja karşılaştırılması (Stehlik 2011).

	<b>Radyo Yongaları</b>	<b>Desteklenen Platformlar</b>	<b>MAC Protokolleri</b>	<b>Diğer Protokoller</b>
TinyOS	TI CC2420 TI CC1100 TI CC2500 Infineon TDA5250 Atmel RF212 Atmel RF230 Semtech XE1205	MICAz IRIS Mica2 Imote2 Mulle TinyNode Tmote Sky / TelosB	B-MAC S-MAC	FTSP CTP RPL
Contiki	TI CC2420 TR1100	Tmote Sky / TelosB ESB Atmel AVR Raven	IEEE 802.15.4	uIPv4 uIPv6 RPL

Tablo 2.5'te gösterildiği gibi TOSSIM'in desteklediği platformlar, radyo yongaları, MAC protokolleri Cooja'ya göre daha fazladır. Ancak uygulamanın bazı kısıtları bulunmaktadır. TOSSIM sadece TinyOS uygulamalarını çalıştırmakta olup diğer platformları desteklememektedir. Bu nedenle TOSSIM enerji hesaplaması için yeterli değildir. Bu nedenle PowerTOSSIM (Perla ve diğ. 2008) geliştirilmiştir. Hareketli duyargalar için de MobTOSSIM (Derhab ve diğ. 2012) uygulaması geliştirilmiştir. Ayrıca TOSSIM'de her bir duyarganın nesC kodunu çalıştırması gerekmektedir. Bu nedenle TOSSIM sadece homojen uygulamaları destekler (Yu ve Jain 2011).

Cooja benzetim aracının görsel ara yüze sahip olması, düğümler arası haberleşmenin izlenebilmesi, paket takibinin yapılabilmesi, duyargaların hareketliliği (*mobility*) ve enerji hasadı (*energy harvesting*) gibi farklı konular için topluluk

tarafından geliştirilen eklentilerin olması ve aktif bir destek topluluğunun bulunması gibi özelliklerden dolayı Cooja'yı TOSSIM'e göre daha tercih edilebilir kılmaktadır. Ayrıca Cooja, Contiki-NG adı altında yeni nesil çalışma alanlarından IoT uygulamalarına destek vermektedir.

#### 2.4.4 SensEH Benzetim Ortamı

TDA'larda ağ benzetimlerinin yapılabilmesi için literatürde birçok uygulama geliştirilmiştir. Ancak bunların çoğunda enerji hesaplamaları ya da enerji hasadı için doğrudan kullanılacak bir destek bulunmamaktadır. Literatürde PASES (Minakov ve Passerone 2013), GreenCastalia (Benedetti ve diğ. 2013) ve SensEH gibi uygulamalar enerji hasadı yapabilen benzetim ortamlarıdır.

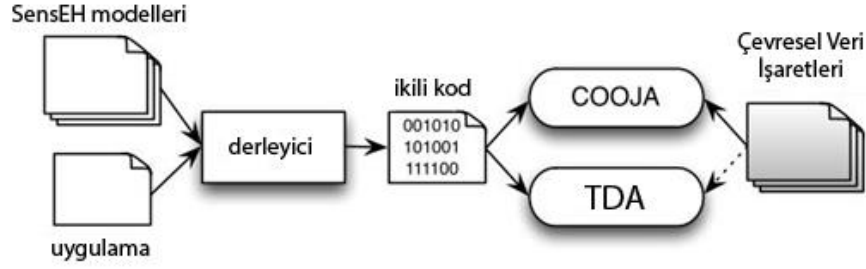
Dall'Ora ve diğ. (2014), Contiki benzetim sistemlerinde enerji hesaplamalarının da yapılabilmesi için Cooja benzetim aracı temel alınarak SensEH benzetim uygulamasını geliştirmişlerdir. SensEH, güç ve enerji tüketim hesapları yapabildiği gibi enerji hasadı ile ilgili hesaplamaları da desteklemektedir. Bu çalışmada Cooja benzetim ortamı kullanıldığı için enerji hesaplamaları SensEH yardımı ile yapılmaktadır.

SensEH, enerji hasadı, enerji depolama, güç tüketimi ve öykülenme alanlarının tümünde etkin olarak çalıştığı için diğer benzetim ortamlarının eksik kaldığı kısımlarda da öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra SensEH, gerçek zamanlı uygulamalarda da başarılı olmuştur.

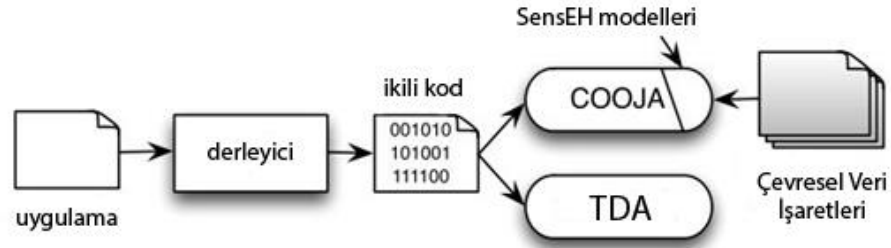
SensEH, Şekil 2.6 ile gösterilen hafıza kipi ile Şekil 2.7 ile gösterilen pin kipi olmak üzere iki ayrı işlemi destekler. Hafıza kipinde, sadece enerji hasadı benzetimi yapılmaktadır. Pin kipinde ise uygulama, pin-seviyesi iletişimi ile doğrudan hasatçıya erişebildiği için uygulama gerçek hayatta da kullanıma hazır durumdadır. Her iki durum da aşağıdaki modeller üzerinde çalışabilir.

- a) **Hasatçı Modeli:** Hasatçının (örn. güneş paneli), bazı giriş parametrelerini (örn. ışık yoğunluğu) temel alarak enerjiyi çevreden nasıl topladığını belirtir.

- b) **Pil Modeli:** Hasatçıya bağlanıldığında düğüm aktivitesine bağlı oluşan deşarj ile hasatçının neden olduğu şarjı dikkate alarak pilin nasıl davranacağını belirtir.
- c) **Güç Tüketim Modeli:** TDA düğümlerinin bazı durumlarda (örn. boşa çalışma) harcadığı zamanı temel alan güç tüketimini belirtir.



Şekil 2.6: Hafıza kipi için SensEH zincir uygulaması (Dall'Ora ve diğ. 2014).



Şekil 2.7: Pin kipi için SensEH zincir uygulaması (Dall'Ora ve diğ. 2014).

#### 2.4.4.1 SenseEH Enerji Hasadı Modeli

Bir enerji hasadı modeli, çevresel enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren mikro transformatör, üretilen enerjiyi dengeleyen voltaj dengeleyicisi ve akü olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Gerçek enerji hasadı sistemlerinde, sistemin yaşam süresi boyunca performans varyasyonları (şarj durumu, eskime, sızıntı, şarj/deşarj döngü sayıları) sergilemeleri nedeniyle piller ya da diğer enerji depolama birimleri ayrı düşünülürken mikro transformatör ile dönüştürme devresi genellikle bir arada düşünülmektedir.

Enerji hasadı modeli geliştirilirken dikkate alınması gereken bir husus da herhangi çevresel ve devresel bir durum altında en yüksek dönüştürme verimliliği



elde edecek kapasitedir. MPPT (Senivasan ve diğ. 2017) adı verilen özel devre uygulaması, çalışma zamanında performansın en yüksek olmasından sorumludur. Bir fotovoltaiik pil (PV) modülü genellikle yüke doğrudan bağlandığında işlem noktası nadiren en yüksek dönüştürme verimliliğindedir. MPPT'nin ilkesi yük ile PV modülünün arasındaki empedansın eşleştirilmesi ile en yüksek uygun gücün elde edilerek kullanılmasını sağlayacak olan AC/DC parametrelerin dengelenmesini garanti etmektedir. Dolayısıyla MPPT devresi, ortalama verimlilik ile dönüştürülmüş enerjiyi yükseltir. Diğer taraftan, ek elektronik bileşenlerin eklenmesi, hasatçıya karmaşıklık getirerek ek kayıpların oluşmasına neden olur. Bu nedenden dolayı, MPPT sayesinde toplanmış artan enerjiye göre daha az bir güç kaybının olması gereklidir. Bu, tasarım tarafında göz önüne alınması gereken ve benzetim modellerinde bulunması gereken kritik bir durumdur. SenseEH'de ayrıca güneş panellerinden yeterli özgün giriş gücü değerlerini elde etmek için ışık şiddeti (lüks) parametreleri de kullanılmaktadır (Dall'Ora ve diğ. 2014).

Birçok mevcut ağ benzetim uygulamasında ideal enerji depolama aygıtları düşünülerek oldukça basit pil modelleri kullanılmaktadır. Bu durumda piller, uygulama görevlerinin çalıştırılması süresince kesin enerji miktarı harcayan ve enerji kazanımı ile enerji tüketimi arasında dengenin pozitif olduğu zamanlarda eklenen sonlu kapasiteli depolama birimleri olarak modellenir. Buna rağmen gerçek piller, bu basit şekilde çalışmamaktadır. İdeal olmayan özelliklere sahip olan gerçek piller, davranışı, dağıtım kapasitesini ve pilin yaşam süresini oldukça etkilemektedir. Örnek olarak tüm piller zamanla kendi kendine deşarj olmaktadır. Bu, elektrotlar ile hiçbir bağlantısı olmayan bir pil hücresinde depolanmış enerjinin, sıcaklık ve hücre kimyasına bağlı olarak iç kimyasal tepkimeler nedeniyle eksilmesi durumudur.

Bu sorunlara ek olarak piller sıcaklık ve geri dönüşüm etkileri gibi doğrusal olmayan değişimlere sahiptir. Bu değişimler, enerji hasadı sistemlerinde doğrudan hatalara neden olabildiği ve pillerin yaşam süresini etkileyebildiği için hesaba katılması gereken durumlardır. Örnek olarak hasat sisteminde çevreden elde edilen enerjiyi depolamak için şarj edilebilir piller kullanıldığında, yaşam süresini de kısaltan her bir şarj döngüsünde pil kapasitesinde azalma göz önünde tutulmalıdır.

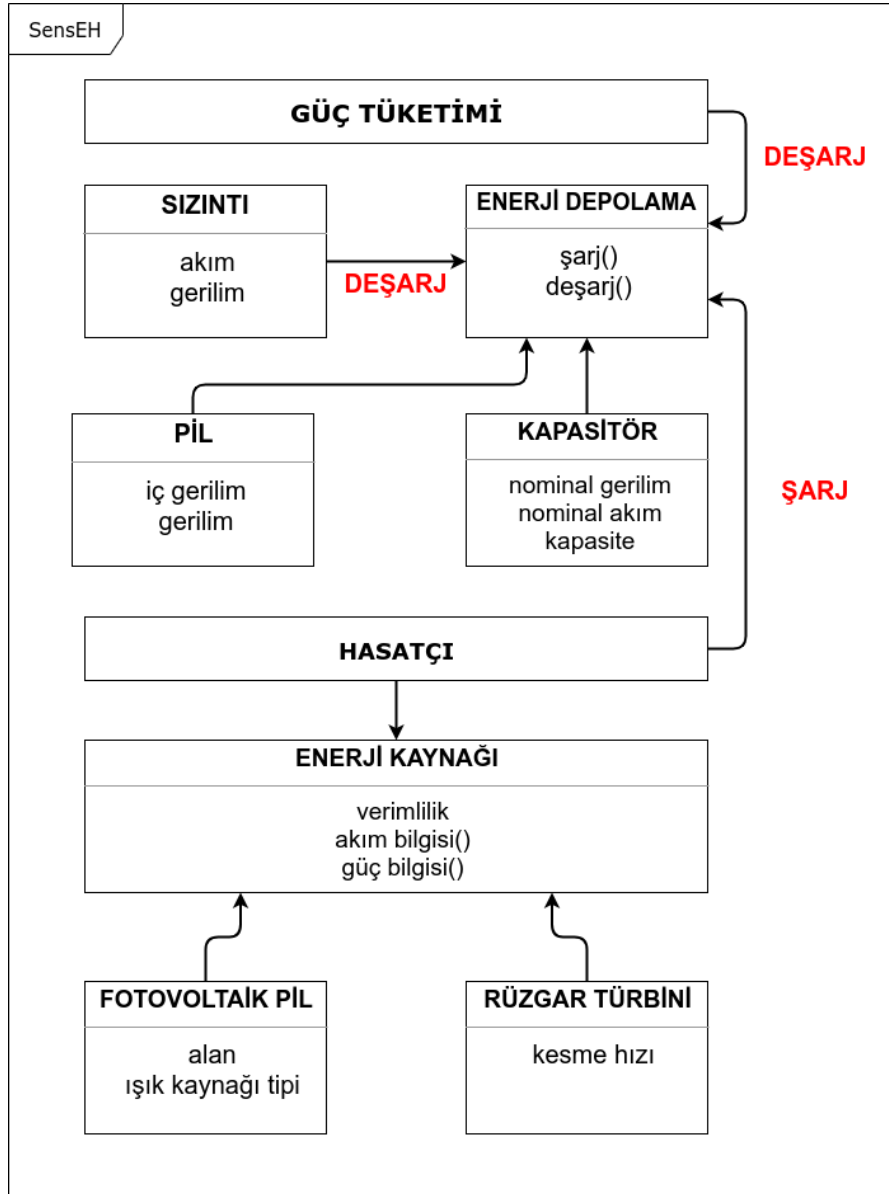
#### 2.4.4.2 SensEH Yazılım Mimarisi

SensEH yazılımı, farklı enerji kaynakları, depolama ve enerji hasadı için kolaylıkla genişletilebilir olarak tasarlanmıştır. Her bir uygulama zinciri, ilgili bileşenlerin aynı yüksek seviyeli içerik görünümüne sahiptir.

SensEH, enerji hasadı için Enerji Kaynağı (*Energy Source*) ve Hasatçı (*Harvester*) adında iki sınıfa sahiptir ve şu an için fotovoltaik piller için destek vermektedir. Güneş enerji paneli yapımcılarının teknik kılavuzları, az sayıda ışık seviyeleri için sadece çıkış güçlerini sağlamaktadır. Bu nedenle orta noktalardaki gücü tahmin etmek için parçalı doğrusal benzerlik uygulanmıştır. Enerji Kaynağı davranışı gerçek çevresel parametrelere bağlıdır. Bunlar, daha önceden kayıt edilmiş deneysel çevrimdışı ölçümlerden ya da çevrimiçi duyarga okumalarından gelen veriler ile ayarlanabilen Çevresel Veri Sağlayıcısı (*Environmental Data Provider*) paketi ile Enerji Kaynağı'nı beslemektedir. Enerji Kaynağı tarafından üretilen akım miktarına bağlı olarak, modellenmiş enerji hasadı verimliliği farklıdır. Hasatçı sınıfı, giriş gücünün doğrusal olmayan bir fonksiyonu olan deneysel verimlilik eğrisini dikkate alan hasatçının çıkış gücünü tahminlemektedir. Çıkış gücü daha sonra şarj metodu ile Enerji Depolama'yı (*Energy Storage*) beslemektedir.

Enerji Kaynağı durumundaki gibi Enerji Depolama, birçok farklı aygıtı desteklemektedir. Mevcut uygulamada şarj edilebilir piller için Batarya modeli geliştirilmiştir ancak temelde kapasitörler de buna eklenebilir. Enerji Depolama, şarj ve deşarj metodlarıyla etkilenen şarj durumu değişikliklerini saklamaktadır. Sızıntı (*Leakage*) sınıfı, enerji depolama aygıtının sızıntı akım karakteristiklerini içerirken, Güç Tüketimi sınıfı TDA aygıtının asıl işlemine bağlı olarak deşarj modelini içermektedir.

Güç Tüketimi (*Power Consumption*), her bir düğüm bileşeni tarafından farklı işlemlerde harcanan süreyi etkin bir şekilde ölçen sınıftır. Bu zaman aralıklarını ilgili işlem tarafından tüketilen güçle çarparak, zaman içinde düğümler tarafından tüketilen, dolayısıyla Enerji Depolama'dan deşarj edilen enerji miktarı tahmin edilmektedir. SensEH benzetim ortamının sınıf diyagramı Şekil 2.8 ile verilmiştir.



Şekil 2.8: SensEH sınıf diyagramı (Dall'Ora ve diğ. 2014).

SensEH içinde hafıza kipi kodu C programlama dilinde yazılmış olup doğrudan Contiki ile uyumu bulunmaktadır. Güç Tüketimi sınıfı Contiki içindeki Enerji modülünü kullanmaktadır. Girişlerin çevrimdışı olması durumunda kayıtlar seri port üzerinden beslenmektedir ancak eğer gerçek ölçülmüş veri elde edilebiliyorsa duyargaya doğrudan erişilerek alınmaktadır. Pin kipinde Enerji Depolama, Enerji Kaynağı ve Hasatçı, Java ile yazılmış Cooja eklentisi olarak sunulmaktadır. Bu nedenle bu eklentiler Cooja tarafından desteklenen her iki işletim sisteminin (Contiki ve TinyOS) öykülenmesinde kullanılabilir. SensEH, Cooja'nın güç ayırımını desteklememesi ve pil ile ilgili hesapların yapılmaması nedeniyle geliştirilmiş bir uygulamadır.

### 3. TELSİZ DUYARGA AĞLARINDA ÇİZGE KURAMI UYGULAMALARI VE ENERJİ HESABI

#### 3.1 Çizge Kuramı ve Uygulamaları

Duyargaların bir araya gelerek oluşturduğu ağ, düğümler ve aralarındaki iletişim hatları aynı zamanda bir çizge ile ifade edilebilir. Çizge kuramı, L. Euler tarafından 1736'da ortaya çıkmıştır (Biggs ve diğ. 1986). Bu kurama göre  $G(V, E)$  çizgesi,  $V$  (*vertex*) ile gösterilen düğüm ve bu düğümleri birbirine bağlayan  $E$  (*edge*) ile gösterilen iletim hattı kümesidir. Telsiz duyarga ağları oluşturulurken duyargaların dağıtık bir şekilde konumlandırıldığı belirli bir topolojiye ihtiyaç duyulmaktadır.

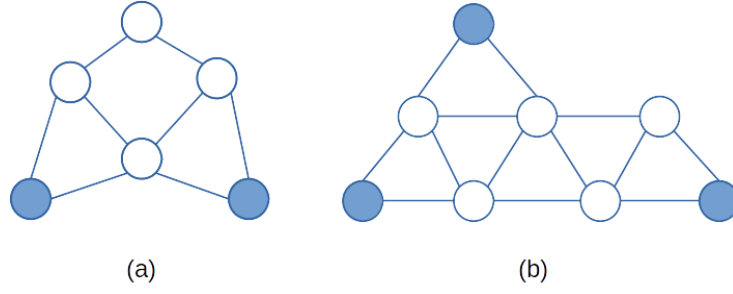
Duyargalar birbirleri ile haberleşerek ve ölçtükleri verileri birbirlerine göndererek ağın devamlılığını sağlarlar. Bu nedenle TDA'ların dağıtık yapısından dolayı iletişim omurgası kurulurken bağımsız küme, baskın küme (BK), bağlı baskın küme (BBK) gibi çizge kuramı için geliştirilmiş çözümler kullanılabilir (Shaikh ve Zeadally 2016). Tez kapsamında yapılan çalışmada da TDA'larda yaşam süresini artırmaya yönelik dağıtık bağlı baskın küme algoritması geliştirilmiştir.

##### 3.1.1 Düğüm Ağırlıklı Çizge

Çizge kuramına göre çizge içinde yer alan her düğüm birbiriyle eşdeğer kabul edilmeyebilir. Bu durumda düğümlerin her birine ağırlık değerleri atanmaktadır. Ağırlık değeri atanan düğüme ağırlıklı düğüm, ağırlıklı düğümlerin oluşturduğu çizgeye de düğüm ağırlıklı çizge adı verilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen algorithmada her bir çizgede yer alan her bir düğümün bir belirteç değeri (*ID*) bulunurken ağırlık değeri de bulunmaktadır. Bu değer duyarga düğümlerinin kalan enerjileri olarak atanmıştır.

### 3.1.2 Bağımsız Küme

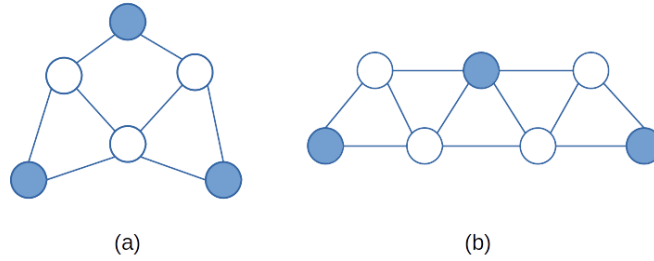
Çizge kuramına göre bağımsız küme,  $G(V, E)$  çizgesine ait düğümler kümesi  $V$ 'nin bir alt kümesi olmak üzere, bu alt kümeden seçilen herhangi iki düğümün arasında hiçbir kenar bulunmayan kümedir (Erciyes 2013). Şekil 3.1 ile örnek çizgeler üzerinde bağımsız kümeler gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Örnek çizgeler üzerinde bağımsız kümelerin gösterimi.

### 3.1.3 Baskın Küme

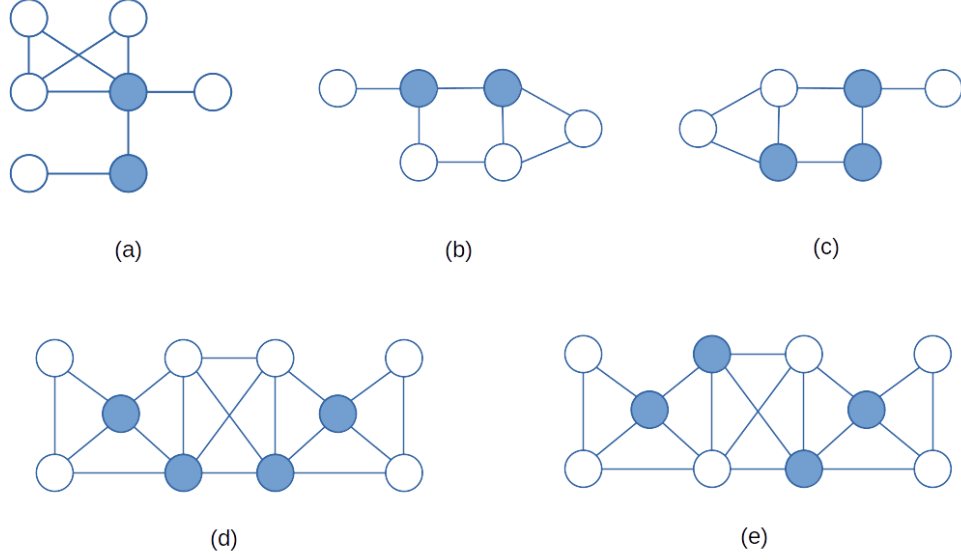
Çizge kuramına göre baskın küme (BK),  $G(V, E)$  çizgesinden seçilen düğümlerden oluşmaktadır öyle ki, çizgede yer alan herhangi bir düğüm ya kümede yer almaktadır ya da kümede yer alan düğümlerden en az birine komşu durumundadır (Erciyes 2013). Bu kümede yer alan düğümlere kapsayan düğüm (KSYN), küme dışında kalan düğümlere ise kapsanan düğüm (KSNN) adı verilmektedir. Şekil 3.2 ile örnek çizgeler üzerinde baskın kümeler gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Örnek çizgeler üzerinde baskın kümelerin gösterimi.

### 3.1.4 Bağlı Baskın Küme

Çizge kuramına göre baskın kümede yer alan kapsayan düğümler, bağlı bir alt çizge oluşturuyor ise bu küme bağlı baskın küme (BBK) olarak adlandırılır (Erciyes 2013).



Şekil 3.3: Örnek çizgeler üzerinde bağlı baskın kümelerin gösterimi.

Şekil 3.3'te birbirinden farklı BBK yapıları gösterilmiştir. Şekil 3.3 (a), 3.3 (b), 3.3 (d) ve 3.3 (e)'de en az düğüm kullanarak BBK yapıları oluşturulmuştur. Bu tür BBK yapısına en küçük bağlı baskın küme (MBBK) adı verilmektedir.  $G$  çizgesinde yer alan MBBK,  $G$  çizgesinde oluşturulabilecek tüm BBK yapıları arasından en az düğüm ile oluşturulan BBK yapısıdır. Şekil 3.3 (c)'de bu durum görülmemektedir.

### 3.1.5 Ağırlıklı Bağlı Baskın Küme

Çizge kuramına göre ağırlıklı bağlı baskın küme,  $W$  fonksiyonu düğümlerin ağırlığını belirten ağırlık parametresi olmak üzere, düğüm ağırlıklı  $G(V, E, W)$  çizgesinde yer alan bağlı baskın küme (ABBK) olarak tanımlanmaktadır. ABBK'da yer alan düğümlerin ağırlıklarının toplamının da en az olması hedeflenir. Bu nedenle oluşturulan BBK, en az ağırlıklı bağlı baskın küme (EABBK) olarak tanımlanır (Dagdeviren ve diğ. 2015, Djenouri ve Bagaa 2015).

### 3.2 Telsiz Duyurga Ağlarında Enerji Hesaplamaları

Telsiz duyurga ağlarını oluşturan düğümler, TDA içinde görevlerini yerine getirmek için enerjiye ihtiyaç duyarlar. Duyurga düğümleri ölçme, işleme ve iletim gibi işlemlerde enerji harcarlar. Bunun yanında, kablosuz bir ortamda duyurga boşta iken bile sürekli dinleme durumunda enerji harcanmaktadır (Babayo ve diğ. 2017).

Mica (Pham 2014), Telos (Prayati ve diğ. 2010) ve Iris (Dagdeviren ve diğ. 2019) gibi bilinen TDA düğümlerinin enerjileri klasik yaklaşımda piller kullanılarak sağlanmaktadır. Ancak pillerin karakteristik problemleri bulunmaktadır. İlk olarak piller kullanımda olmasa bile zamanla enerjisi azalmaktadır. Diğer yandan, çevresel etkiler ve hava koşullarından dolayı piller bozulmakta ve kimyasal sızıntılara neden olmaktadır (Tiliute 2007). Son olarak, pillerin yoğunluğu sınırlı olması nedeniyle düğümler işlevlerini uzun süreli aksatabilmekte hatta gerçekleştiremeyebilmektedirler (Penella ve diğ. 2009).

TDA uygulamaları farklı senaryolar içinde birkaç aydan birkaç yıla kadar ulaşan zaman aralıklarında yaşayabilecek şekilde kurulurlar. Genel olarak bazı düğümlerin işleyişinde hataların olması tüm ağın çalışmasını doğrudan etkilemez ancak bu düğümlerin devre dışı kalması ağın çalışma düzenini ciddi şekilde etkilemektedir (Shaikh ve Zeadally 2016). Ağ genelinde etkin bir şekilde çalışan düğümler devre dışı kaldıklarında ağın yapısı (topolojisi) değişmektedir. Bir TDA kurulurken ağın yaşam süresinin maksimum olması hedeflenir. Bu nedenle enerjisi biten düğümlerin devre dışı kalması ağın yaşam süresini azaltmaktadır.

Bu sorun için önerilen çözümlerden birisi ise pillerin insan gücü ya da robotlar ile yenilenmesidir (Tong ve diğ. 2011, Sheu ve diğ. 2005). Ancak bu çözüm, okyanuslar, sarp kayalıklar, madenler gibi zorlu çevresel şartlar altında ya da askeri bölgelerde (Talzi ve diğ. 2007) her zaman mümkün olmayabilmektedir. Bu nedenle ağın yaşam süresinin artırımı, ağa enerji hasadı yapabilen düğümlerin eklenmesi ile sağlanabilir.

TDA sistemleri çeşitli alanlarda büyük kolaylıklar sağlamasına rağmen bu sistemlerin kurulmasında ve işleyişinde bazı zorluklar bulunmaktadır. TDA'ları oluşturan düğümlerin enerji kaynakları pillerin kapasitesi ile kısıtlandığından,

sistemde çalıştırılan dağıtık algoritmanın ve iletişim altyapısının enerji etkin bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Sistemdeki düğümlerin enerjilerinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için literatürde görev döngüsü (*duty cycle*) olarak adlandırılan bir teknik uygulanmaktadır (Chen ve diğ. 2015). Bu uygulama ile düğümler sadece veri alma ve iletme durumlarında aktif olarak çalışmakta diğer durumlarda ise uyku modunda bulunarak düşük seviyede enerji harcaması gerçekleştirmektedirler. Ancak bunun gibi önlemler, TDA üzerinde işletilecek uygulamanın büyük miktarda enerji kullanımı gerçekleştirmesi durumunda çok etkili olmamaktadır. Dolayısıyla, TDA üzerinde kullanılacak dağıtık uygulamanın iletişiminden kaynaklanan enerji kullanımının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu kapsamda, düğümler tarafından kullanılacak iletişim omurgasının yapısı, düğümler üzerinde koşturulacak algoritmanın iletişim maliyetini büyük ölçüde etkileyeceğinden, bu yapının az enerji kaybı yaşatacak şekilde dağıtık olarak oluşturulabilmesi literatürdeki açık konulardan bir tanesidir. Bu iletişim altyapısı literatürde genellikle çizge teorisinde de bilinen bağlı baskın kümeler (BBK) ile oluşturulmaktadır (Mohanty ve diğ. 2016, Dagdeviren ve diğ. 2015). Bunun dışında, BBK iletişim yapılarının üzerine görev döngüsü uygulamalarının da kullanıldığı karma bir yaklaşım da literatürde bulunmaktadır (Shi ve diğ. 2019).

Bir çizgenin ( $G = (V, E)$ ) bağlı baskın kümesi,  $G$  çizgesine bağlı bir alt çizgesini oluşturan bağlı baskın kümedir. Diğer bir deyişle, eğer bir baskın kümede tüm düğümler birbirleri ile bağlı ise, kümede herhangi bir düğüm çifti arasında bağlı baskın küme adında bir bağlantı bulunur. BBK'lar bir ağın sanal omurgası olarak da düşünülebilir. Bir TDA'da, uzaktan veri toplama uygulamalarında BBK'lar öncelikle, ağ iletişimini en iyi hale getirmek için veri birleştirme omurgası olarak kullanılmaktadır, bu da enerji tüketimini azaltırken aynı zamanda ağ yaşam süresini de artırmaktadır (Mohanty ve diğ. 2016).

BBK'ların olmadığı bir TDA'da sel (*flooding*) yöntemi ana iletişim yöntemi olarak seçilebilir (Lisiecki ve diğ. 2019). Ancak bu yöntemde her bir düğüm, aynı mesajı almış olsa bile komşularına yayın yapmaya devam etmektedir. Ayrıca bu yöntemde oldukça fazla paket çakışması ve kayıpları yaşanmaktadır. BBK yapısının kullanılması ile sel yönetiminin getirmiş olduğu bu sorunlar da çözülmüştür çünkü



ağın topolojisi değişse bile BBK ile yönlendirme işlemi oldukça kolay yapılmaktadır (Li ve diğ. 2012).

TDA'lar içerisindeki düğümlerin birbirleri ile haberleşme yöntemi, mesaj alan bir düğümün bu mesajı tüm komşularına ilettiği sel tipi model ile ya da TDA'daki düğümlerin bazılarının bir iletişim yapısının içerisinde görev alması ile gerçekleştirilmektedir. Bahsedilen iletişim yapıları literatürde BBK'lar ile sağlanmaktadır. Literatürde iletişim omurgası olarak BBK'ların kullanılması ilk olarak Ephremides ve diğ. (1987) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen çalışmadan sonra literatürde, telsiz duyurga ağlarında bahsedilen iletişim omurgasını oluşturan BBK'ların elde edilmesi amacıyla çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yaklaşımlardan bir tanesi, TDA üzerinde önce dağıtık bir şekilde azami (maksimal) bağımsız küme (MBK) bulup ardından seçilen düğümleri bağlı hale getirmek şeklindedir. Literatürdeki temel yaklaşımlardan bir diğeri ise ilk aşamada ağda dağıtık bir şekilde BK bulmakta ardından tek bir ağaç oluşturana kadar bu kapsayan düğümleri diğeri düğümleri de kullanarak bağlama işini gerçekleştirmektedir.

TDA'lar için sanal omurga oluşturmak amacıyla kurulacak BBK'ların boyutu da önemli bir noktadır. BBK boyutu çok büyük olursa, ağ üzerinde yönlendirme sorunları artarken, ağın kontrol edilmesi zorlaşacaktır. BBK içinde yer alacak düğümlerin az olması, dağıtım gecikmeleri, enerji harcaması ve karışıklığın daha az olması anlamına gelmektedir (Ding ve diğ. 2010). En az düğüm ile oluşacak minimal BBK'ya Minimum Bağlı Baskın Küme (MBBK) adı verilmektedir (Lisiecki ve diğ. 2019). Bir ağda MBBK oluşturmak da NP-zor bir problemdir (Schmid ve Wattenhofer 2006). Literatürde TDA'lar için MBBK tabanlı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar, TDA'larda iletişim karışıklığı, sıralı çalışma, enerji tüketimi gibi sorunlar için çözüm sağlamıştır (Asgarnezhad ve Torkestani 2011).

Her ne kadar tek bir sanal omurga tüm ağın enerji tüketimini azaltmaya yetse bile ağın yaşam süresini uzatmaya tek başına yeterli değildir. BBK içindeki KSYN düğümlerde fazladan hesaplama ve iletişim yükü bulunmaktadır. Bu durum düğümlerin enerjilerinin daha erken bitmesine neden olmaktadır. Ağın yaşam süresini uzatmak için birden fazla sanal omurganın oluşturulup geçişlerin yapılması gerekmektedir (Zhao ve diğ. 2010). BBK'ların ayrı kümeleri üzerinden aktif BBK'dan yeni bir BBK'ya geçişi seçen basit bir mekanizma bu sorun için çözüm

yöntemidir. Çizge kuramında bu yönteme Bağlı Baskınlık Bölümü (*Connected Domatic Partition*) problemi adı verilmektedir (Misra ve Mandal 2009).

Literatürde daha farklı yaklaşımlar kullanarak oluşturulan BBK çalışmaları da mevcuttur. Wu ve Li (2001) yaptıkları çalışmada, kök düğümün lider bir düğüm olduğu örten ağaçlar (*spanning tree*) kullanarak BBK oluşturan iki-fazlı dağıtık bir algoritma geliştirmiştir. Başka bir çalışmada ise, Dai ve Wu (2004) BBK oluşturulması için budama tabanlı sezgisel bir yaklaşım sunmuştur. Ding ve diğ. (2011) gerçekleştirdikleri çalışmada,  $\alpha$ -en az yönlendirme maliyetli BBK ( $\alpha$ -MYM-BBK) isimli özel amaçlı bir BBK algoritması tanımlamıştır. Bu çalışmada, her bir düğüm çifti arasında, bahsedilen algoritma sonucunda oluşturulan BBK içerisinde bulunan ve maliyeti bu düğümler arasındaki en kısa yolun maliyetinin en fazla  $\alpha$  katı kadar olan bir yol olduğunu ortaya konulmaktadır. Ding ve diğ. (2011)'nin ilgili çalışmasındaki en önemli amaç, her düğüm çifti arasındaki iletişim maliyetini en aza indirgeyebilmektir.

Haytaoğlu ve diğ. (2020) ise, enerji hasadı yapabilen düğümlerin bulunduğu TDA'larda ağın yaşam süresini artırmaya yönelik tekrar edilebilir dağıtık bağlı baskın küme (TBBK) algoritması geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, ağın alt ağlara bölünerek ağ üzerinde hiçbir BBK oluşturulamayınca kadar geçen sürenin ağın yaşam süresi olduğu kabul edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre geliştirdikleri TBBK algoritması, TDA'larda en uygun BBK'ları tespit ederek ağın yaşam süresini artırmıştır.

TDA'larda yaşam süresi ve enerji konusu çözülmesi gereken önemli bir problemdir. Bu nedenle ağın yaşam süresini artırıcı çok farklı senaryolar ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşımlardan çevresel kaynaklardan enerji hasadı yapabilen düğümlerin ağa dâhil edilmesi, bu düğümlerin TDA içinde uygun olarak konumlandırılması ve buna bağlı olarak da BBK algoritmalarının geliştirilmesi ağın yaşam süresini uzatıcı bir öneri olarak düşünülebilir.

TDA'lar için birçok enerji etkin yöntem geliştirilmiştir. Enerji, duyurga düğümleri tarafından ölçme, işleme ve veri iletimi gibi pek çok işlevi (Abdul-Salaam ve diğ. 2016, Anisi ve Abdullah 2015) yerine getirmek için harcanır. Enerji kaynaklarına kısıtlı erişim nedeniyle etkin enerji tüketimi, daha iyi bir performans

için en yüksek öneme sahiptir. TDA'ların en temel sorunu ile baş edebilmek adına, çevreden enerji hasadı yapacak tekniklerin TDA aygıtlarının sürekli çalışmasını sağlamak için geliştirilmesi gerekmektedir.

TDA'ların benzetimi yapılırken, kullanılacak benzetim uygulamalarının da enerji ile ilgili desteğinin olup olmaması önemli bir durumdur. Bu çalışma için daha önce seçilen benzetim uygulaması Cooja'nın enerji hesaplamalarına yönelik desteği bulunmaktadır. Buna rağmen Cooja'nın enerji hasadı ile ilgili desteği bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra, Cooja benzetim uygulamasından geliştirilen ve gerek enerji hesaplamalarını gerek de enerji hasadı hesaplamalarını destekleyen SensEH benzetim uygulaması geliştirilmiştir. Bu nedenle çalışmanın enerji hasadı ve enerji tüketimi ile ilgili kısımlarında SensEH'in enerji sınıflarından yararlanılmıştır.

### **3.2.1 Telsiz Duyargalardaki Enerji Tüketimi**

Telsiz duyurga ağlarında enerji oldukça önemli bir konudur. Enerjinin etkin kullanımını sağlayacak algoritmaların geliştirilmesi dolaylı olarak ağın yaşam süresini de etkilemektedir.

Telsiz duyurga düğümleri temel olarak; alma (*receive*), iletme (*transmission*), boşta dinleme (*idle listening*) ve uyuma (*sleeping*) gibi dört farklı modda bulunabilir (Nguyen ve diğ. 2017). Düğümlerin enerji tüketimi ise genel olarak üç ana kategoriye ayrılabilir. Duyargalar, radyo sinyallerinin iletimi gibi haberleşme işlemlerinde, mikro kontrolörlerde yapılan hesaplama işlemlerinde ve ölçme işlemlerinde enerji harcamaktadırlar (Yuan ve diğ. 2017). Tipik bir duyurgada haberleşme işlemleri, hesaplama ve ölçme işlemlerine göre daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır.

Nguyen ve diğ. (2017)'nin yaptıkları çalışmaya göre bir düğüm veri iletme istediğinde öncelikle, çerçeve yuvalarını (*frame slots*) eşlemek için veri alma periyodunun sınırlarını hesaplar ve rastgele bir süre bekler. Daha sonra gönderen, iletim başlamadan önce geri gönderim yuvaları için boş kanal atama (CCA) işlemi ile kanal aktivitesini kontrol eder. Daha sonra gönderici radyo sinyalini yayınlar ve

belirsiz durumuna geçer. Bir devrede harcanan enerji en genel ifadeyle (3.1) denklemiyle verilmiştir.

$$E = \text{Güç} \times \text{Zaman} = \text{Gerilim} \times \text{Akım} \times \text{Zaman} = V \times I \times t \quad (3.1)$$

Ancak duyarga düğümlerinde harcanan enerji, duyarganın devre elemanları üzerinde harcanan enerji ile duyarganın her bir işleminde harcadığı enerjilerin toplamıdır. Bu durumda bir duyarga düğümünün harcadığı enerji (3.2) denklemine (Nguyen ve diğ. 2017) gösterilmektedir.

$$E = E_{dinleme} + E_{iletme} + E_{alma} + E_{uyku} + E_{devre} \quad (3.2)$$

(3.2) denklemine göre  $E_{dinleme}$  bir düğümün dinleme periyodunda harcadığı enerjidir.  $E_{iletme}$  veri paketini göndermek ve kontrol etmek için harcanan enerjidir.  $E_{alma}$  gönderilmiş veri paketinin başarılı bir şekilde alınmasını sağlayan enerji tüketimini göstermektedir.  $E_{uyku}$  bir düğümün uyku halinde harcadığı enerji miktarıdır.  $E_{devre}$  ise bir duyarga düğümünün elektronik devresini harekete geçirmek için gerekli enerji miktarını göstermektedir. Tipik bir düğümün doğrusal enerji tüketimi, (3.2) ile verilen denklemin (3.1) denklemi ile verilen en genel halinden yola çıkılarak genişletilen (3.3) denklemi ile hesaplanmaktadır (Dunkels ve diğ. 2007).

$$E = \left( I_m \times t_m + I_l \times t_l + I_t \times t_t + I_r \times t_r + \sum_{i=1}^n I_{devre_i} \times t_{devre_i} \right) \times V \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'e göre toplam enerji tüketimi  $E$  olmak üzere,  $I_m$  aktif mikroişlemcinin çektiği akımı,  $t_m$  mikroişlemcinin aktif olduğu süreyi,  $I_l$  mikroişlemcinin düşük güç modundaki akımı,  $t_l$  mikroişlemcinin düşük güç modunda geçirdiği süreyi,  $I_t$  düğümün iletim halindeki akımı,  $t_t$  iletim zamanını,  $I_r$  düğümün alma modundaki akımı,  $t_r$  alma zamanını,  $I_{devre}$  devrede bulunan diğer bileşenler (LED, ADC, DAC) tarafından harcanan akımı,  $t_{devre}$  devrede yer alan diğer bileşenlerin harcadığı zamanı ve  $V$  de kaynak gerilimini göstermektedir (Dragana ve diğ. 2015).

Mainwaring ve diğ. (2002) yaptıkları alan izleme uygulamasında Mica (Hill ve Culler 2002) duyargasını kullanmışlardır. Mica duyargası tipik olarak 2.5 Ah

kapasiteli bir çift AA pil ile çalışan bir duyargadır. Çalışmada pillerin 3V altında 2200 mAh güç temin ettiği varsayılmıştır. Geliştirdikleri uygulamada ise duyargaların günlük ortalama 8.148 mAh güce ihtiyaç duyduğu saptanmıştır. Uygulama ise bu enerji miktarını, uyku modu, ölçme modu, hesaplama ve iletişim modları arasında nasıl dağıtacağını saptamaktadır. Çalışmada tüm bu modlar ele alındığında, Tablo 3.1 ile gösterilen bir Mica düğümünün enerji tüketimine ait verileri elde etmişlerdir.

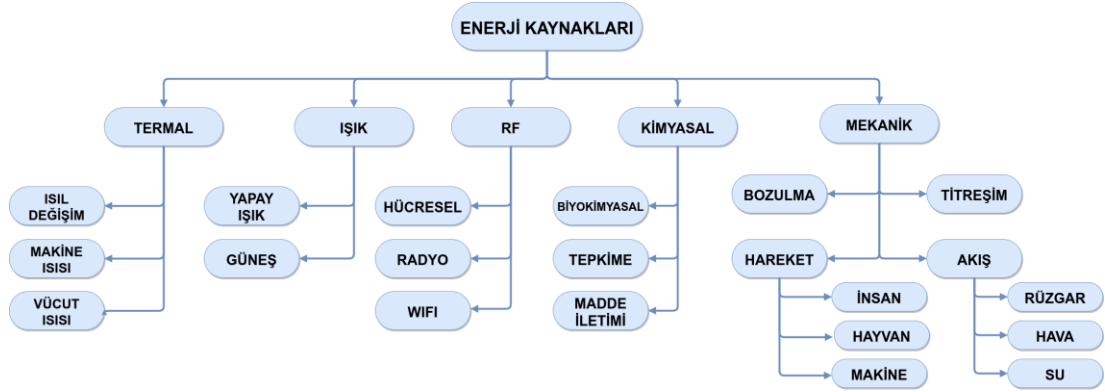
**Tablo 3.1:** Mica düğümünün enerji tüketimi (Mainwaring ve diğ. 2002).

İşlem	Tüketim (mAh)
Bir paketin iletimi	20.000
Bir paketin alımı	8.000
1 mS boyunca radyo dinlemesi	1.250
Bir örnek ( <i>sample</i> ) için düğümün çalıştırılması (analog)	1.080
Bir örnek ( <i>sample</i> ) için düğümün çalıştırılması (dijital)	0.347
ADC'den bir örneğin okunması	0.011
Flash üzerinden veri okuma	1.111
Flash üzerine veri yazma / flash üzerinden veri silme	83.333

### 3.2.2 Telsiz Duyarga Ağlarında Enerji Hasadı ve Teknikleri

Duyargaların sınırlı seviyede güce sahip olması nedeniyle başlıca sorunlarından bir tanesi de enerjinin etkin kullanılmasıdır. Ağ yaşam süresi ve enerji TDA'lar için oldukça önemli konulardır. Ağın yaşam süresinin artırılması, ağın üstlendiği görevi uzun süre boyunca yerine getirmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca bir TDA'dan enerjisinin kendi kendine yetebilmesi, uzun ömürlü olması ve neredeyse hiç bakımının olmaması beklenir (Shaikh ve Zeadally 2016). Duyargaların gücünün tükenerek devre dışı kalması, ağın yaşam süresini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle ağın yaşam süresini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. TDA'larda yer alan düğümlerin enerji tüketimine karşılık bazı düğümler kendi enerjilerini dış kaynaklardan temin ediyor olabilir. Bunlar çevresel kaynaklardan enerji edinebilen düğümlerdir ve bu kavrama da enerji hasadı adı verilmektedir (Adu-Manu ve diğ. 2018).

TDA’larda ağın yaşam s¼resi, şarj olabilen d¼g¼mlerin ağa d¼hil edilmesiyle artırılabilir. şarj olabilen d¼g¼mler çevresel kaynaklardan enerji elde edebilen ve depolayabilen d¼g¼mlerdir. şekil 3.4’te g¼sterilen bu kaynaklar, RF sinyalleri, termal kaynaklar, g¼neř enerjisi gibi işık kaynakları, kimyasal kaynaklar ile titreşim, akış ve hareket içeren mekanik kaynaklardan oluşmaktadır (Zeadally ve diğ. 2020).



şekil 3.4: TDA’larda enerji hasadı y¼ntemleri (Zeadally ve diğ. 2020).

G¼n¼m¼zde, şekil 3.4’te g¼sterilen birçok farklı enerji hasadı tekniği bulunmaktadır. Ancak Tablo 3.2’de g¼sterildiđi ¼zere, fotovoltaik d¼n¼ř¼m tekniği ¼zerinden g¼neř enerjisi hasadı en y¼ksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır (Bhuvaneswari ve diğ. 2009). Bu nedenle TDA’lar için g¼neř enerjisi hasadı yapabilecek Prometheus (Jiang ve diğ. 2005), Everlast (Simjee ve Chou 2006) ve Ambimax (Park ve Chou 2006) gibi sistemler geliştirilmiştir (Yang ve Zhang 2012).

Tablo 3.2: Enerji hasadı teknolojileri enerji yoğunlukları (Bhuvaneswari ve diğ. 2009).

Y¼NTEM	ENERJİ YOĞUNLUĞU
G¼neř Enerjisi	15 mW/cm <sup>3</sup>
Piezoelektrik	330 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>
Titreşim	116 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>
Termoelektrik	40 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>
Akustik G¼r¼lt¼	960 $\mu$ W/cm <sup>3</sup>

Termal ve titreşim kaynakları iç mekânlar için uygun değildir. RF sinyallerinden enerji hasadı hem iç mekânlar hem de dış mekânlar için uygundur ancak verimliliği d¼ř¼kt¼r. R¼zđar g¼c¼ maliyetsiz bir kaynak olsa bile TDA’lar için gereken r¼zđar t¼rbinleri ağır ve hantal kalmaktadır. Bu nedenle g¼neř enerjisi

teknolojileri duyurga düğümleri için yüksek verimlilikte enerji sağlamaktadır (Babayo ve diğ. 2017).

Enerji hasadı iki farklı kategoriye ayrılabilir. Bunlardan ilki düğümleri beslemek için çevresel enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmasıdır. Diğer yöntem ise, dönüştürülen enerjinin depolanarak ihtiyaç halinde kullanılmasıdır.

Enerji hasadı kuramına göre, Tablo 3.3'te gösterilen enerji kaynakları dört ana gruba ayrılabilir (Kansal ve diğ. 2007):

- a) Kontrol edilemeyen ancak öngörülebilir kaynaklar: Enerji kaynağı kontrol edilemez ancak bilinen zamanlarda öngörülebilir bir modele sahip kaynaklardır. Güneş enerjisi, TDA'larda en çok kullanılan bu türdeki çevresel enerji kaynağıdır.
- b) Kontrol edilemeyen ve öngörülemez kaynaklar: Enerji kaynağı kontrol edilemez ve enerjinin ediniminin kestirimi kolay olmayan oldukça karışık kaynaklardır.
- c) Tamamen kontrol edilebilen kaynaklar: İstenildiği zaman enerjinin edinimi kolay olan kaynaklardır.
- d) Kısmen kontrol edilebilen kaynaklar: Enerji üretimi bir sistem ya da kullanıcı tarafından sağlanır ancak sonuç tam deterministik değildir.

**Tablo 3.3:** Bazı enerji kaynaklarının karakteristikleri (Shaikh ve Zeadally 2016).

<b>Enerji Kaynağı</b>	<b>Öngörülebilir</b>	<b>Öngörülemez</b>	<b>Kontrol Edilebilir</b>	<b>Kontrol Edilemez</b>
RF	✓		✓	
Güneş	✓			✓
Termal		✓	✓	
Rüzgâr	✓			✓
Su	✓			✓
Titreşim		✓	✓	
Basınç		✓	✓	
Hareket		✓	✓	

Literatürde, TDA'larda enerji sorununun önüne geçmek ve ağ yaşam süresini uzatmak için farklı enerji hasadı yöntemleri kullanan birçok uygulama geliştirilmiştir (Adu-Manu ve diğ. 2018).

Mekikis ve diğ. (2016), TDA'ların iletişim performansını artırmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada çevresel RF sinyallerini kullanarak TDA'ların yaşam süresini önemli ölçüde uzatmışlardır. Buna rağmen gerçekte, kaynak ve alıcı arasındaki iletişim kopukluğuna ve RF'den DC'ye dönüşüm sırasında kayıplara bağlı olarak enerji hasadı yeterince enerjiyi sağlayamadığı görülmüştür. Yine de adanmış güç iletilicileri (*dedicated power transmitters*) ya da güç yol göstericileri (*power beacons*) kullanılarak bahsi geçen problemin çözümü mümkün olduğu belirtilmiş olup yeterli enerji ile pilsiz kablosuz cihazları çalıştırmaktadır (Yang ve Chin 2015). Bu tekniğin kullanılması ile düğümler, zamanın belirli bir periyodunda enerji hasadı yapmakta ve bu enerjiyi de iletişim için kullanmaktadırlar. Bu yol ile çok geniş çaplı ağlar, ağ yaşam sürelerini oldukça artırmaktadır ve bakım maliyetini düşürmektedirler.

Zorbas ve diğ. (2016), TDA'ların RF sinyallerinden enerji hasadı yapabileceği bir model geliştirmişlerdir. Buna göre teorik ve benzetim sonuçları göstermiştir ki RF enerji hasadı yapan düğümlere sahip bir ağ, bu düğümlere sahip olmayan ağlara göre 2/3 oranında enerji kazanımı sağlamaktadır.

Mao ve diğ. (2012), enerji hasadı yapabilen TDA'larda yer alan hasatçı düğümlerdeki, ölçme ve iletimde enerji paylaşırma algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritma ile hasatçı duyurga düğümü, zaman kısıtına sahip enerji hasadı oranına, enerjinin zor erişimine ve kanal bozulmalarına rağmen toplam verimin azami olmasını hedefler.

Liu ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen EcoSense adlı duyurga mimarisi, ihtiyaç olduğunda devreye giren ölçme mekanizması ile duyorganın uyku ve dinleme modunda çalışırken harcadığı enerjiyi en aza indirmektedir. Bunun yanı sıra istenilen şartlar uygun olmadığında tamamen devreden çıkan sistem, istenilen şartların uygun olması durumunda devreye girerek güneşten ya da RF kaynağından enerji hasadı yapmaktadır. Yaptıkları deneyler sonucunda duyurga düğümlerinin güneş enerjisi hasadı için daha esnek olduğunu belirtmişlerdir.



## 4. ALGORİTMALAR

Bu çalışmada enerji hasadı yapabilen düğümler ile enerji hasadı yapamayan sıradan düğümlerin birlikte kullanıldığı ve TDA'larda ağın yaşam süresini artırmaya yönelik yeni bir dağıtık BBK algoritması geliştirilmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen dağıtık BBK algoritması, Güneş Enerjisi Hasadı Yapan Düğümlerin Bulunduğu Akıllı Çevresel Uygulamalar için Geliştirilmiş TDA'larda Yaşam Süresini Artıran Dağıtık Bağlı Baskın Küme Algoritması (GEHABBK) olarak adlandırılmıştır. Bu tezde geliştirilen GEHABBK algoritması, Shi ve diğ. (2017)'nin yaptıkları dağıtık LMW (*Locally Maximum Weight*) algoritmasından yola çıkılarak geliştirilmiş bir algoritmadır. Geliştirilen algoritma, güneş enerjisi hasadı yapabilen akıllı çevresel uygulamalarda ağın yaşam süresini, literatürde sel yöntemi olarak adlandırılan geleneksel iletişim tekniğine ve Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin yaptıkları enerji etkin dağıtık BBK algoritmasına göre oldukça artırmıştır. Bu nedenle GEHABBK algoritması, akıllı çiftlikler, akıllı tarım uygulamaları, hayvan takip sistemleri, ekin takip sistemleri gibi akıllı çevresel uygulamalarda, kritik verilerin ölçülmesi, iletilmesi ve değerlendirilmesi gibi süreçlerin sürekliliğini ağın yaşam süresini artırarak sağlamaktadır. GEHABBK algoritması, Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin yaptıkları enerji etkin dağıtık BBK algoritması ve geleneksel sel (*flooding*) yöntemi SenseEH benzetim ortamında geliştirilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, GEHABBK algoritmasında yer alan düğümlerin ağırlıkları iyileştirilerek İyileştirilmiş GEHABBK algoritması da geliştirilmiştir.

### 4.1 Dağıtık LMW Algoritması

Shi ve diğ. (2017), ilk defa enerji hasadı yapabilen düğümleri de içeren TDA'larda tekrar edilebilir BBK oluşturarak ağın yaşam süresini artırmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, BBK'lardan oluşan bir sanal omurga ile birkaç şarj edilebilir enerji hasadı yapabilen düğümden oluşan bir ağ kullanmışlardır. Geliştirdikleri dağıtık LMW algoritmasının ana amacı, ağın yaşam süresini

olabildiğince uzatacak sanal omurganın inşa edilme biçimidir. Bunun yanı sıra birçok TDA uygulamasında düğümlerin enerjilerinin bitmesi, ağın yaşam süresinin bitmesi olarak değerlendirilmektedir. Ancak yaptıkları çalışmada düğümlerin enerji üretiminin ve tüketiminin modellenmesi için basite indirgenmiş denklemler kullanılmış olup, algoritma değerlendirilirken enerji hasadı ve harcama miktarının ölçülmesi için gerçeğe yakın benzetim ortamları kullanılmamıştır.

Shi ve diğ. (2017), Şekil 4.1 ile sözde kodu verilen dağıtık LMW algoritmasını geliştirmişlerdir. Buna göre dağıtık LMW algoritması üç fazdan oluşmaktadır:

- i) **Faz 1:**  $t_c$  anlık zamanı için her bir düğümün enerjisine bağlı olarak  $G$  çizgesi ağırlıklı çizgeye dönüştürülür ve dağıtık durumdaki ağırlıklı çizgede maksimal bağımsız küme (MBK) hesaplanır.
- ii) **Faz 2:** Maksimal bağımsız kümedeki düğümler, bu kümede olmayan düğümler ile birbirine bağlanır.
- iii) **Faz 3:**  $t_c + 1$  zamanında ağırlıklar güncellenir ve mevcut ağda hiçbir BBK kalmayınca kadar bu adımlar tekrarlanır.

Bu algoritma ile 1. faz sonunda oluşan MBK'yı oluşturan kapsayan düğümler, 2. faz ile birbirlerine bağlanarak bir BBK oluşturulmaktadır. İkinci fazda kapsayan düğümlerin seçimi derin-öncelikli arama (*depth-first search*) yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Dağıtık LMW algoritmasına göre her bir düğüm iki farklı listeye sahip olmalıdır. Bunlar;

- a) **Komşuluk Listesi:**  $NeiList_{it}$  ile gösterilir. Her bir  $i$  düğümü ve  $t$  zaman aralığı için; komşuluk listesi  $i$ 'nin  $t$  zamandaki komşularının düğüm belirteç değerlerini ve BBK içinde olup olmadığını saklar. Yani her bir  $i$  düğümüne komşu  $j$  düğümü için  $NeiList_{it}[j].ID = j$  ve eğer  $j$  mevcut BBK'da yer alıyorsa  $NeiList_{it}[j].ifDom = 1$  olurken BBK'da yer almıyorsa  $NeiList_{it}[j].ifDom = 0$  olmaktadır.
- b) **Kapsayan Komşu Düğümler Listesi :**  $DList_{it}$  ile gösterilir. Her bir  $i$  düğümü ve  $t$  zaman aralığı için; kapsayan komşu düğümler listesi,  $j$  düğümü  $i$  düğümünün komşusu iken  $NeiList_{it}[j].ifDom = 1$  olmasını sağlar.

---

**Algoritma:** Dağıtık LMW Algoritması

---

```
1: Tanımlar: düğüm  $i$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\omega_i(0)$ , anlık zaman  $t_c$ 
2: Bilinenler:  $NeiList_{it_c}$ ,  $DList_{it_c}$ 
3:  $\omega_i$ 'yi belirle
4: if  $t_c = 0$  then
5:    $\omega_i$ 'yi yayımla ve ağırlık mesajlarını al
6:    $NeiList_{it_c}[i].ifDom = -1, DList_{it_c} = \emptyset$ 
7:   else if  $i$  komşuları arasından en büyük ağırlığa sahipse then
8:      $NeiList_{it_c}[i].ifDom = 1, DList_{it_c} = \emptyset$ 
9:   else if  $NeiList_{it_c}[j].ifDom = 1 \ \& \ j \in Ne(i)$  then
10:     $NeiList_{it_c}[j].ifDom = 1, NeiList_{it_c}[j].ifDom = 0$ 
11:     $DList_{it_c} = DList_{it_c} \cup \{j\}$ 
12:   else if  $\forall j \in Ne(i), \omega_j > \omega_i, NeiList_{jt_c}[j].ifDom = 0$  then
13:      $NeiList_{it_c}[i].ifDom = 1, DList_{it_c} = \emptyset$ 
14:   else if  $NeiList_{it_c}[i].ifDom = 0$  then
15:      $DList_{it_c}$ 'yi komşularına yayımla
16:   else if  $NeiList_{it_c}[i].ifDom = 1$  then
17:      $\Phi = \{r \mid r \in Ne(j) \wedge \{j\} \neq DList_{rt_c}\}$ 
18:   else if  $\Phi \neq \emptyset$  then
19:      $j \in Ne(i)$ 'yi Cardei ve diğ. (2002)'nin DÖA yöntemine göre seç
20:      $NeiList_{jt_c}[j].ifDom = 1$ 
21:   else if  $\Phi = \emptyset$  then
22:     if  $r \in Ne(i) \ \& \ \{v \mid v \in Ne(r) \wedge DList_{vt_c} \neq \{i\}\} \neq \emptyset$  then
23:        $NeiList_{rt_c}[r].ifDom = 1$  yap,
24:        $j \in Ne(i)$ 'yi Cardei ve diğ. (2002)'nin DÖA yöntemine göre seç
25:        $NeiList_{jt_c}[j].ifDom = 1$  yap
26:     end if
27:   end if
28: her yeni işaretlenmiş düğüm kendi bilgisini yayımlar
29:  $\omega_i$ 'yi güncelle
30: return  $NeiList_{it_c}, DList_{it_c}$ 
```

---

Şekil 4.1: Dağıtık LMW algoritması (Shi ve diğ. 2017).

TDA içinde düğümler birbirlerine yayın (*broadcast*) mesajı göndermektedirler. Böylece her bir düğüm kendi komşusunu tanımaktadır. Bu mesajı alan tüm düğümler komşuluk listesini güncelleyerek ağırlık genel komşuluk listesi çıkarılmaktadır. Her bir düğüme ait bir belirteç (*ID*) ve ağırlık (*weight*) değeri vardır. Ağırlık değerleri düğümlerin KSYN ya da KSNN olmaları için belirleyici özelliştir. Özetle ağırlık oluşturulması, düğümlerin birbirleri ile haberleşmesi (mesaj göndermesi ve alması), düğümlerin KSYN ya da KSNN düğümleri seçmeleri ve ağ üzerinde

bağımsız küme oluşturulması ile dağıtık LMW algoritmasının birinci fazı tamamlanmıştır.

Dağıtık LMW algoritmasının birinci fazında oluşan BK bağlı olmayabilir ya da  $G$  çizgesindeki BBK'lar için daha fazla düğümün işaretlenmesi gerekebilir. Bu nedenle ilk fazda işaretlenmeyen ve  $i \in \{u \mid NeiList_{ut_c}[u].ifDom = 0\}$  ile gösterilen her bir  $i$  düğümü, komşu düğümlerine Kapsayan Komşu Düğümler Listesi'ni ( $DList_{it_c}$ ) yayımlar.

İkinci olarak her bir  $j \in \{u \mid NeiList_{ut_c}[u].ifDom = 1\}$  için komşularından mesaj alır ve gelen mesaja göre  $\Phi = \{r \mid r \in Ne(j) \wedge \{j\} \neq DList_{rt_c}\}$ 'yi hesaplar. Bu durumda  $\Phi$ 'nin iki durumu söz konusudur:

- a) Eğer  $\Phi \neq \emptyset$  ise  $j$  düğümünün komşusu olan ve diğer işaretli düğümlerin kapsayacağı en az bir  $r$  düğümü vardır.  $j$  düğümü, Cardei ve diğ. (2002)'nin geliştirdiği derin öncelikli arama (DÖA) yöntemini kullanarak  $\Phi$  içinden bir düğüm seçer ve düğümün durumunu işaretlenecek olarak değiştirir.
- b) Eğer  $\Phi = \emptyset$  ise bu durumda iki düğümün durumlarını değiştirmesi gerekmektedir.  $\{v \mid v \in Ne(r) \wedge DList_{vt_c} \neq \{j\}\} \neq \emptyset$  olan  $r \in Ne(j)$  düğümü işaretlenecek ilk düğüm olarak seçilir ve ikinci düğüm de yine Cardei ve diğ. (2002)'nin geliştirdiği DÖA yöntemine göre seçilir.

Son olarak her bir yeni işaretlenmiş düğüm, belirtecini ve işaretlenme bilgisini komşularına yayımlar. Bu algoritma ile ilk faz sonunda oluşan maksimum bağımsız kümeyi (MBK) oluşturan kapsayan düğümler, ikinci faz ile birbirlerine bağlanarak bir BBK oluşturulmaktadır. İkinci fazda kapsayan düğümlerin seçimi DÖA yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

Cardei ve diğ. (2002)'nin geliştirdiği DÖA yöntemi ise iki fazdan oluşmaktadır. Buna göre ilk fazda herhangi bir  $s$  düğümü seçilir, kendisini siyah yapar ve KSYN mesajı yayımlar.  $v$  düğümünden KSYN mesajını ilk kez alan herhangi bir beyaz  $u$  düğümü ise kendisini gri yapar ve KSNM mesajı yayımlar.  $u$  düğümü  $v$  düğümünü kapsayan düğüm olarak seçer. En az bir KSNM mesajı alan bir

beyaz düğüm aktif hale gelir. Aktif beyaz komşuları arasından en yüksek belirteç (*ID*) değerine sahip bir aktif beyaz düğüm kendini siyah yapar ve *KSYN* mesajı yayınlar. Bir beyaz düğüm *KSNN* mesajı aldığı anda etkinlik derecesini 1 azaltır ve *DERECE* mesajı yayınlar. *DERECE* mesajı, gönderenin mevcut etkinlik derecesini içermektedir. *DERECE* mesajını alan bir beyaz düğüm, komşuluk bilgisini buna göre günceller. Her bir gri düğüm beyaz komşusu olmadığını fark ettiği zaman *SİYAHKOMŞUSAYISI* mesajı yayınlar. İlk faz ağ üzerinde hiçbir beyaz düğüm kalmayınca sonlanır.

Tüm gri komşularından *SİYAHKOMŞUSAYISI* mesajı alan *s* düğümü ikinci fazı başlatır ve *M* mesajı yayınlar. Bir düğümün beyaz komşusu kalmadığında keşfedilmeye hazırdır. Burada ilk fazda üretilen siyah düğümleri bağlamak için Steiner Ağacı algoritması kullanılmaktadır. Amaç birçok siyah düğüme bağlı olan bu gri düğümleri seçmektir. Kapsayan düğümü olmayan siyah bir düğüm aktiftir. Başlangıçta hiçbir siyah düğümün kapsayan düğümü yoktur ve tüm düğümler keşfedilmemiştir. *M* mesajı bir sonraki keşfedilecek düğümü gösteren *SONRAKİ* alanını içermektedir. En az bir aktif siyah komşusu olan gri bir düğüm etkindir. Eğer *M* mesajı siyah bir düğüm tarafından oluşturulmuş ise, mesajın *SONRAKİ* alanı en çok aktif siyah düğüme bağlanmış olan keşfedilmemiş bir gri düğümün belirtecini (*ID*) içerir. Eğer *M* mesajı gri bir düğüm tarafından oluşturulmuş ise, mesajın *SONRAKİ* alanı herhangi bir keşfedilmemiş siyah düğümün belirtecini içerir.

Gri bir *v* düğümünden *M* mesajını ilk kez alan herhangi bir siyah *u* düğümü, *EBEVEYN* mesajı yayınlayarak *v* düğümünü kapsayan düğüm olarak seçer. Bir *u* düğümü, *v* düğümünden *u* 'nun bir sonraki aşamada keşfedileceğini belirten *M* mesajını aldığı anda, eğer *u* düğümünün hiçbir beyaz komşusu yoksa kendini siyah yapar, kapsayan düğüm olarak *v* düğümünü seçer ve kendi *M* mesajını yayınlar. Aksi halde, *u* düğümü bu işlemi hiçbir beyaz komşusu olmayıncaya kadar erteler.

Siyah bir komşusundan *EBEVEYN* mesajı alan herhangi bir gri düğüm, aktif siyah komşu sayısını içeren *SİYAHKOMŞUSAYISI* mesajı yayınlar. Bir siyah düğüm, kapsayan düğümü seçildiğinde pasif hale gelir. Bir gri düğüm hiçbir siyah komşusu aktif değilse etkin değildir.

Hiçbir aktif siyah komşusu olmayan bir gri düğüm ya da etkin gri komşusu olmayan siyah bir düğüm, keşfedilmesini sağlayan düğüme ya da kapsayan düğüme BİTTİ mesajı yayınlar. s düğümü, BİTTİ mesajı aldığı ve hiçbir etkin gri komşusu kalmadığında algoritma sonlanır. Böylece BK içinde birbirine bağlı olmayan kapsayan düğümler birbirine bağlanarak BBK'lar oluşturulmaktadır.

Cardei ve diğ. (2002)'nin geliştirdiği DÖA ile KSYN düğüm bağlama algoritmasının bitişiyle dağıtık LMW algoritmasında ikinci faz sonlanmaktadır. Ağ üzerinde enerjileri biten düğümlerin devre dışı kalmasıyla, kalan düğümler tarafından yeni BBK'ların oluşturulması amacıyla birinci faz ile ikinci faz tekrarlanır. Sonuç olarak ağ üzerinde oluşturulabilecek hiçbir BBK kalmayınca LMW algoritmasının üçüncü fazı da tamamlanmakta ve ağın yaşam süresi hesaplanmaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen algoritma, sınıflara ayrılmıştır. Bu yapıya göre düğümlerin birbirlerine gönderdikleri mesajlar *messages.h* adlı sistem dosyasında tutulmaktadır. Bu mesajlar, düğümlerin tüm komşularına gönderdiği yayın mesajı olan *broadcast message*, düğümlerin birebir iletişime geçtiği mesaj olan *unicast message*, her bir düğümün enerji miktarlarını komşularına bildirdiği *dominateweight message*, enerji büyüklüklerine göre hangi düğümün kapsayan hangi düğümün de kapsanan olduğunu bildiren *dominator announcement message* ve her bir düğümün kapsayan komşu listesini diğer komşularına bildirdiği *dominator neighbourslist announcement message* gibi mesajlardır.

SenseEH ile yapılan benzetim testleri için, bir UDGM modeli içinde herhangi bir sayıda rastgele düğümler yerleştirilerek bir TDA oluşturulmuştur. TDA'da yer alan her bir düğüm yayın mesajı göndererek komşularını öğrenmeye çalışmaktadır. Bir düğüm komşularından gelen yayın mesajını aldığı anda, gelen paketin daha önce bilinen bir komşudan gelip gelmediğine bakmaktadır. Eğer gelen pakette bilinen bir komşunun adresi varsa hiçbir şey yapılmaz. Eğer yeni bir komşu bilgisi gelmiş ise komşuluk listesine eklenir. Böylece her bir düğüm komşuluk listesini tamamlamaktadır.

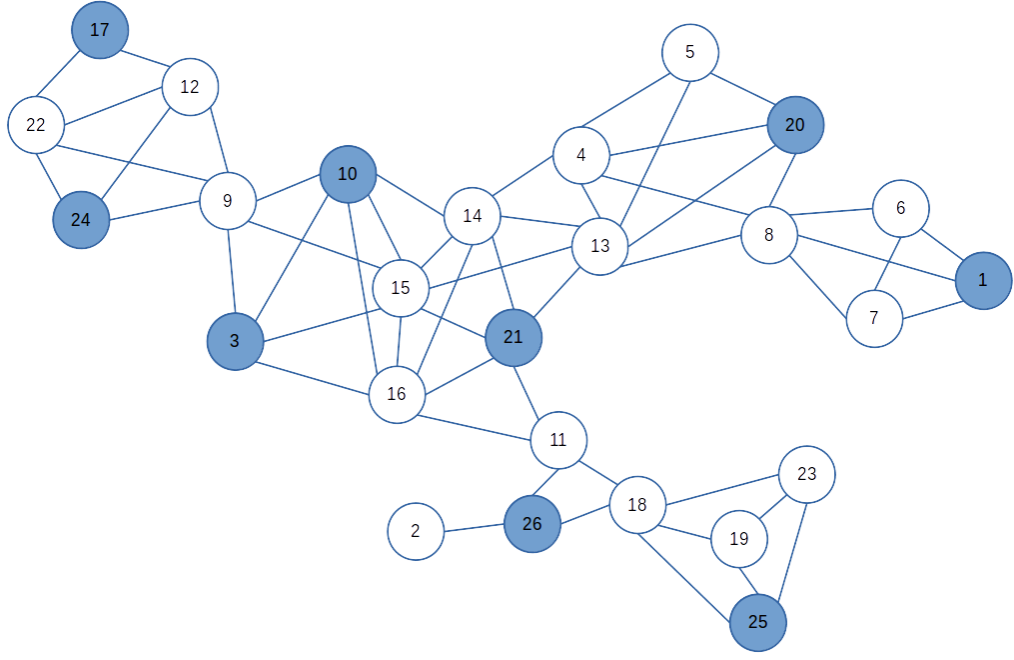
Her bir yayın paketi de bir sıra numarası (*sequence number*) içerir. *last\_seqno* değişkeni bir komşudan gelen en son yayın paketini göstermektedir. Komşuluk listesine bir komşu düğüm eklenirken *\*next* adıyla bir işaretçiye (*pointer*) ihtiyaç

vardır. *linkaddr\_t* ise bir komşu düğümün *RIME* adresini göstermektedir. Bir düğümün bilinen en fazla komşu sayısı *MAX\_NEIGHBORS* değişkeni ile sabitlenebilir. TDA'daki tüm komşuluklar *NeiList<sub>(tt)</sub>* adı altında bir kuyrukta tutulmaktadır.

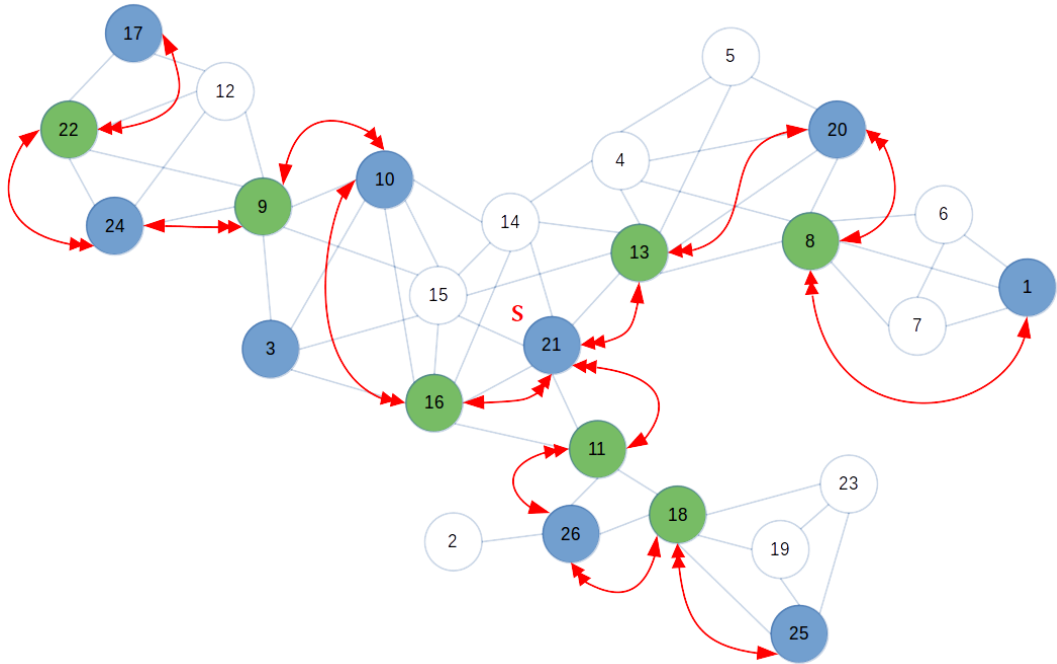
Ağ üzerindeki bir düğüm komşularına *unicast* mesajı gönderebilmektedir. Bu mesaj güvenilir olduğu için iletildiği ve kayıpların olmadığı varsayılmaktadır. Bu nedenle bu mesaja *runicast* mesajı adı verilmektedir. Alınan *runicast* mesajı için gönderen geçmişi listesi tutulabilir. Bu liste, mesajın geldiği düğümlerin tekrarlanan geribildirimini saptamaktadır. Tekrarlar, bilgilendirme (*ack*) mesajlarının kaybolması halinde ortaya çıkmaktadır.

Her bir düğüm için de ağırlık (*weight*) tanımlanmıştır. Bu sayede her bir düğüm kendi KSYN düğümünü bulabilir. Bir düğümün ağırlığı komşusundan küçükse, komşu düğümü KSYN olabilir. KSYN düğümleri bulma işlemi, *recieve runicast* metodu içinde *dominatordiscovery\_message* yapısı ile sağlanır. Burada komşuluk içinde yer alan düğümlerin ağırlıkları karşılaştırılır. Eğer bir düğümün ağırlığı komşu düğümün ağırlığından düşükse KSNN, tüm komşularından büyükse KSYN mesajı yayınlar. Her bir düğüm, KSYN düğümlerini bulduğunda ve kendisinin KSYN ya da KSNN olduğunu öğrendiğinde dağıtık LMW algoritmasının ilk fazı tamamlanır.

Şekil 4.2'de, mavi renkli düğümler KSYN durumdaki düğümler, beyaz renkli düğümler ise KSNN durumda düğümler olmak üzere, dağıtık LMW algoritmasının ilk fazının sonucunda oluşan BK gösterilmektedir. Ağ üzerinde hiçbir BSİZ durumda düğüm kalmadığı için dağıtık LMW algoritmasının ikinci fazı olan KSYN düğümleri bağlama fazı başlatılır.



Şekil 4.2: Dağıtık LMW algoritmasının ilk fazının sonucunda oluşan BK.



Şekil 4.3: Dağıtık LMW algoritmasının ikinci fazında yer alan DÖA algoritmasının izlediği yol.



Şekil 4.3 ile verilen 26 adet düğüme sahip örnek bir TDA üzerinde 21 numaralı düğümün DÖA'yı başlatan  $s$  düğümü olarak seçildiği DÖA algoritması, sırayla şu yolu izlemektedir:

DÖA: 21 → 16 → 10 → 9 → 24 → 22 → 17 → 22 (G) → 24 (G) → 9 (G) → 3 → 9 (G) → 10 (G) → 16 (G) → 21 (G) → 13 → 20 → 8 → 1 → 8 (G) → 20 (G) → 13 (G) → 21 (G) → 11 → 26 → 18 → 25 → 18 (G) → 26 (G) → 11 (G) → 21 (G) → BİTTİ.

Yukarıdaki açıklamaya göre kalın siyah renkteki sayılar kapsayan düğümleri, kırmızı renkteki sayılar kapsanan düğümleri, (G) ise DÖA'nın daha önce gezilmiş olan ebeveyn düğüme geri döndüğünü göstermektedir.

BBK oluşturmak için DÖA kullanıldığında çok fazla düğüm kapsayan düğüm olarak seçilmektedir ve DÖA yöntemi ile tüm ağ gezildiği için enerji kaybı oldukça fazladır. Ayrıca DÖA içinde farklı düğümler aynı kapsanan düğümünü kapsayan düğüm olarak seçebilecekleri için, algoritma farklı topolojilerdeki ağlarda ilerlememekte ve BBK oluşturamamaktadır. Shi ve diğ. (2017) bu duruma çözüm olarak, düğümlerin kapsayan düğüm seçim işlemini aynı anda değil fakat tek tek yapmasını önermektedir. Bu durumda da yine algoritma farklı topolojilerdeki ağlarda ilerlememekte ve BBK oluşturamamaktadır. Bu sorunun çözümü kapsayan düğümlerin ya da kapsayan olarak seçilmiş düğümlerin aktiflik durumlarına bakılarak aşılmıştır.

İkinci faz sonunda bir BBK oluşturulur ve BİTTİ mesajı ile tüm düğümler bilgilendirilir. Böylece 3. faz başlatılır ve düğümlerin enerjileri ağ üzerinde çalışan herhangi bir TDA uygulaması ile tüketilir. Ağ içinde herhangi bir düğümün enerjisi bittiği anda tüm düğümlere YENİDEN BAŞLA mesajı gönderilir. Böylece tüm düğümler KSYN ya da KSNN olan durumlarını BSİZ olarak güncellerler ve düğümlerin kalan enerjileri ile Faz 1 yeniden başlatılır. Bu döngü, ağ üzerinde hiçbir BBK oluşmayıncaya kadar devam edecektir. Eğer ağ üzerinde BBK oluşmuyor ise ağın yaşam süresi sona ermiş anlamına gelmektedir.

## 4.2 Güneş Enerjisi Hasadı Yapan Dügümlerin Bulunduğu Akıllı Çevresel Uygulamalar İçin Geliştirilmiş TDA'larda Yaşam Süresini Artıran Dağıtık Bağlı Baskın Küme Algoritması (GEHABBK)

GEHABBK algoritması, dağıtık LMW algoritmasından yola çıkılarak, enerji hasadı yapabilen düğümleri içeren TDA'larda farklı durumları göz önüne alarak BBK oluşturmuş, bu sayede ağ yaşam süresini artırmayı hedeflemiştir. Bu algoritmanın sözde kodu Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 ile verilmiştir. GEHABBK algoritması ile dağıtık LMW algoritmasının her ikisi de, literatürde yer alan birçok BBK algoritmasında olduğu gibi ağ üzerinde önce BK bulma daha sonra KSYN düğümlerin birbiriyle bağlanması ile BBK oluşturma fazlarına sahiptir. Ancak dağıtık LMW algoritmasında yer alan üçüncü faz, GEHABBK algoritmasında farklılık göstermektedir. Dağıtık LMW algoritmasına göre bir düğümün enerjisinin bitmesi ile BBK'lar yeniden oluşturularak ağda herhangi bir BBK oluşamayacak duruma kadar tüm fazlar tekrarlanır. Dağıtık LMW algoritmasından yola çıkılarak geliştirilmiş GEHABBK algoritmasında ise herhangi bir düğümün enerjisinin bitmesi ağın yaşam süresinin sona ermesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle GEHABBK algoritması geleneksel sel (*flooding*) yöntemlerinin yanı sıra, literatürde yer alan Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin geliştirdiği enerji etkin dağıtık BBK algoritması ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile ilgili benzetim parametreleri ve sonuçları Bölüm 4.2.4'te, benzetim sonuçlarının analizi Bölüm 4.2.5'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Geliştirilen GEHABBK algoritmasında yer alan düğümler iki farklı türe ayrılmıştır. Bunlardan ilki sıradan yani sadece enerji tüketen düğümlerdir. Diğer düğüm türü ise enerji hasadı yapabilen düğümlerdir. GEHABBK algoritmasına göre düğümlerin enerji seviyesi bulunmaktadır ve başlangıçta tüm düğümler belirsiz (BSİZ) durumda çalışmaktadır. Her bir düğüm öncelikle yayın (*broadcast*) yöntemi ile kendi komşularını tanımaktadır. Böylelikle her bir düğüm kendi komşuluk listesini elde etmektedir. Bir düğüm elde ettiği komşuluk listesini, kalan enerji miktarı ile enerji hasadı yapabilen düğüm olup olmadığını içeren başlangıç mesajını komşularına çoklu yayın (*multicast*) yöntemi ile göndermektedir. Her bir düğüm komşularından bu mesajı almaktadır ve kendi ağırlık oranını (*weight ratio*) hesaplamaktadır. Bir düğümün ağırlık oranı hesaplaması düğümün kendi türü ile

mesajın alındığı düğümün türüne göre farklılık göstermektedir. Bir düğüm tüm komşularına göre ağırlık oranını hesaplayarak bunu komşularına yayınlamaktadır.

Düğümün ağırlık oranı ile komşu düğümlerin ağırlık oranları karşılaştırılarak, ağırlık oranı en yüksek düğüm, kapsayan düğüm olarak seçilmektedir. Bu durumda kapsayan düğüm, BSİZ durumdan KSYN duruma geçmektedir. Kapsayan duruma geçen düğüm yeni durumunu komşularına yayınlamaktadır. Komşu bir düğümden KSYN durum mesajı alan düğümler kendi durumlarını BSİZ durumundan KSYN durumuna güncellerler.

#### 4.2.1 GEHABBK Algoritmasının Kapsayan Düğümleri Seçme Aşaması

TDA'larda yer alan düğümler enerji hasadı yapabilen düğümler ile sıradan düğümler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Geliştirilen algoritmalar ise düğüm tiplerine göre değişiklik göstermektedir.

TDA'da yer alan her bir düğüm ilk olarak BSİZ durumda başlamaktadır ve bir atlama (*hop*) uzaklıktaki komşularını bilmektedir. Algoritma başladığında her bir düğüm, pillerindeki kalan enerjilerini komşularına gönderirler. Ağ üzerinde bulunan tüm hasatçı düğümler, oluşturulacak olan BBK'ya dâhil olması için doğrudan KSYN olarak seçilir. Hasatçı düğümler BBK'yı oluşturmak için, Şekil 4.6 ile gösterilen algoritmayı çalıştırırlar. Bu algoritmaya göre kapsayan duruma gelen hasatçı düğüm, komşularına HASATÇI mesajını yayınlamaktadır. Bu aşamada, hasatçı düğümler diğer düğümlerin KSYN ya da KSYN düğüm olma kararlarını beklerler.

**Algoritma başladığında /**  
1. yayımla **HASATÇI\_DURUM**<sub>m</sub> →  $\Gamma_m$   
2. yayımla **BİTTİ**<sub>m</sub> →  $\Gamma_m$

**BİTTİ**<sub>n</sub> ← düğüm n /  
1. bitenSayısı=bitenSayısı+1  
2. if Bitti<sub>n</sub>=true  $\forall$  düğüm<sub>n</sub>  $\in$   $\Gamma_m$   
2.1 ikinci tura başla



**Şekil 4.4:** GEHABBK algoritmasında yer alan hasatçı düğümlerin durum değişimlerini gösteren sonlu durum diyagramı.

Bu mesajı alan BSİZ durumdaki herhangi bir sıradan düğüm, Şekil 4.7 ile gösterilen algoritmaya göre KSNN durumuna geçer ve mesajı gönderen hasatçı düğümü pasif olarak işaretler. Pasif olarak işaretlenen düğümler, kapsayan düğüm seçimlerinin yapılacağı sonraki turlara dâhil edilmezler.

Bir düğüm, tüm hasatçı komşularından HASATÇI mesajlarını aldığı anda hiçbir hasatçı düğümü içermeyip sadece aktif komşularını içeren listeyi ( $\Gamma_{akt}$ ) tüm komşularına gönderirler. Bir düğüm için bu liste, herhangi bir turda gönderilecek herhangi bir mesajın hangi aktif komşu düğümlere iletileceğinin kontrolünün yapıldığı listedir. Eğer bir düğüm BSİZ durumda değilse ve hiçbir BSİZ durumda komşusu yoksa bu düğümün BBK oluşturma algoritması için artık hiçbir katkısı yoktur, bu nedenle aktif değildir ve hasatçı düğümler gibi  $\Gamma_{akt}$  listesinden silinir. Her bir tur sonunda bu liste, bir düğümün hiçbir aktif komşu düğümü kalmayınca kadar güncellenmektedir.

HASATÇI mesajı alan sıradan bir düğüm, kendi  $DURUM_0$  mesajını tüm aktif komşularına gönderir. Bir düğüm komşu bir düğümden  $DURUM_0$  mesajı aldığı anda, komşu düğümün durumunu günceller. Öte yandan bir düğüm, ilk turda tüm komşularından tüm DURUM mesajlarını aldığı anda, BİTTİ mesajını tüm komşularına gönderir. BİTTİ değişkeni, bir düğümün durumu ve o düğüme ait hiçbir komşu düğümünün durumu BSİZ değilse mantıksal doğru (*true*) olarak işaretlenir. Eğer aksi bir durum varsa, yani düğümün durumu BSİZ ise ve/veya herhangi bir komşusu ya da komşuları BSİZ durumda ise, bu düğüm henüz işlemini tamamlamamıştır ve sonraki turlara dâhil olması için BİTTİ değişkeni mantıksal yanlış (*false*) olarak işaretlenir. Bir düğüm, bir tur içinde tüm aktif komşularından BİTTİ mesajlarını aldığı anda o turun bittiğini anlar. Yeni tur başlatılır ve tur sayısı artırılır.

Eğer bir düğümün işlemi henüz bitmemişse ve tüm aktif komşularından BİTTİ mesajlarını aldıysa, aktif komşu listesini ( $\Gamma_{akt}$ ) günceller ve yeni tur için yeni ağırlığını hesaplar. Yeni ağırlık değeri olan AĞIRLIK değişkeni, düğümün kalan enerjisi ile hasatçı komşu sayısının hesaba katıldığı bir formül ile hesaplanır.

Yeni ağırlık değerleri hesaplandıktan sonra, tüm aktif komşu düğümler yeni ağırlık değerlerini aktif komşu düğümlerine gönderirler. Bir düğüm, tüm aktif komşularından yeni ağırlık değerlerini aldıktan sonra, kendi yeni ağırlık değerinin

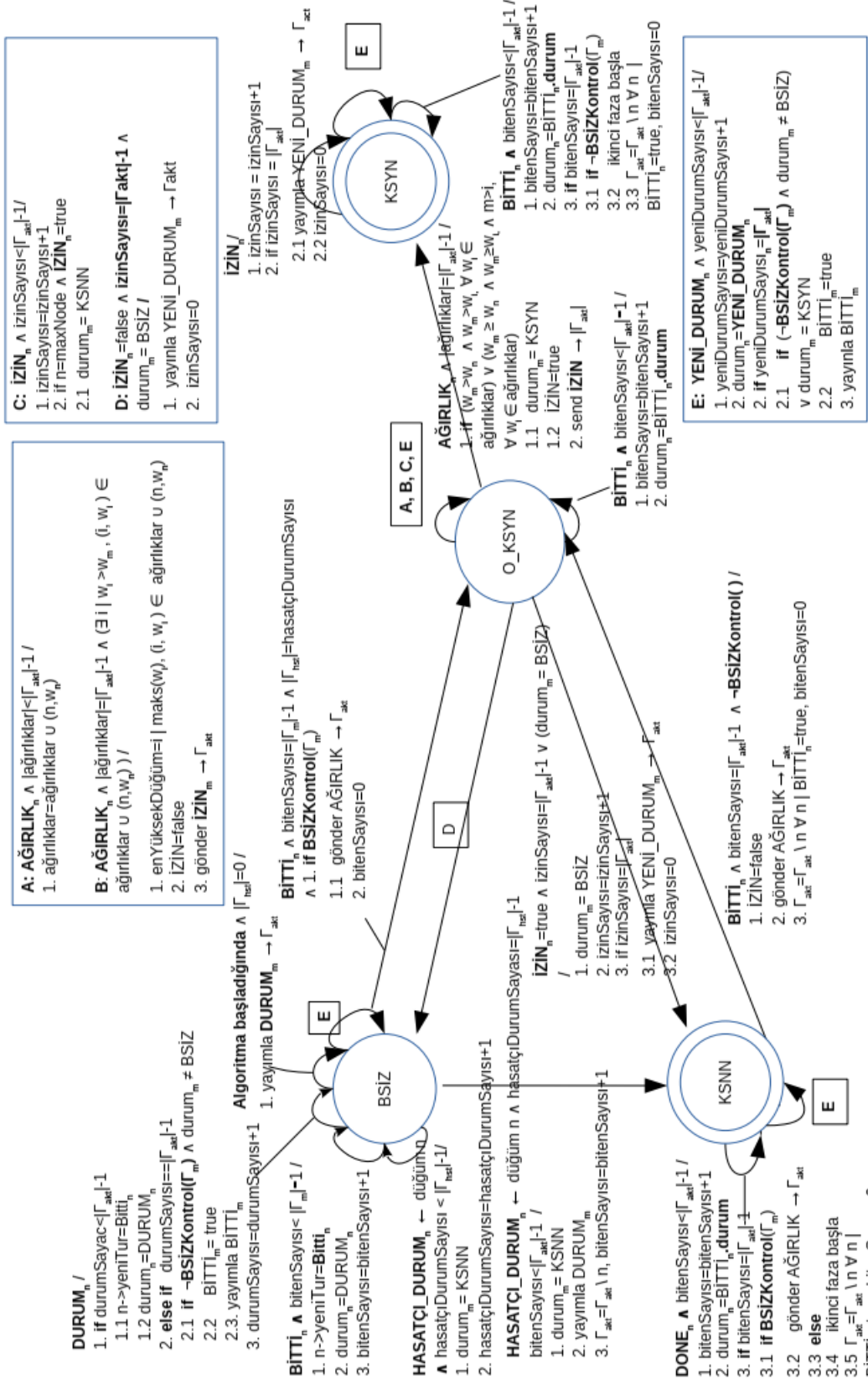
aktif komşularına ait ağırlık değerleri arasında en yüksek değer olup olmadığını kontrol ederek İZİN değişkenini bu duruma göre günceller. Eğer düğümün yeni ağırlığı aktif komşularının yeni ağırlıklarından fazla ise kendi durumunu KSYN ve İZİN değişkenini de mantıksal doğru (*true*) olarak değiştirir. Durumu KSYN olsun olmasın her aktif düğüm İZİN değişkenini tüm aktif komşularına gönderir.

Bir düğümün İZİN değişkenini mantıksal doğru (*true*) olarak tüm aktif komşularına göndermesi, kendi durumunun KSYN, bu mesajı alan düğümlerin önceki durumu BSİZ ise durumlarının KSNN olarak güncelleneceği anlamına gelmektedir. Bir düğüm aktif komşularından tüm İZİN mesajlarını aldıktan sonra, aktif komşu düğümlere  $DURUM_{i>0}$  mesajı gönderir.  $DURUM_{i>0}$  mesajı düğümün yeni durumunu (BSİZ, KSYN veya KSNN) tüm aktif komşularına bildirmektedir.

Bir düğüm aktif komşularından tüm  $DURUM_{i>0}$  mesajlarını aldığı anda, durumunun BSİZ olup olmadığını veya herhangi bir BSİZ durumda komşuya sahip olup olmadığını  $BSİZKontrol()$  metodu ile kontrol eder. Eğer durumu BSİZ değilse ve hiçbir BSİZ durumda komşuya sahip değilse, tüm aktif komşularına BİTTİ mesajını mantıksal doğru (*true*) değeri ile gönderir ve böylelikle yeni turlara dâhil olmayacaktır. Aksi durumda, tüm aktif komşularına BİTTİ mesajını mantıksal yanlış (*false*) değeri ile gönderir ve yeni tur için hazır duruma geçer.

Algoritmanın ilk fazı, ağ üzerinde hiçbir BSİZ durumda düğüm kalmayınca kadar devam eder. Ağda hiçbir BSİZ durumda düğüm kalmadığı takdirde seçilen KSYN düğümler bir BK oluştururlar ve tüm KSNN düğümler en az bir KSYN düğüm tarafından kapsanmaktadır. Bir sonraki adım ise, bazı KSNN düğümlerin de KSYN düğüm olarak seçilmesidir. Bu durumda ağ üzerinde yer alan tüm KSYN düğümler birbirleriyle bağlanarak bir BBK oluşturulacaktır.

GEHABBK algoritmasında yer alan hasatçı düğümlerin sonlu durum diyagramı Şekil 4.4 ile sıradan düğümlerin sonlu durum diyagramı ise Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.5: GEHABBK algoritmasında yer alan sıradan düğümlerin durum değişimlerini gösteren sonlu durum diyagramı.

#### 4.2.2 GEHABBK Algoritmasının Kapsayan Düğümleri Bağlama Aşaması

İlk fazda seçilen kapsayan düğümleri birbirleri ile bağlamak amacıyla, öncelikle kısmi ağaçları yani hali hazırda bağlanmış olan kapsanan düğümleri bulmak için Gallager ve diğ. (1983)'nin geliştirdikleri GHS algoritması seçilmiştir.

GHS algoritması başlamadan önce her bir düğüm komşu düğümlerini ( $\Gamma_m$ ) ve durumlarını (KSYN ya da KSNN) bilmektedir. KSYN durumdaki komşu düğümler öncelikle sahip oldukları ağaç belirteç değerini (*treeID*), ait oldukları ağacın kök düğümünün belirteci (*ID*) olarak atarlar.

Bu fazın her bir turunda, KSYN düğümler ağaç belirteç değerlerini (*treeID*), KSNN komşularına gönderirler. Tüm KSYN düğümlerden bu değerler alındıktan sonra, bir KSNN düğüm kalan enerjisi ve ağaç belirteç değerlerini tüm KSNN komşularına gönderir. Bu değerleri alan KSNN düğümler, yeni maliyetlerini (MLYT) hesaplarlar ve bu değeri komşu ağaçlara gönderir. MLYT değeri (Dagdeviren ve diğ. 2015), Denklem (4.1)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$\min\left\{\frac{1}{e_m |\Gamma^{tree}|}, \bigcup_{n \in \Gamma_m} \frac{\left(\frac{1}{e_m} + \frac{1}{e_n}\right)}{|\Gamma^{tree}_m \cup \Gamma^{tree}_n|}\right\} \quad (4.1)$$

KSNN komşularından tüm MLYT değerlerini alan KSYN düğümler, kısmi ağaç içinde yer alan ebeveyn düğümlere göre minimum ağırlığa sahip olan komşusunun belirteç değerini (*minWeightID*) gönderirler. En sonunda kısmi ağacın kök düğümü, minimum ağırlığa sahip düğüm/düğümleri bağlayan (*connector*) düğüm olarak seçer ve ağaç KSNN komşularına bu durumu bildirir. Düğümlerin belirteç değerleri (*ID*) kullanılırken bağlantılar bozulur. Komşu ağaçlardan tüm minimum ağırlık belirteç değerlerini alan bir KSNN düğüm, aldığı belirteç değerleri ile kendi belirteç değerini karşılaştırır. Eğer belirteç değerleri aynı ise, tüm komşu ağaçları tek bir ağaca bağlamak için tüm komşu ağaçlarına BİRLEŞİM mesajı yayınlar. Daha sonra bu

KSNN düğüm, yeni oluşturulan ağacın kök düğümü olarak belirlenir. Bu işlemler ağ üzerinde tek bir ağaç oluşuncaya kadar tekrarlanır. Bu algoritma, aynı zamanda bir BBK olan ağaç oluşturma algoritmasıdır. Ağ üzerinde BBK oluşturulduktan sonra ikinci faz sonlandırılır ve bu BBK yapısı üzerinden mesajların iletildiği, Şekil 4.8 ile gösterilen algoritmaya sahip örnek bir çevresel veri ölçme uygulaması çalıştırılır.

---

**Algoritma:** Hasatçı Düğümler İçin Baskın Küme Algoritması

---

```

1: VERİ:
2:    $\Gamma_m \leftarrow m$  düğümünün komşu listesi
3:    $e_m \leftarrow m$  düğümünün kalan enerjisi
4:    $DURUM_m \leftarrow m$  düğümünün durumu (BSİZ, KSYN ya da KSNN)
5:    $HASATÇI_m \leftarrow$  düğüm hasatçı ise true
6:    $ilkFazBitti \leftarrow$  algoritma sonlandıysa true
7:    $bitenSayısı \leftarrow$  yeni tura başlamaya hazır düğümlerin sayısı
8: Başlamadan önce:
9:    $DURUM_m \leftarrow BSİZ$ 
10:   $HASATÇI_m \leftarrow true$ 
11:   $BİTTİ \leftarrow false$ 
12:   $bitenSayısı \leftarrow 0$ 
13: Düğümler algoritmaya başladığında:
14:   $DURUM_m \leftarrow KSYN$ 
15:   $\Gamma_m$ 'ye HASATÇI_DURUM mesajını yayımla
16:   $\Gamma_m$ 'ye BİTTİ mesajını yayımla
17:  $n$  düğümünden  $BİTTİ_n$  mesajı aldığı anda:
18:   $bitenSayısı \leftarrow bitenSayısı + 1$ 
19:  if  $bitenSayısı = |\Gamma_m|$  then
20:     $ilkFazBitti \leftarrow fazSonuKontrol()$ 
21:  end if

```

---

Şekil 4.6: GEHABBK algoritmasında yer alan hasatçı düğümler için BK algoritması.



---

**Algoritma:** Sıradan Dügümler İçin Baskın Küme Algoritması

---

1: **VERİ:**  
2:  $\Gamma_m \leftarrow m$  düğümünün komşu listesi  
3:  $\Gamma_{akt} \leftarrow m$  düğümünün aktif komşu listesi  
4:  $\Gamma_{hst} \leftarrow m$  düğümünün hasatçı komşu listesi  
5:  $e_m \leftarrow m$  düğümünün kalan enerjisi  
6:  $\omega_m \leftarrow m$  düğümünün ağırlığı  
7:  $DURUM_m \leftarrow m$  düğümünün durumu (BSİZ, KSYN ya da KSNN)  
8:  $bitenSayısı \leftarrow$  yeni tura başlamaya hazır düğümlerin sayısı  
9:  $n \rightarrow yeniTur \leftarrow true, \forall n | n \in \Gamma_m \setminus \Gamma_{hst}$   
10:  $HASATÇI_m \leftarrow$  düğüm hasatçı ise *true*  
11:  $ilkFazBitti \leftarrow$  algoritma sonlandıysa *true*  
12: **Dügümler algoritmaya başladığında:**  
13:  $DURUM_m \leftarrow BSİZ$   
14:  $HASATÇI_m \leftarrow false$   
15:  $\omega_m \leftarrow pil\_seviyesi, \Gamma_{akt} \leftarrow \Gamma_m$   
16:  $bitenSayısı \leftarrow 0, İZİN \leftarrow false$   
17:  $yeniDurumSayısı \leftarrow 0, izin_{msj} \leftarrow 0$   
18:  $ilkFazBitti \leftarrow false$   
19:  $\{n, \forall n | n \in \Gamma_{akt} \text{ ve } HASATÇI_m = false\}$  düğümünden **DURUM mesajı aldığımda:**  
20: düğüm durumlarını güncelle  
21: **A:**  
22: **if**  $\neg BSİZKontrol(\Gamma_m) \wedge DURUM_m \neq BSİZ$  **then**  
23:      $BİTTİ \leftarrow true$   
24: **end if**  
25:  $\Gamma_m$ 'ye  $BİTTİ$  mesajı yayımla  
26:  $n, \forall n \in \Gamma_{hst}$  **düğümünden HASATÇI\_DURUM mesajı aldığımda:**  
27:      $DURUM_m \leftarrow KSNN, \Gamma_{akt} \leftarrow \Gamma_{akt} \setminus n, \forall n \in \Gamma_{hst}$   
28:      $\Gamma_{akt}$ 'e DURUM mesajı yayımla  
29:     **A'yı çalıştır**  
30:  $n$  **düğümünden BİTTİ<sub>n</sub> mesajı aldığımda:**  
31:  $n \rightarrow yeniTur \leftarrow BİTTİ_n$   
32: **if**  $(tur = 0 \wedge bitenSayısı = |\Gamma_m|) \vee (tur \neq 0 \wedge bitenSayısı = |\Gamma_{akt}|)$  **then**  
33:      $\Gamma_{akt}$ 'i güncelle, fazSonuKontrol()  
34:      $bitenSayısı \leftarrow 0$   
35:      $tur \leftarrow tur + 1$   
36:     **if**  $BİTTİ = false$  **then**  
37:          $İZİN \leftarrow false$   
38:          $\Gamma_{akt}$ 'e AĞIRLIK mesajını gönder  
39:     **end if**  
40: **end if**  
41:  $bitenSayısı \leftarrow bitenSayısı + 1$   
42:  $n$  **düğümünden AĞIRLIK<sub>n</sub> mesajı aldığımda:**  
43:      $ağırlıklar \leftarrow ağırlıklar \cup (n, w_n)$   
44:     **if**  $|ağırlıklar| = \Gamma_{akt}$  **then**  
45:         maksimum ağırlık değerine sahip  $z$  düğümünü bul  
46:          $ağırlıklar \leftarrow \{ \}$

---

---

```

47:   if  $z = m$  then
48:     İZİN  $\leftarrow true$ 
49:   end if
50:    $\Gamma_{akt}$ 'e İZİN değerini gönder
51: end if
52:  $n$  düğümünden İZİN $n$  mesajı aldığında:
53: if İZİN $n$  =  $true$  then
54:    $n \rightarrow durum \leftarrow KSYN$ 
55:    $n \rightarrow yeniTur \leftarrow false$ 
56:    $izin_{msj} \leftarrow izin_{msj} + 1$ 
57:   if DURUM = BSİZ then
58:     DURUM  $\leftarrow KSNM$ 
59:   end if
60:   if  $izin_{msj} = |\Gamma_{akt}|$  then
61:      $\Gamma_{akt}$ 'e YENİ_DURUM değerini gönder
62:      $izin_{msj} \leftarrow 0$ 
63:   end if
64: end if
65:  $n$  düğümünden YENİ_DURUM $n$  mesajı aldığında:
66:    $n \rightarrow durum \leftarrow YENİ_DURUM_n$ 
67:   yeniDurumSayısı  $\leftarrow yeniDurumSayısı + 1$ 
68:   if yeniDurumSayısı =  $|\Gamma_{akt}|$  then
69:     BİTTİ  $\leftarrow bitişKontrol()$ 
70:      $\Gamma_{akt}$ 'e BİTTİ mesajı gönder
71:     yeniDurumSayısı  $\leftarrow 0$ 
72:   end if
73: BSİZKontrol():
74:   if  $DURUM_n = BSİZ, \exists n \in \{\Gamma_m \cup m\}$  then
75:      $bitti \leftarrow true$ 
76:   else
77:      $bitti \leftarrow false$ 
78:   end if
79:   return  $bitti$ 
80: fazSonuKontrol():
81:   if  $DURUM_n \neq BSİZ, \forall n \in \{\Gamma_m \cup m\}$  then
82:      $bitti \leftarrow true$ 
83:   else
84:      $bitti \leftarrow false$ 
85:   end if
86:   return  $bitti$ 

```

---

Şekil 4.7: GEHABBK algoritmasında yer alan sıradan düğümler için BK algoritması.

### 4.2.3 GEHABBK Algoritmasının Herhangi Bir Çevresel Uygulama Üzerinde Çalıştırılması

Son dönemlerde TDA uygulamalarında sıklıkla tercih edilen Cooja benzetim ortamından geliştirilen SenseEH benzetim ortamı, farklı topolojilerdeki TDA'ların yaşam sürelerini ölçmek için kullanılmıştır. Çalışmanın bu kısmında geliştirilen algoritmalar, Tmote Sky duyargasının kullanıldığı farklı sayıda düğüm içeren farklı topolojilerde denenmiştir.

Tmote Sky duyargasının teknik verilerine göre (Tmote Sky Datasheet 2005), duyarganın enerji tüketimi, veri alma, iletme, boşa çalışma ve uyku evrelerinde harcanan enerjilerin toplamı olarak verilmektedir. Buna göre duyarga devresinden geçen akım, veri alma aşamasında 21.8 mA, iletim aşamasında 19.5 mA, boşa çalıştığında 1.8 mA ve uyku aşamasında 0.0545 mA olarak ölçülmüştür. Düğümlerin enerji tüketiminin ölçme işlemi için SenseEH'in dâhili Enerji Kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane, Cooja'da yer alan "Powertrace" adlı enerji tüketim takip aracı ile benzer işleve sahip olmakla birlikte, enerji hasadı için ek özellikleri bulunmaktadır. Bu araç basit olarak, bir düğümün saniyedeki tik sayısı (*clock ticks*) için enerji tüketim seviyelerini vermektedir.

Enerji tüketim seviyeleri, değeri saniyede 32768 tik (*tics per second*) olan *RTIMER\_ARCH\_SECONDS* adında donanımsal sayaca göre ölçülmektedir. Buna göre Cooja benzetim ortamında Tmote Sky duyargasının enerji tüketimi,  $I_{tx} = 19.5 \text{ mA}$ ,  $I_{rx} = 21.8 \text{ mA}$ ,  $I_{lpm} = 0.0545 \text{ mA}$ ,  $I_{cpu} = 1.8 \text{ mA}$  olmak üzere, Denklem (4.2) ile verilen formül ile ölçülmektedir.

$$\text{Harcanan Enerji (mJ)} = \frac{(tx \times I_{tx} + rx \times I_{rx} + cpu \times I_{cpu} + lpm \times I_{lpm}) \times 3V}{RTIMER\_ARCH\_SECONDS} \quad (4.2)$$

TDA'da yer alan her bir düğüm, iki adet AA pilin karakteristiğine bağlı olarak aynı enerji seviyesi ile çalışmaya başlamaktadır. Bir Zn-MnO<sub>2</sub> alkalın AA pil (Varta V4906 Datasheet 2005) için enerji hesabı Denklem (4.3) ile verilmiştir.

$$E = P \times t = V \times I \times t = (1.5 \text{ V}) \times (2.85 \text{ Ah}) \times (3600 \text{ s}) = 15390 \text{ J} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'e göre iki tane AA pil teorik olarak başlangıçta 30780 J enerji kapasitesine sahiptir.

---

**Algoritma:** Örnek Bir Çevresel Veri Ölçme Uygulaması

---

```
1: VERİ:
2:    $\Gamma_m \leftarrow m$  düğümünün komşu listesi
3:    $e_m \leftarrow m$  düğümünün kalan enerjisi
4:    $BİTTİ \leftarrow \text{algoritma sonlandıysa true}$ 
5: Başlamadan önce:
6:    $e_m \leftarrow m$  düğümünün pil seviyesi
7:    $BİTTİ \leftarrow \text{false}$ 
8: Düğümler algoritmaya başladığında:
9:    $\Gamma_m$ 'ye ÖLÇÜLEN_VERİ mesajını yayımla
10:  $n$  düğümünden ÖLÇÜLEN_VERİ mesajı aldığıda:
11:    $\Gamma_m$ 'ye ölçme mesajını yayımla
12:   if  $e_m \leftarrow 0$  then
13:      $BİTTİ \leftarrow \text{true}$ 
14:   else
15:      $\Gamma_m$ 'ye ölçme mesajını yayımla
```

---

**Şekil 4.8:** GEHABBK algoritmasında örnek bir çevresel veri ölçme uygulaması.

Özet olarak, enerji hasadı yapabilen düğümlerin de yer aldığı TDA'lardaki bazı düğümler, KSYN düğüm seçme ölçütlerine göre KSYN düğüm olarak seçilmiştir. KSYN düğümler birbirlerine GHS algoritması ile bağlanarak ağ üzerinde bir BBK oluşturulmuştur. Oluşturulan bu BBK aynı zamanda ağın iletişim omurgasıdır. Duyargalar daha sonra Şekil 4.8 ile verilen örnek ölçme uygulaması ile çevreden ölçtükleri verileri bu iletişim omurgası üzerinden birbirlerine ve veri toplama merkezine iletmektedirler. Ağ üzerinde yer alan düğümler tüm bu işlemler sırasında enerji harcamaktadırlar. Bu nedenle, ağ üzerinde yer alan herhangi bir düğümün enerjisinin bitmesi ile ağın yaşam süresi hesaplanmaktadır.

Literatürde yer alan birçok çalışmada TDA'ların yaşam süresinin artırılması için enerji hasadı yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Buna rağmen, akıllı çevresel uygulamalarda BBK oluşturma teknikleri ile birlikte enerji hasadı yöntemlerinin kullanıldığı yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra çevresel kaynaklar arasında güneş enerjisi en etkin enerji hasadı yöntemidir. Geliştirilen GEHABBK algoritması ile güneş enerjisi hasadı yapabilen düğümler

bulduran BBK omurgasının kurulması, gerçek dünyada yer alan çevresel uygulamalar için enerji koruyan yöntem olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra GEHABBK algoritması, veri kaybı ile veri çakışmasını önlemekte, gönderilen mesaj sayısını azaltmakta, düğümlerin enerji tüketimini düşürmekte ve çevresel alanların takibi için çevresel alanlara yerleştirilmiş düğümlerden sürekli veri akışı sağlamaktadır.

#### **4.2.4 GEHABBK Algoritmasının Literatürde Yer Alan Diğer Uygulamalar ile Karşılaştırılması**

Tez kapsamında geliştirilen GEHABBK algoritması ilk olarak, daha önce bahsedilen ve BBK sanal omurgası kullanılmayan ağlarda ilk tercih edilen sel tabanlı geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Bunun için, sırasıyla SL-30 ve SL-50 olarak adlandırılan 30 ve 50 düğümden oluşan iki farklı benzetim kümesi oluşturulmuştur. Her bir küme için 50 farklı ağ topolojisine sahip birbirinden farklı ağlar oluşturulmuştur. İlk olarak sadece sıradan düğümlerden oluşan ve BBK omurgasına sahip olmayan sel tabanlı çevresel bir uygulama geliştirilmiştir. Bu uygulamada düğümler birbirleri ile sel yöntemi ile haberleşmektedir.

SL-30 ve SL-50 uygulamaları başlamadan önce ağda yer alan tüm sıradan düğümler komşu düğümleri bilmektedirler. Uygulama başladıktan hemen sonra, her bir düğüm kendi enerjisinin eşik değerden büyük olup olmadığını kontrol etmektedir. Bir düğümün kalan enerjisi eşik değerden yüksek ise çevresel bir büyüklüğü ölçerek periyodik olarak komşu düğümlere göndermektedir. Bu işlem, ağ üzerindeki herhangi bir sıradan düğümün enerjisi bitinceye kadar devam etmektedir.

Eşik değer, bir düğümün kalan enerjisi kritik seviyeye düştüğünde komşu düğümleri haberdar etmesi için gereklidir. Bir düğüm komşu bir düğümden bu uyarıyı aldığı anda, ölçtüğü çevresel veriyi o düğüme göndermeyi sonlandırır ve komşu düğümleri de enerjisi bitmekte olan düğüm için uyarır. Bu mesaj trafiği ile tüm düğümler ağ üzerinde enerjisi bitmekte olan en az bir düğümün varlığından haberdar olur ve ağ üzerindeki tüm iletişim sonlandırılır. Böylelikle, BBK omurgası olmayan ağın yaşam süresi hesaplanmış olur.

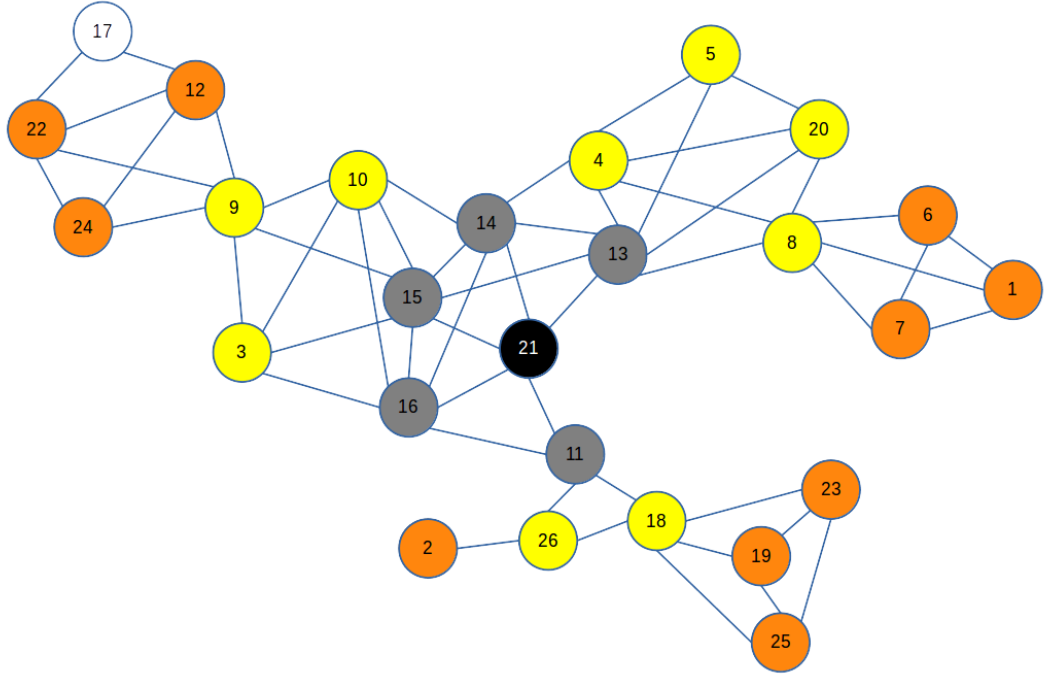
Bununla birlikte GEHABBK algoritması benzer olarak, BBK sanal omurgası kullanmayan ancak ağ üzerinde enerji hasadı yapabilen düğümler ile sıradan düğümlerin birlikte bulunduğu sel tabanlı başka bir geleneksel yöntem ile karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda SLH-30 ile SLH-50 olarak adlandırılmış uygulamalar, SL-30 ve SL-50 uygulamaları ile aynı çalışma prensibine sahip olmakla birlikte tek farkları ağ üzerinde enerji hasadı yapabilen düğümlerin de bulunmasıdır.

GEHABBK algoritması, literatürde yer alan Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin geliştirdiği TDA'larda enerji etkin dağıtık bir BBK oluşturma algoritması ile de karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında kısaca YKLBBK algoritması olarak adlandırılan Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin yapmış olduğu bu çalışma, GEHABBK algoritması ile aynı şartlar altında ve aynı benzetim parametrelerine bağlı kalınarak uygulanıp sonuçlar elde edilmiştir.

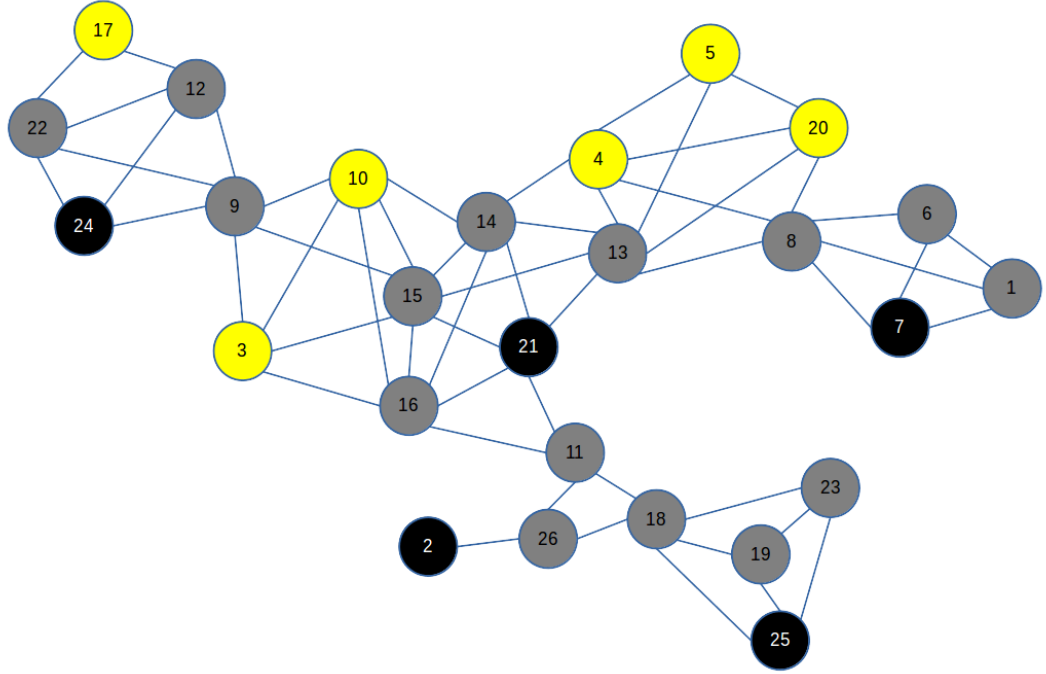
YKLBBK algoritması, düğümleri aldıkları mesajlara göre renklendirerek bir BK oluşturmakta ve son olarak kapsayan düğümler yine renklerine göre birbirleri ile bağlanarak bir BBK oluşturmaktadır. YKLBBK algoritması başlarken ağ üzerinde tüm düğümler ilk olarak beyaz renktedir ve durumları BSİZ'dir. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi 21 numaralı düğüm kök düğüm olarak seçildiğinde siyah rengi almaktadır. Kapsayan duruma geçen kök düğüm, kendi belirtecini (*ID*) ve *k* sayaç değişkenini  $k = 3$  olarak içeren SİYAH mesajını komşularına gönderir. Kök düğümden  $k = 3$  olacak şekilde SİYAH mesajı alan her bir komşu beyaz düğüm kendisini gri olarak kodlar, kendisinin kapsayan komşularını sakladığı SİYAHLİSTESİ'ni günceller, *k* sayaç değişkenini 1 azaltır ve SİYAH mesajını  $k = 2$  olacak şekilde komşularına gönderir.  $k = 2$  olacak şekilde SİYAH mesajı alan her bir komşu beyaz düğüm, kendisini sarı olarak kodlar, kendi SİYAHLİSTESİ'ni günceller ve *k* sayaç değişkenini bir azaltarak  $k = 1$  olacak şekilde SİYAH mesajını komşularına gönderir.  $k = 1$  olacak şekilde SİYAH mesajı alan her bir komşu beyaz düğüm kendisini turuncu olarak kodlar, kendi SİYAHLİSTESİ'ni günceller. Böylelikle, kök düğümden 3-atlama uzaklıkta yer alan düğümlere kadar renklendirme işlemi tamamlanmıştır. Şekil 4.9'da düğümlerin renk durumları gösterilmiştir.

Renklendirme işlemi bittiğinde turuncu olarak işaretlenmiş düğümler tarafından TURUNCUTEKLİF adında bir işlem başlatılır. Bu işlem, kazanan turuncu renkli düğümün siyah olarak işaretlendiği bir işlemdir ve turuncu renkli düğümlerin 1-atlama uzağında yer alan sarı renkli düğümler tarafından yürütülür. Turuncu düğümler turuncu olarak işaretlendikten sonra, belirtecini, seviyesini ve 3-atlama uzaklıkta yer alan siyah komşu sayısını içeren TURUNCUTEKLİF mesajını yayınlılar ve tüm sarı renkli komşularından bilgi mesajı beklerler. Turuncu renkli komşularından bu mesajı alan her bir sarı renkli düğüm ise, en düşük seviyedeki ve/veya en çok siyah komşuya sahip olan turuncu düğümü seçer. Sarı renkli düğümler seçtikleri turuncu düğümlerin belirtecini içeren BLG mesajı yayınlılar. Sarı renkli tüm komşularından BLG mesajlarını alan bir turuncu düğüm, kendisini siyah olarak işaretler ve kendi belirteci ile  $k$  sayacını  $k = 3$  olarak içeren SİYAH mesajı yayınlılar. Daha önce anlatılan sürece benzer olarak  $k = 3$  olacak şekilde SİYAH mesajı alan her bir komşu beyaz/turuncu/sarı renkli düğüm kendisi gri olarak işaretler, SİYAHLİSTESİ'ni günceller ve  $k$  sayacını 1 azaltarak  $k = 2$  olacak şekilde SİYAH mesajı yayınlılar.  $k = 2$  olacak şekilde SİYAH mesajı alan her bir komşu beyaz/turuncu düğüm kendisini sarı olarak işaretler, SİYAHLİSTESİ'ni günceller ve  $k$  sayacını bir azaltarak  $k = 1$  olacak şekilde SİYAH mesajı yayınlılar.  $k = 1$  olacak şekilde SİYAH mesajı alan beyaz bir düğüm kendisini turuncu olarak işaretler, SİYAHLİSTESİ'ni günceller ve gerekiyorsa yeni bir TURUNCUTEKLİF sürecini başlatır.

Şekil 4.9'da gösterilen 2, 7, 24 ve 25 numaralı turuncu düğümler sarı renkli komşuları tarafından seçilerek kendilerini siyah olarak işaretlemişlerdir. Bu durum sonrasında 1-atlama uzaklıkta yer alan komşuları 1, 6, 8, 9, 12, 18, 19, 22, 23 ve 26 numaralı düğümler Şekil 4.10'da gösterildiği gibi gri renk ile işaretlenmişlerdir.



Şekil 4.9: YKLBBK algoritmasında düğümlerin renk durumları.

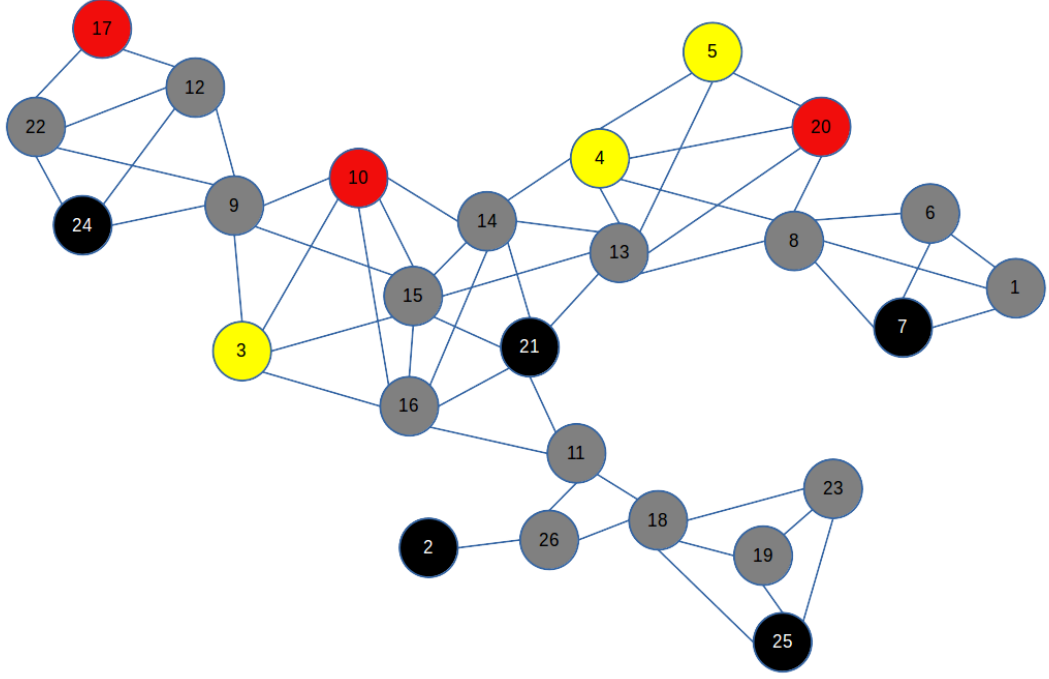


Şekil 4.10: YKLBBK algoritmasında TURUNCUTEKLİF işlemi sonrası.

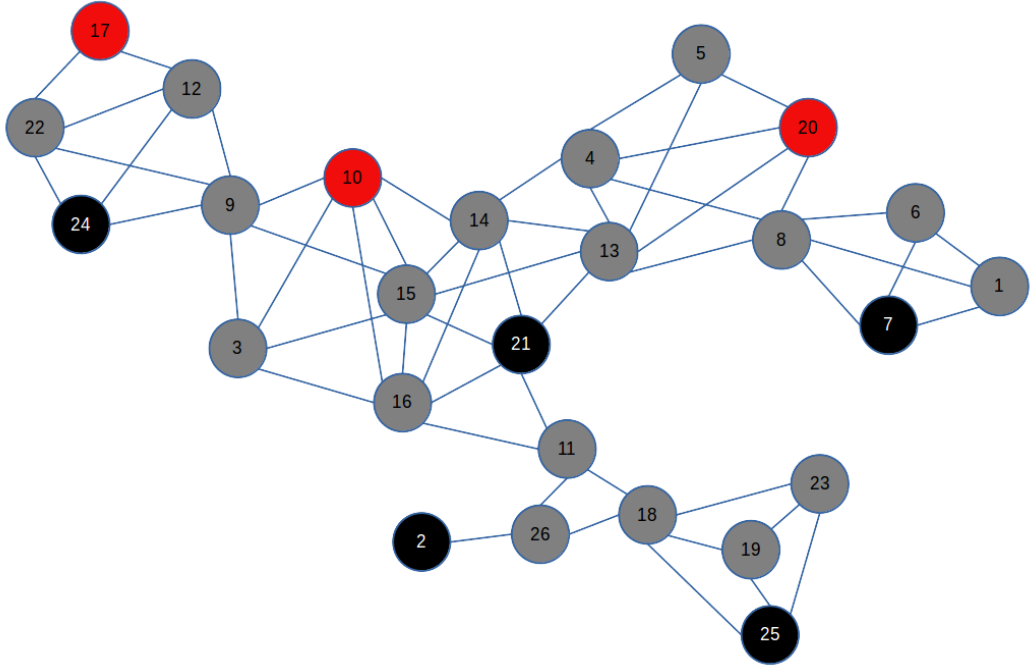


Bu aşamadan sonra sarı olarak işaretlenmiş düğümler tarafından, işlem sonunda kazanan sarı renkli düğümün kırmızı olarak işaretlendiği SARITEKLİF adında bir işlem başlatılır. Hiç sarı/turuncu/beyaz komşusu olmayan sarı renkli bir düğüm, teklif işlemi yapılmaksızın doğrudan kendisini kırmızı olarak işaretler. Hiç beyaz ya da turuncu komşusu bulunmayan her bir sarı renkli düğüm, düğümün belirteci ile 1-atlama uzaklıkta yer alan sarı renkli düğümlerin sayısını içeren SARITEKLİF mesajını yayımlar ve 1-atlama uzaklıkta yer alan sarı renkli komşu düğümlerden bilgi mesajı bekler. Sarı renkli bir komşusundan SARITEKLİF mesajını alan sarı renkli bir düğüm, en yüksek kapsamlı kazanan sarı renkli düğümün belirtecini içeren bir BLG bilgi mesajı yayımlar. 1-atlama uzaklıkta yer alan tüm sarı renkli komşu düğümlerden BLG mesajı alan sarı renkli bir düğüm, kendisini kırmızı olarak işaretler ve KIRMIZI mesajı yayımlar. KIRMIZI mesajı alan düğümler kendisini gri olarak işaretlerler ve 1-atlama uzaklıkta yer alan komşu düğümlerine YGRİ mesajı yayımlarlar. YGRİ mesajı alan her bir sarı renkli düğüm, teklif değerini yeniden hesaplar ve yeni SARITEKLİF mesajı yayımlar. Bu aşama hiçbir sarı renkli düğüm kalmayınca kadar tekrarlanır.

Şekil 4.10'da gösterilen 17 numaralı sarı renkli düğümün hiçbir sarı/turuncu/beyaz komşusu olmadığı için Şekil 4.11'de gösterildiği gibi teklif işlemine girmeden kendisini doğrudan kırmızı olarak işaretlemiştir. Diğer yandan, 3 ve 10 numaralı düğümler ile 4, 5 ve 20 numaralı düğümler kendi aralarında SARITEKLİF işlemi gerçekleştirirler. 10 numaralı düğüm ile 20 numaralı düğüm teklif işlemi sonucunda kazanan düğümler olduğu için kendilerini kırmızı renk ile işaretlerler. Bu durumda Şekil 4.12'de gösterildiği gibi 3, 4 ve 5 numaralı düğümler kendilerini gri olarak işaretlerler.

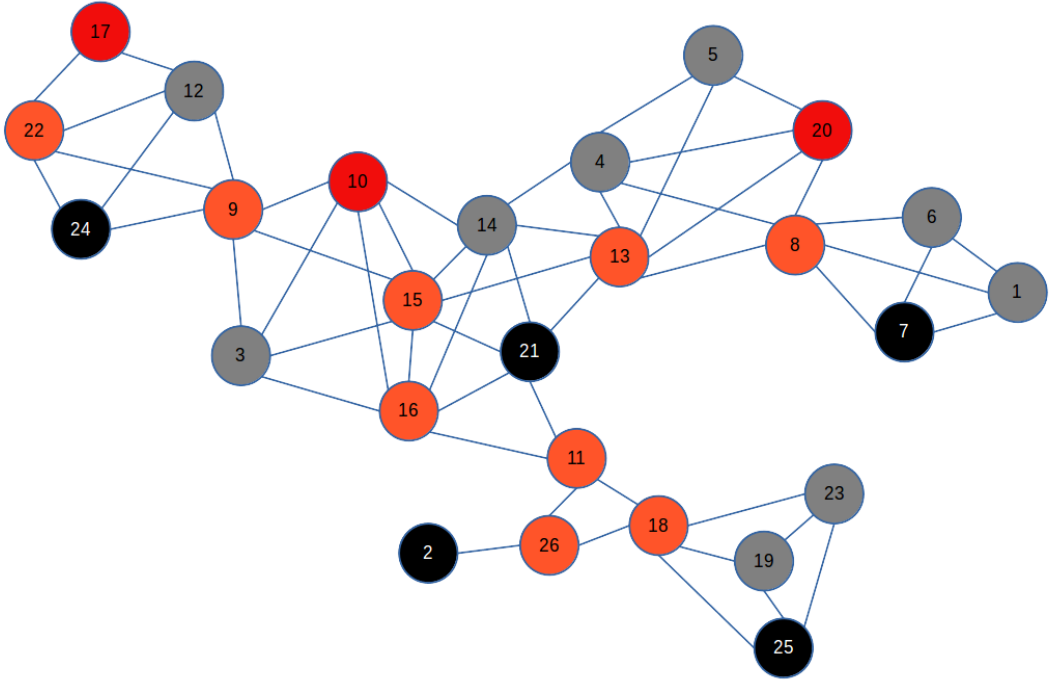


Şekil 4.11: YKLBBK algoritmasında SARİTEKLİF işlemi sonrası.

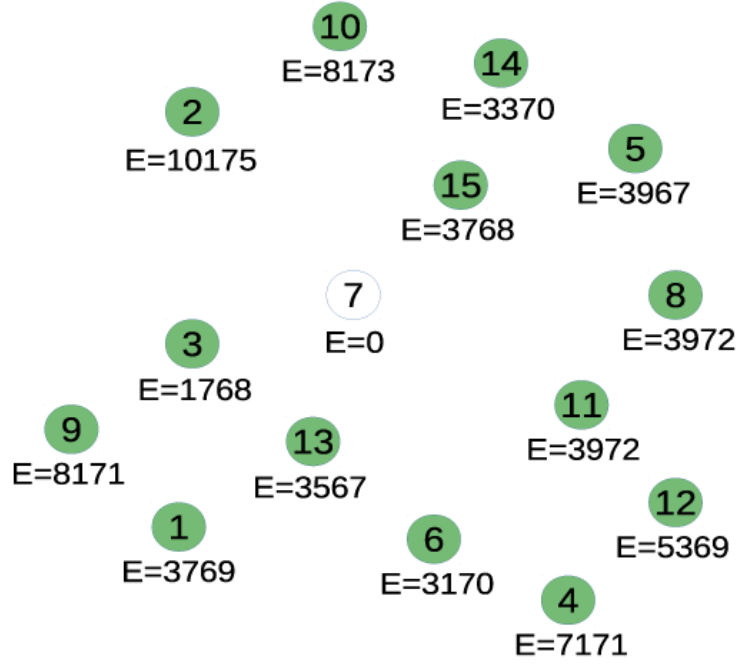


Şekil 4.12: YKLBBK algoritmasında kapsayan ve kapsanan düğümler.

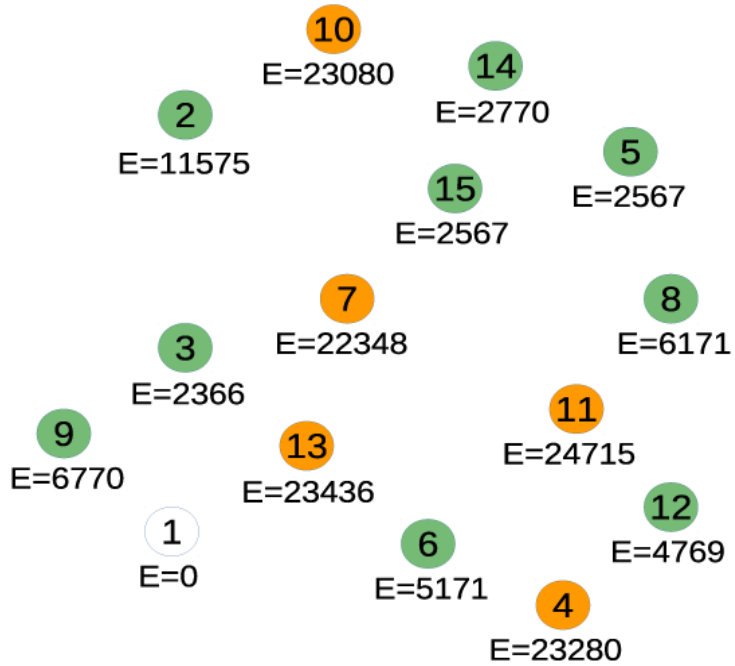
SARITEKLİF işleminin ardından ağ üzerinde hiçbir beyaz/turuncu/sarı renkli düğüm kalmamaktadır. Ağ üzerinde siyah, kırmızı ve gri olmak üzere sadece üç farklı renk bulunmaktadır. Siyah ve kırmızı renkli düğümler kapsayan, gri renkli düğümler ise kapsanan düğümlerdir. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi siyah renkteki 2, 7, 21, 24 ve 25 numaralı düğümler ile 10, 17 ve 20 numaralı kırmızı renkli düğümler kapsayan, geri kalan gri renkli düğümler kapsanan düğümlerdir. Böylece ağ üzerinde bir BK oluşturulmuştur. Şekil 4.13’te gösterildiği gibi, BK’da yer alan 2, 7, 10, 17, 20, 21, 24 ve 25 numaralı kapsayan düğümler, 8, 9, 11, 13, 15, 16, 18, 22 ve 26 numaralı kapsanan düğümlerin kapsayan düğüm olarak seçilmesi ile birbirlerine bağlanmış ve ağ üzerinde bir BBK oluşturulmuştur.



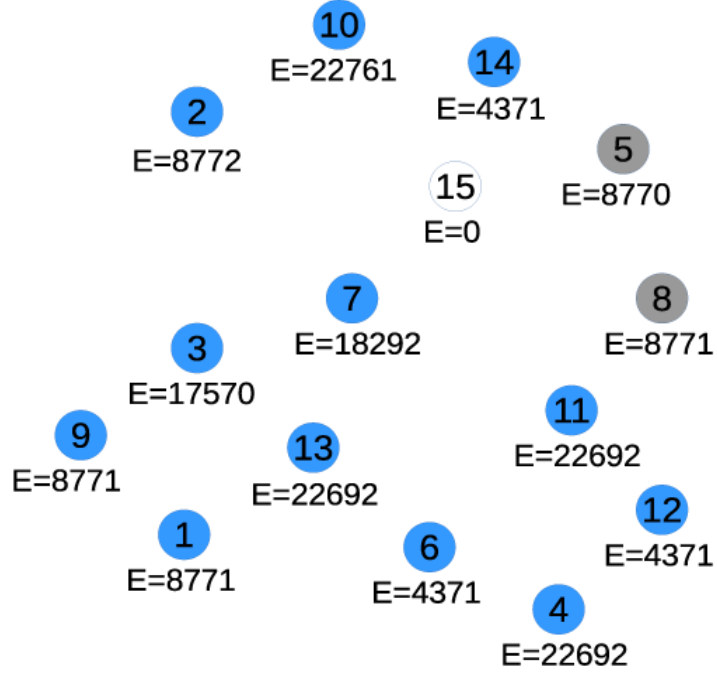
Şekil 4.13: Örnek bir TDA’da YKLBBK algoritmasıyla oluşturulan BBK.



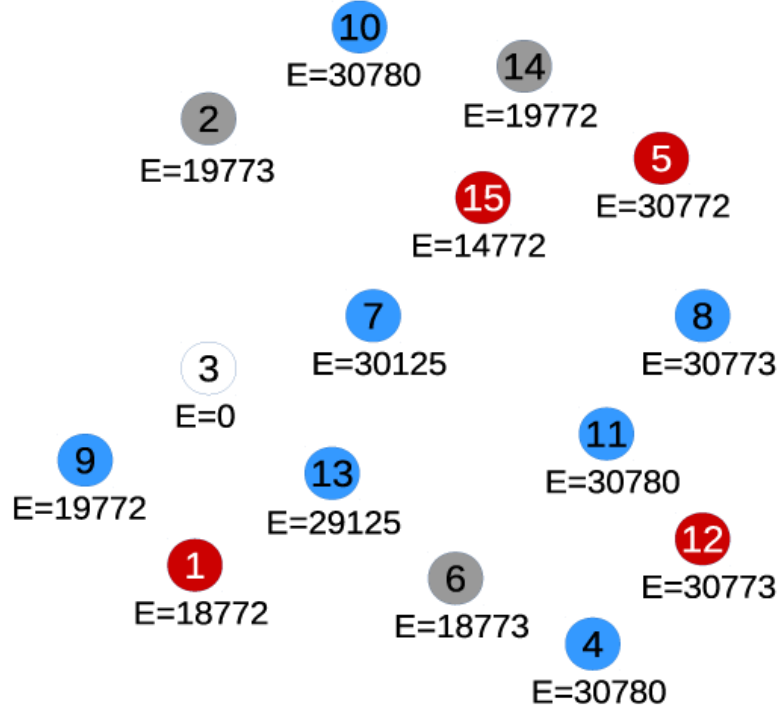
Şekil 4.14: Sel yöntemi kullanan örnek bir TDA.



Şekil 4.15: Sel yöntemi kullanan ve hasatçı düğümler içeren örnek bir TDA.



Şekil 4.16: YKLBBK algoritmasının örnek bir TDA’da gerçekleştirilmesi.



Şekil 4.17: GEHABBK algoritmasının örnek bir TDA’da gerçekleştirilmesi.

Şekil 4.14 ile gösterilen 15 adet sıradan düğümden oluşan, BBK yapısı bulunmayan ve sel yöntemi kullanılan örnek bir ağda 7 numaralı sıradan düğüm enerjisi ilk biten düğümdür. Ağın yaşam süresi, 7 numaralı düğümün enerjisi bitene kadar olan süre olarak hesaplandığında 20 dk. 52 sn. olarak ölçülmüştür. Şekil 4.15 ile gösterilen ve 5 adet enerji hasadı yapabilen düğüm ile 10 adet sıradan düğümün birlikte bulunduğu toplam 15 adet düğümden oluşan, BBK yapısı bulunmayan ancak sel yöntemi kullanılan örnek bir ağda 1 numaralı sıradan düğüm enerjisi ilk biten düğüm olmuştur. Ağ üzerinde yer alan 4, 7, 10, 11 ve 13 numaralı düğümler enerji hasadı yapabilen düğümler iken geri kalan düğümler sıradan düğümlerdir. Ağın yaşam süresi ise 21 dk. 49 sn. olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.16'da gösterilen 5 adet enerji hasadı yapabilen düğüm ile 10 adet sıradan düğüm olmak üzere toplam 15 adet düğümden oluşan, BBK yapısı bulunan ve YKLBBK algoritması kullanan örnek bir ağda 15 numaralı sıradan düğüm enerjisi ilk biten düğümdür. Ağ üzerinde yer alan 4, 7, 10, 11 ve 13 numaralı düğümler enerji hasadı yapabilen düğümler iken geri kalan düğümler sıradan düğüm olmak üzere, mavi renkli düğümler kapsayan düğüm, gri renkli düğümler ise kapsanan düğümlerdir. Ağın yaşam süresi ise 42 dk. 32 sn. olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.17'de gösterilen 5 adet enerji hasadı yapabilen düğüm ile 10 adet sıradan düğüm olmak üzere toplam 15 adet düğümden oluşan, BBK yapısı bulunan ve GEHABBK algoritması kullanan örnek bir ağda 3 numaralı sıradan düğüm enerjisi ilk biten düğümdür. Ağ üzerinde yer alan 4, 7, 10, 11 ve 13 numaralı düğümler enerji hasadı yapabilen düğümler iken geri kalan düğümler sıradan düğüm olmak üzere, mavi renkli düğümler kapsayan düğüm, gri renkli düğümler kapsanan düğüm ve kırmızı renkli düğümler ise GHS algoritması ile seçilmiş kapsayan düğümlerdir. Ağın yaşam süresi ise 51 dk. 43 sn. olarak ölçülmüştür.

Yukarıda bahsedilen sel tabanlı geleneksel yöntemler ile BBK yapısı kullanan YKLBBK ve GEHABBK algoritması, 15 düğümden oluşan aynı topolojiye sahip örnek bir TDA'da çevresel bir uygulamanın benzetim sonuçları alınarak karşılaştırılmıştır. Buna göre geliştirilen GEHABBK algoritmasının ağ yaşam süresi diğer yöntemlerde elde edilen yaşam süresine göre daha fazladır.

**Tablo 4.1:** Benzetim parametreleri.

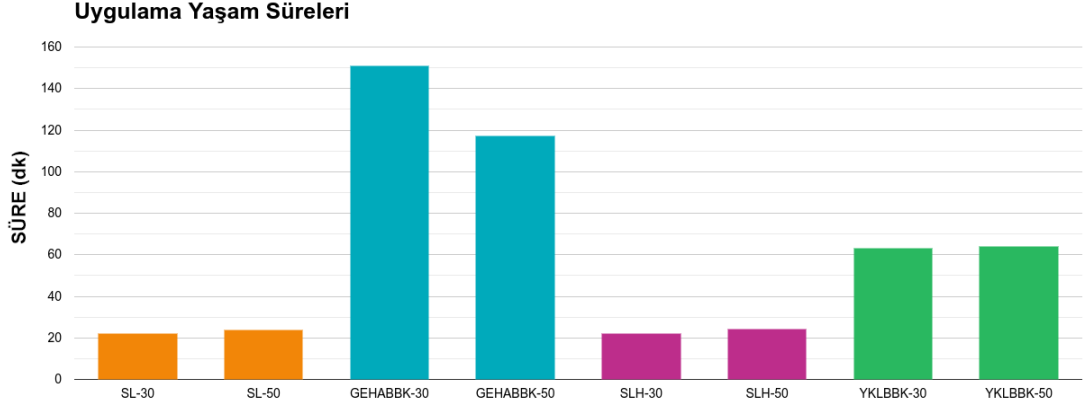
Ağ Modeli	Birim Çember Çizge Ortamı (UDGM)
Benzetim Ortamı	SensEH
Düğüm Tipi	Tmote Sky
Pil Tipi	Zn – MnO <sub>2</sub> Alkalin AA Pil
Düğümlerin Başlangıç Enerjisi	30780 J
Enerji Hasadı Kaynağı	Güneş Enerjisi
MAC Modeli	IEEE 802.15.4
Ağ Alanı	100 × 100 m <sup>2</sup>
İletim Uzaklığı	5 – 20 m
Düğüm Derecesi	1 – 4
Benzetimlerde Yer Alan Topoloji Sayısı	50
Hasatçı Düğüm Oranı	% 33.3
Düğüm Sayıları	SL-30, SLH-30, GEHABBK-30 ve YKLBBK-30 için 30 SL-50, SLH-50, GEHABBK-50 ve YKLBBK-50 için 50
Sıradan Düğüm Sayısı	SL-30 için 30 SL-50 için 50 SLH-30, GEHABBK-30 ve YKLBBK-30 için 20 SLH-50, GEHABBK-50 ve YKLBBK-50 için 33
Hasatçı Düğüm Sayısı	SL-30 ve SL-50 için 0 SLH-30, GEHABBK-30 ve YKLBBK-30 için 10 SLH-50, GEHABBK-50 ve YKLBBK-50 için 17

GEHABBK algoritması ile YKLBBK algoritması, aynı parametreler altında benzetimleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Tablo 4.1’de yer alan benzetim parametrelerine göre UGDM modeline sahip topolojilerin benzetimleri, SensEH benzetim ortamında 30 ve 50 düğümden oluşan iki farklı düğüm kümesi ile gerçekleştirilmiştir. Her iki küme için 50 farklı topoloji oluşturulmuştur. Her bir topolojide yer alan enerji hasadı yapabilen düğümler, tüm düğümlerin %33.3’ü olacak şekilde seçilmiştir. Her bir topolojide yer alan düğümler 100 m × 100 m alana rastgele konumlandırılmıştır. Düğümler arası iletim uzaklığı 5 m ile 20 m arasında değişmektedir. Bu iletim uzaklığına bağlı olarak, bir düğümün komşu sayısı olarak tanımlanan derecesi en fazla 4 olarak belirlenmiştir. Düğümlerin başlangıç enerjileri 30780 J’dür. Güneş enerjisi hasadından en iyi sonucu almak için tüm enerji hasadı yapabilen düğümlerin benzetim süresi boyunca çevresel alanda eşit derecede güneş ışığı alarak hasat yaptıkları varsayılmıştır. Bununla birlikte, enerji hasadı yapabilen düğümlerin yerel hesaplama ve iletişim gibi süreçlere bağlı olarak enerji harcamaları farklılık göstermektedir.

#### **4.2.5 GEHABBK Algoritması ile Diğer Yöntemlerden Elde Edilen Benzetim Sonuçlarının Analizi**

Elde edilen benzetim sonuçlarına göre ilk olarak SL, SLH, YKLBBK ve GEHABBK uygulamalarının ortalama etkin yaşam süreleri karşılaştırılmıştır. Tablo 4.2 ve Şekil 4.18 ile gösterildiği gibi, SL-30 algoritması 21.969 dk., SL-50 algoritması 23.686 dk., SLH-30 algoritması 22.225 dk., SLH-50 algoritması 24.093 dk., YKLBBK-30 algoritması 63.145 dk., YKLBBK-50 algoritması 64.034 dk. yaşam süresine sahipken, tez kapsamında geliştirilen GEHABBK-30 algoritması 151.032 dk. ve GEHABBK-50 algoritması 117.014 dk. yaşam süresine sahiptir.





**Şekil 4.18:** SL, SLH, YKLBBK ve GEHABBK algoritmalarının ortalama etkin yaşam süreleri.

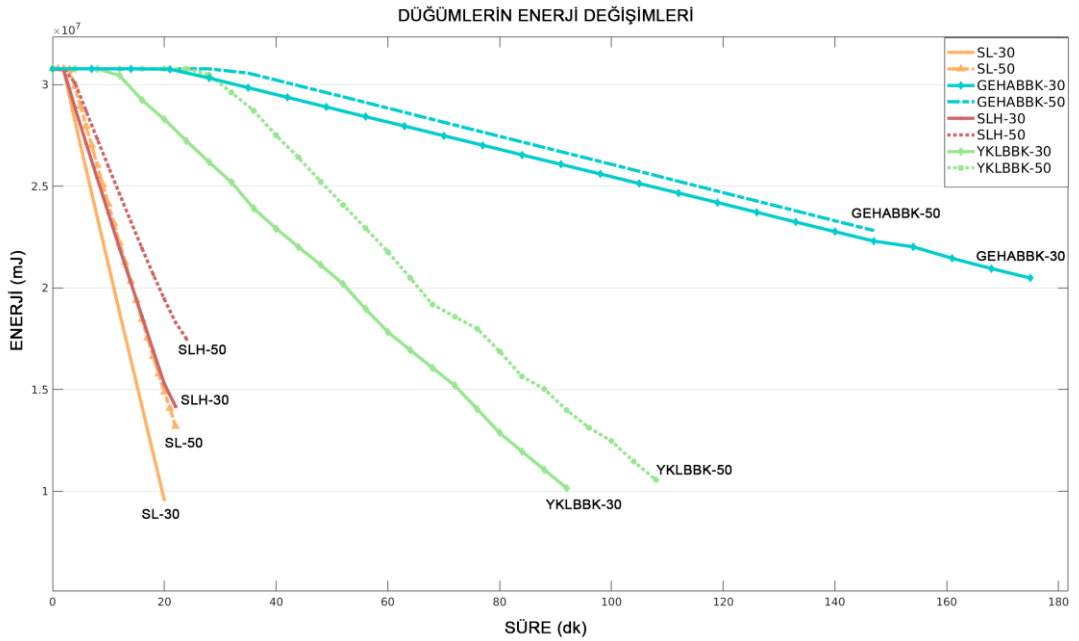
**Tablo 4.2:** Algoritmaların ortalama etkin yaşam süreleri.

Algoritma	Etkin Yaşam Süresi (dk)
SL-30	21.969
SL-50	23.686
SLH-30	22.225
SLH-50	24.093
YKLBBK-30	63.145
YKLBBK-50	64.034
GEHABBK-30	151.032
GEHABBK-50	117.014

Algoritmaların enerji tüketim oranlarından elde edilen ve Tablo 4.3'te yer alan verilere göre ise GEHABBK-30 algoritması, SL-30 algoritmasına göre %92, SLH-30 algoritmasına göre %90, YKLBBK-30 algoritmasına göre %49 daha az enerji harcamaktadır. Aynı verilere göre GEHABBK-50 algoritması, SL-50 algoritmasına göre %91, SLH-50 algoritmasına göre %89, YKLBBK-50 algoritmasına göre %59 daha az enerji harcamaktadır. Şekil 4.19'da uygulamalarda yer alan düğümlerin ortalama enerji değişimleri gösterilmektedir.

**Tablo 4.3:** Algoritmaların enerji tüketim oranları.

Algoritma	Enerji Tüketim Oranı (mJ / dk)
SL-30	1001301.461
SL-50	665528.611
SLH-30	754945.778
SLH-50	532066.451
YKLBBK-30	139562.193
YKLBBK-50	132718.010
GEHABBK-30	71012.934
GEHABBK-50	53813.839



**Şekil 4.19:** Düğümlerin enerji ortalamalarının zamanla değişim grafiği.

Tablo 4.4'te verilen BBK oluşturma aşamasında ise; YKLBBK-30 algoritması 31 dakikada 6245 mJ enerji harcayarak 0.000202 enerji oranı ile BBK oluştururken YKLBBK-50 algoritması 48 dakikada 11824 mJ enerji harcayarak

0.000384 enerji oranı ile BBK oluşturmaktadır. Öte yandan, GEHABBK-30 algoritması 26 dakikada 2805 mJ harcayarak 0.000091 enerji oranı ile BBK oluştururken, GEHABBK-50 algoritması ise 33 dakikada 3832 mJ harcayarak 0.00012 enerji oranı ile BBK oluşturmaktadır. Sonuç olarak, GEHABBK algoritması YKLBBK algoritmasına göre daha kısa sürede daha az enerji harcayarak BBK oluşturmaktadır. Şekil 4.20’de uygulamalarda yer alan düğümlerin harcadıkları ortalama enerji miktarları gösterilmektedir.

**Tablo 4.4:** GEHABBK ile YKLBBK algoritmalarının BBK oluşturma fazlarının karşılaştırılması.

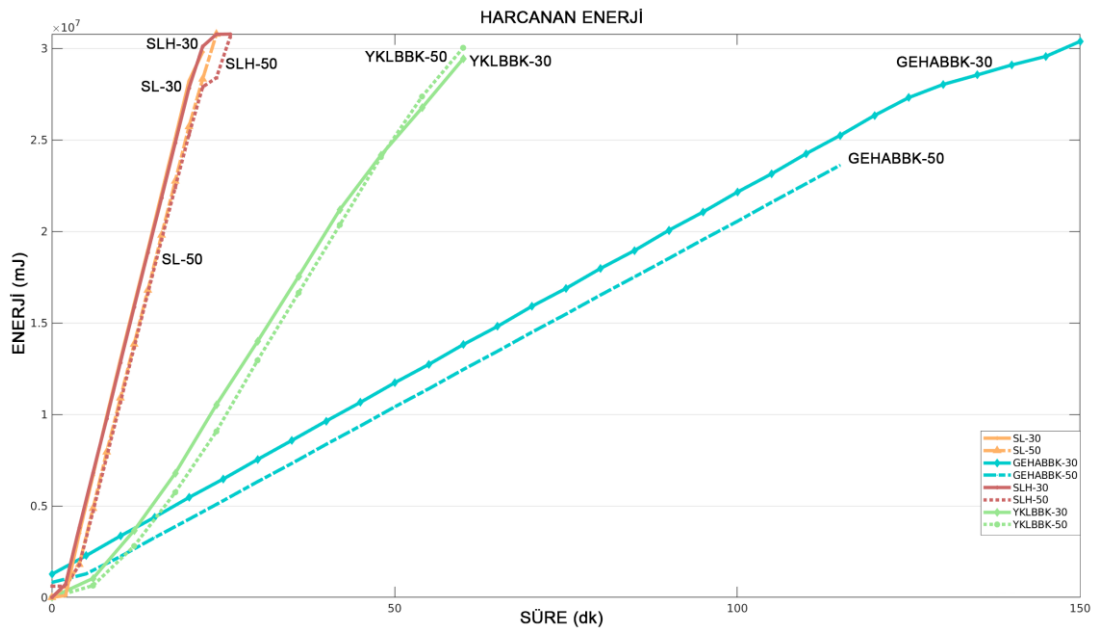
Algoritma	Süre	Harcanan Enerji	Enerji Oranı
GEHABBK-30	26 dk.	2805 mJ	0.000091
GEHABBK-50	33 dk.	3832 mJ	0.000120
YKLBBK-30	31 dk.	6245 mJ	0.000202
YKLBBK-50	48 dk.	11825 mJ	0.000384

**Tablo 4.5:** Diğer algoritmalar ile elde edilen etkin yaşam sürelerinin GEHABBK algoritması ile karşılaştırılması.

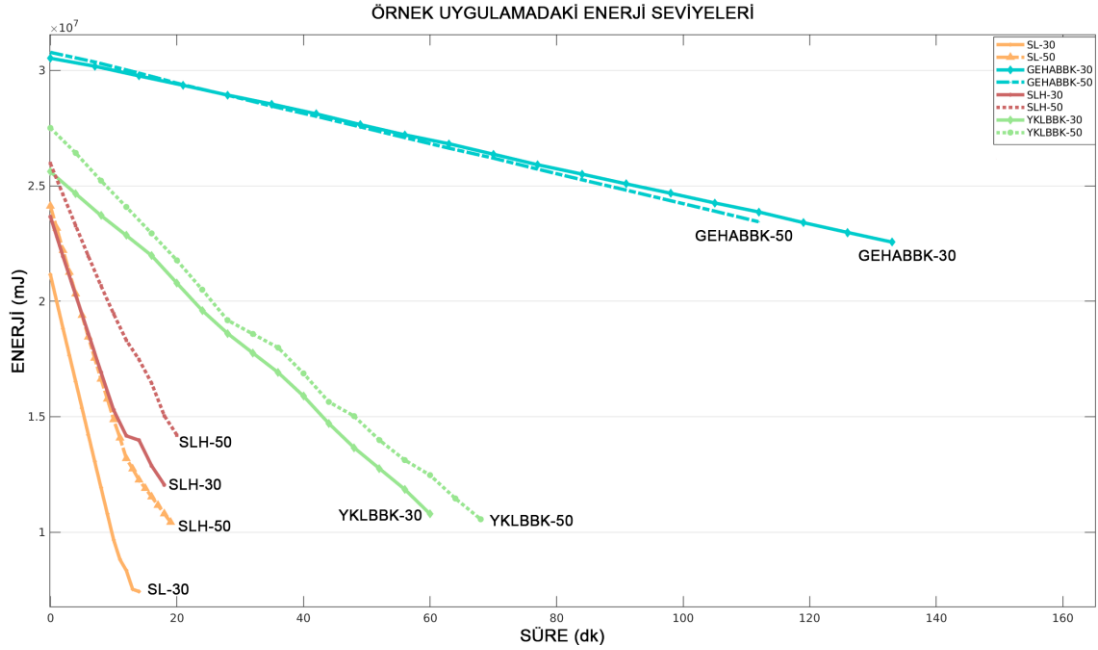
Algoritma	Etkin Yaşam Süresi Karşılaştırılması
SL-30	GEHABBK 6 kat daha uzun
SL-50	GEHABBK 4 kat daha uzun
SLH-30	GEHABBK 6 kat daha uzun
SLH-50	GEHABBK 4 kat daha uzun
YKLBBK-30	GEHABBK 1.4 kat daha uzun
YKLBBK-50	GEHABBK 0.8 kat daha uzun

Benzetim sonuçlarına göre tez kapsamında geliştirilen GEHABBK algoritması, her iki topoloji boyutunda da en yüksek ağ yaşam süresi elde etmektedir. Tablo 4.5'te gösterildiği gibi GEHABBK algoritması, SLH-30 ve SLH-50 algoritmalarına göre sırasıyla yaklaşık olarak 6 ve 4 kat daha etkin ağ yaşam süresi (BBK oluşturma süresi dâhil edilmeyen) vermektedir. Ek olarak GEHABBK algoritması, etkin ağ yaşam süresini YKLBBK algoritmasına göre 30 ve 50 düğümden oluşan topolojilerde sırasıyla 1.4 ve 0.8 kat daha artırmaktadır.

BBK oluşturan GEHABBK ve YKLBBK algoritmaları BBK oluşturmayan sel tabanlı algoritmalarından üstün olsa da, BBK oluşturmak için daha çok zaman ve ek enerji harcamasına ihtiyaç duymaktadır. 30 ve 50 düğüme sahip ağların BBK oluşturulma fazında harcanan enerji uygulamanın tümünde harcanan enerji sırasıyla %0.0091 ile %0.012'sine tekabül ederken, BBK fazında geçen zaman ise uygulamanın tümünde geçen zamanın sırasıyla %14 ile %16'sına tekabül etmektedir. Buna rağmen YKLBBK algoritması, 30 ve 50 düğümden oluşan ağların BBK oluşturma aşamasında sırasıyla %33 ve %43 zaman harcamaktadır. Dahası, 30 ve 50 düğüme sahip ağlarda YKLBBK algoritmasının BBK oluşturulma fazı, yaklaşık olarak tüm enerji harcamasının sırasıyla %0.02 ve %0,038'ine tekabül etmektedir.



Şekil 4.20: Düğümlerin zamanla harcadıkları ortalama enerji miktarları.



Şekil 4.21: Örnek uygulamadaki ortalama enerji seviyeleri.

### 4.3 İyileştirilmiş GEHABBK Algoritması

TDA’da yer alan tüm düğümler GEHABBK algoritmasında çevresel örnek uygulamayı çalıştırırken, Şekil 4.21 ile verilen grafikte ortalama enerjilerinin tamamen tükenmediği açıkça görülmektedir. Bir başka deyişle, ağ üzerinde enerjisi ilk biten düğüm ile ağın yaşam süresi hesaplanırken, ağ üzerinde hâlâ yüksek enerjiye sahip düğümler bulunmaktadır. Her ne kadar GEHABBK algoritması ağın yaşam süresini oldukça artırmış olduğu kanıtlanmış olsa da ağ üzerinde yer alan düğümlerin kalan enerjilerinden daha fazla yararlanarak ağın yaşam süresini artırmak için BBK’ya seçilecek düğümler ile ilgili bir takım iyileştirmelerin yapılabileceği görülmüştür.

Bu nedenle GEHABBK algoritmasında yer alan sıradan düğümlerin ağırlık değerleri ile hasatçı düğümlerin eşik değerleri, algoritmada verilen ağırlık hesaplamalarından daha farklı şekilde modellenerek GEHABBK algoritmasının iyileştirilmiş hali elde edilmiştir. Bu sayede teorik olarak, ağ üzerinde BBK iletişim omurgasının daha az düğümlerle oluşturulması, ağın yaşam süresinin uzatılması, örnek

çevresel uygulamaya daha uzun sürenin ve daha fazla enerjinin ayrılması sağlanmıştır. Bu yeni algoritmaya da İyileştirilmiş GEHABBK algoritması adı verilmiştir.

#### 4.3.1 İyileştirilmiş GEHABBK Algoritmasının Sıradan Düğüm İçin Geliştirilen Ağırlık Hesaplaması

İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasında yer alan bir  $m$  düğümü eğer sıradan bir düğüm ise, komşularından aldığı komşuluk listesi, kalan enerji miktarı ve enerji hasadı yapabilme durumunu içeren mesaja göre kendi ağırlık oranını hesaplamaktır. Bu hesaba göre sıradan bir  $m$  düğümüne ait ağırlık oranı Denklem (4.4) ile açıklanabilir;

$$\omega_m = \frac{e_m \times |I_m|}{\sum \left( \frac{|r_{el}|}{\sqrt{e_E}} \times (|I_e \setminus I_m| + 1) \right) + |U(I_o \setminus I_m | \forall o \in \Gamma_m)| + \sum \{|E_o \setminus E_m\} | \forall o \in \Gamma_m| + 1} \quad (4.4)$$

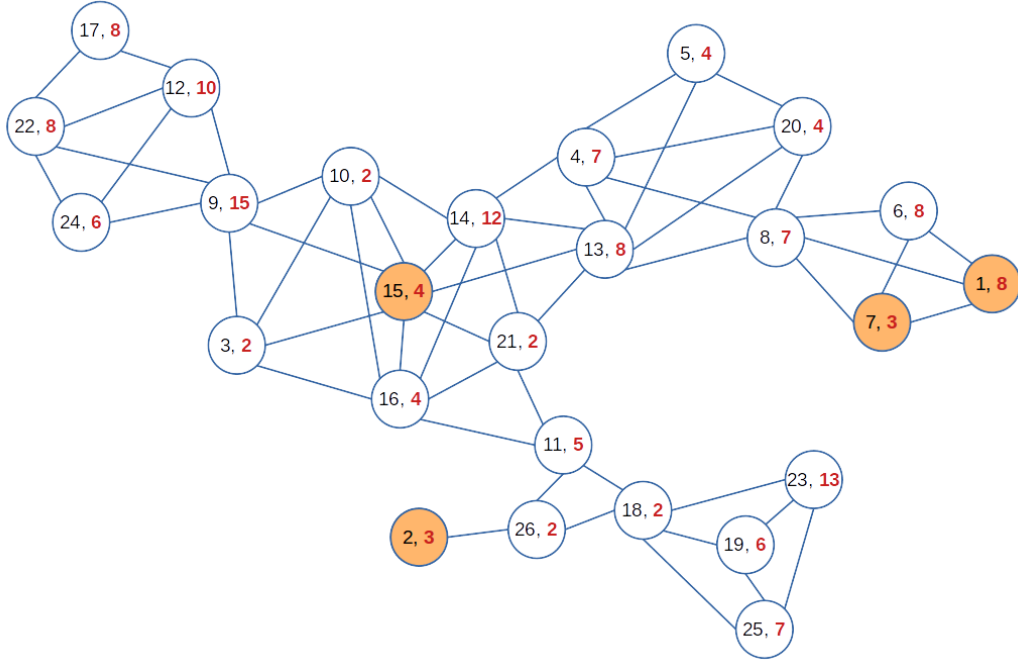
(4.4) denkleminde,  $\omega_m$  ağırlık oranı olmak üzere,  $e_m$  ilgili sıradan düğümün kalan enerjisi ve  $|I_m|$  ise sıradan düğümün BSİZ durumdaki komşu sayısını belirtmektedir.

(4.4) denkleminde ilk kısım olan  $\sum \frac{|r_{el}|}{\sqrt{e_E}} \times (|I_e \setminus I_m| + 1)$  toplamı, sıradan bir düğümün eğer enerji hasadı yapabilen komşuları var ise kendisinin KSYN düğüm olarak seçilmemesi için gereken parametreleri içermektedir.

İkinci kısımdaki  $|U(I_o \setminus I_m | \forall o \in \Gamma_m)|$  birleşim değeri, ilgili sıradan  $m$  düğümünün sıradan komşularının BSİZ durumdaki sıradan komşularına göre farklı komşularının sayısı ne kadar çok ise BBK daha az düğüm ile oluşabileceğinden,  $m$  düğümünün seçilmemesini sağlayan etkenler içermektedir.

Üçüncü kısımdaki  $\sum \{|E_o \setminus E_m\} | \forall o \in \Gamma_m|$  toplamı, ilgili sıradan bir  $m$  düğümünün, sıradan komşularının farklı enerji hasadı yapabilen komşuları var ise bunların farklarının alınması ile  $m$  düğümünün KSYN olarak seçilmemesini sağlayan etkenlerden oluşmaktadır.

$\sum \frac{|\Gamma_e|}{\sqrt{e_E}} \times (|I_e \setminus I_m| + 1)$  ile gösterilen değer, ilgilenilen sıradan düğümün enerji hasadı yapabilen komşusuna ait komşuluk kümesindeki BSİZ durumdaki sıradan düğümlerin kümesinin, sıradan düğümün BSİZ durumdaki komşuluk kümesinden farkının sayısı ile enerji hasadı yapabilen komşu düğümünün komşuluk sayısının kalan enerjisinin kareköküne oranının çarpımlarının toplamıdır.



Şekil 4.22: 26 adet düğümden oluşan örnek bir TDA yapısı.

Şekil 4.22’de toplam 26 adet düğümden oluşan örnek bir TDA verilmiştir. Bu TDA’da, turuncu renk ile gösterilen 1, 2, 7 ve 15 numaralı düğümler hasatçı düğüm, geriye kalan 22 adet düğüm ise sıradan düğümdür. Düğümlerin içerisinde yer alan ilk sayı düğüm belirtecini (*ID*), kırmızı renk ile gösterilen ikinci sayı ise düğümün ağırlığını göstermektedir.

Şekil 4.22 ile verilen örnek TDA’da yer alan 8 numaralı sıradan düğüm için bu değer, Şekil 4.23’te A ile gösterilen 7 numaralı enerji hasadı yapabilen komşu düğüm için  $(\frac{3}{\sqrt{3}} \times 1)$ , Şekil 4.23’te B ile gösterilen 1 numaralı enerji hasadı yapabilen komşu düğüm için  $(\frac{3}{\sqrt{8}} \times 1)$ ’dir. Bu iki değer toplamı ise 2.792’dir.

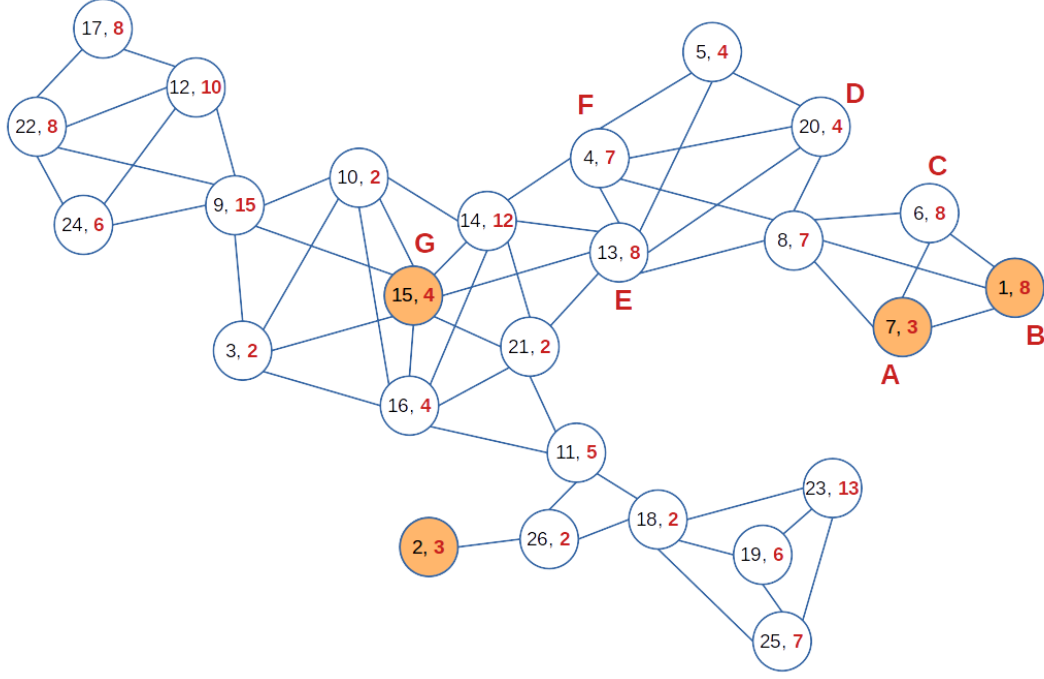
$|U(I_o \setminus I_m | \forall o \in \Gamma_m)|$  ile gösterilen değer, ilgilenilen BSİZ durumdaki sıradan bir düğümün sıradan düğüm komşularının komşuluk kümesinin, kendi

komşuluk listesinden farkının birleşimidir. Bu hesaplamada komşu bir düğümün komşuluk listesi ele alınırken sıradan bir düğüm bir kez sayılmış ise diğer sıradan bir düğümün komşuluk listesi ele alınırken sayılmış olan düğüm bir defa daha sayılmamaktadır.

Şekil 4.22 ile verilen örnek TDA'da yer alan 8 numaralı sıradan düğüm için bu değer, Şekil 4.23'te C ile gösterilen 6 numaralı sıradan düğümde elde edilen 0 değerinin, Şekil 4.23'te D ile gösterilen 20 numaralı sıradan düğümde elde edilen 1 değerinin, Şekil 4.23'te E ile gösterilen 13 numaralı sıradan düğümde elde edilen 2 değerinin ve Şekil 4.23'te F ile gösterilen 4 numaralı sıradan düğümde elde edilen 0 değerinin toplamı olan 3 değeridir. Bu hesaplamada, 20 numaralı komşu düğümün 8 numaralı ilgili düğümde farklı komşusu 5 numaralı düğümdür. Aynı şekilde 5 numaralı düğüm 13 numaralı düğümün farklı komşularından birisidir. Bu nedenle 5 numaralı düğüm algoritmada sadece bir defa sayılmaktadır.

$\sum |\{E_o \setminus E_m\}| \forall o \in \Gamma_m$  ile gösterilen değer ilgilenilen sıradan bir düğümün sıradan komşularının kendisine göre enerji hasadı yapabilen farklı komşularının sayısıdır. Örneğin, Şekil 4.22 ile verilen örnek TDA'da yer alan 18 numaralı sıradan düğümün 26 numaralı sıradan komşu düğümünün 2 numaralı enerji hasadı yapabilen bir komşusu vardır. Dolayısıyla, 18 numaralı düğüm için bu değer 1'dir. Şekil 4.22 ile verilen örnek TDA'da yer alan 8 numaralı sıradan düğümün ise 1 ve 7 numaralı enerji hasadı yapabilen komşu düğümleri olmasına rağmen, 6 numaralı sıradan komşusunun da aynı enerji hasadı yapabilen düğümlere komşuluğu vardır. Bu nedenle hem 6 hem de 8 numaralı sıradan düğümler için bu değer 0 olarak hesaplanır. Ancak 8 numaralı sıradan düğümün Şekil 4.23'te E ile gösterilen 13 numaralı sıradan komşusunun, Şekil 4.23'te G ile gösterilen 15 numaralı enerji hasadı yapabilen komşusu kendisine komşu olmadığı için bu değer 1 olarak hesaplanmaktadır.





**Şekil 4.23:** İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasında 8 numaralı sıradan düğümün ağırlık oranı hesabı.

Şekil 4.23 ile gösterilen örnek bir TDA’da yer alan 8 numaralı sıradan düğüm için ağırlık oranı, Denklem (4.5) ile gösterilen sıradan düğümler için geliştirilmiş formül kullanılarak, Denklem (4.6)’dan elde edildiği üzere 3.593 olarak hesaplanır.

$$\omega_m = \frac{e_m \times |I_m|}{A + B + C + D + E + F + G + 1} \quad (4.5)$$

$$\omega_m = \frac{7 \times 4}{\left(3 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1\right) + \left(3 \times \frac{1}{\sqrt{8}} \times 1\right) + (0 + 1 + 2 + 0) + 1 + 1} = 3.593 \quad (4.6)$$

### 4.3.2 İyileştirilmiş GEHABBK Algoritmasının Enerji Hasadı Yapabilen Hasatçı Düğümler İçin Geliştirilen Ağırlık Hesaplaması

İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasında yer alan bir düğüm eğer enerji hasadı yapabilen (HASATÇI) bir düğüm ise komşularından aldığı komşuluk listesi, kalan enerji miktarı ve enerji hasadı yapabilme durumunu içeren mesaja göre kendi ağırlık oranını hesaplamaktır. Bu hesaba göre ağırlık oranı Denklem (4.7) ile gösterilmektedir.

$$\omega_m = \frac{e_m \times |I_m|}{\{n \mid n \in E_{aktif} \& t_n > eşikdeğeri_m\}} \quad (4.7)$$

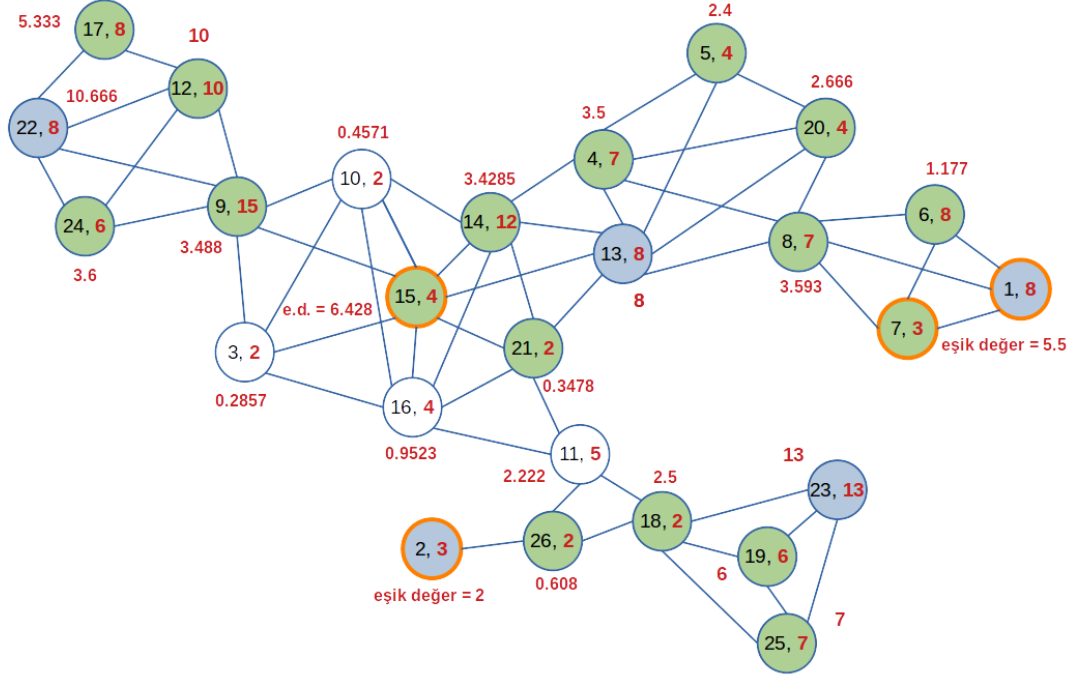
Denklem (4.7)'ye göre,  $\omega_m$  ağırlık oranı olmak üzere,  $e_m$  ilgili enerji hasadı yapabilen düğümün kalan enerjisini,  $|I_m|$  ise hasatçı düğümün SRDN-BSİZ komşu sayısını belirtmektedir. Algoritmaya göre eğer enerji hasadı yapabilen bir düğümün başka enerji hasadı yapabilen komşu düğümleri varsa bu düğümlerin enerjilerinin ortalaması, eğer hiçbir hasatçı komşusu yok ise sıradan komşu düğümlerin enerji ortalaması alınarak bir eşik değeri belirlenir. İlgili enerji hasadı yapabilen düğümün enerjisi bu eşik değerinden büyük ise düğüm KSYN düğüm olarak seçilir.

Şekil 4.22 ile verilen örnek TDA'da 1 ile 7 numaralı enerji hasadı yapan düğümler komşudur. Bu nedenle  $eşikdeğeri_1 = eşikdeğeri_7 = \frac{3+8}{2} = 5.5$  olarak hesaplanır. Bu aşamada 7 numaralı hasatçı düğümün enerjisi eşik değerinden küçüktür. 1 numaralı hasatçı düğümün enerjisi eşik değerinden büyük olduğu için 1 numaralı düğüm KSYN olarak seçilir. Benzer şekilde 15 numaralı enerji hasadı yapabilen düğümün hiçbir enerji hasadı yapabilen komşusu yoktur. Bu düğüm için eşik değeri sıradan komşu düğümlerinin enerji ortalaması olan  $eşikdeğeri_{15} = \frac{15+2+12+8+2+4+2}{7} = 6.428$  olarak hesaplanır. Bu değer 15 numaralı düğümün enerjisinden büyük olduğu için ilgili enerji hasadı yapabilen düğüm KSYN düğüm olarak seçilmez. TDA'da yer alan 2 numara enerji hasadı yapabilen düğümün bir tek sıradan komşu düğümü vardır ve eşik değeri kendi enerjisinde düşüktür. Bu nedenle 2 numaralı düğüm KSYN düğüm olarak seçilir.

### 4.3.3 Örnek Bir TDA Üzerinde GEHABBK, İyileştirilmiş GEHABBK ve Dağıtık LMW Algoritmaların Karşılaştırması

Geliştirilen GEHABBK algoritması ve İyileştirilmiş GEHABBK algoritması ile temel alınan Shi ve diğ. (2017)'nin geliştirdiği dağıtık LMW algoritması, örnek bir TDA üzerinde teorik olarak ilk fazları karşılaştırılmıştır. Alınan sonuçlara göre Shi ve diğ. (2017) tarafından geliştirilen dağıtık LMW algoritmasının SensEH benzetim ortamında gerçekleştirilmesi ile 4 adet enerji hasadı yapabilen ve 22 adet sıradan düğüm olmak üzere toplam 26 adet düğüm içeren bir TDA için, algoritmanın

ilk fazında 9 adet düğüm KSYN düğüm olarak seçilmiştir. Yine aynı TDA kullanılmak üzere, tez kapsamında geliştirilen GEHABBK algoritması ve İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasında da ilk fazda 9 adet düğüm seçilmiştir.

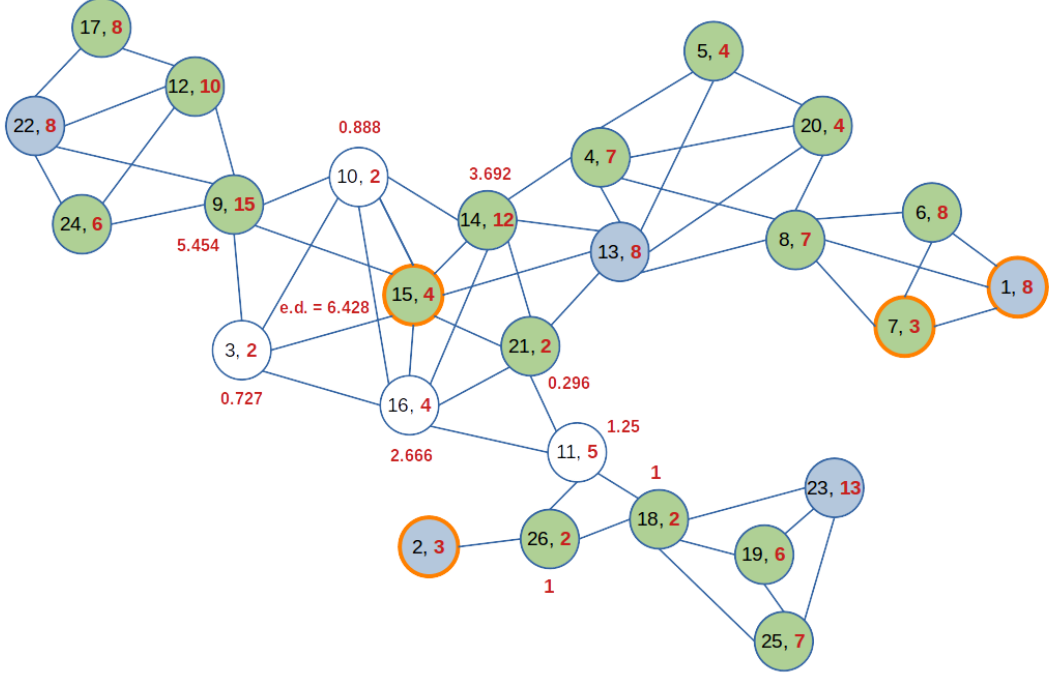


**Şekil 4.24:** İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazının ilk turu sonucunda hesaplanan düğümlerin ağırlık oranları.

Şekil 4.24'te İyileştirilmiş GEHABBK algoritması ile örnek TDA'da her bir düğüme ait hesaplanan ağırlık oranları belirtilmiştir. Turuncu renkteki hasatçı düğümler için ağırlık oranı hesaplanırken öncelikle bir eşik değer hesaplanır. Eşik değer, enerji hasadı yapabilen bir düğümün kendisinden başka enerji hasadı yapabilen komşu düğümleri varsa bu düğümlerin enerji ortalamalarına, eğer yoksa sıradan komşu düğümlerin enerji ortalamalarına eşit alınır. Enerji hasadı yapabilen düğümün enerji seviyesi bu eşik değerden büyük ise düğüm KSYN olarak seçilmektedir. Bu durumda 1 ve 2 numaralı enerji hasadı yapabilen düğümler KSYN olarak seçilirken 7 ve 15 numaralı düğümler seçilememiştir. Örnek TDA'da KSYN seçilen düğümler ise 1, 2, 13, 22 ve 23 numaralı düğümlerdir. 4, 5, 6, 8, 9, 12, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26 numaralı diğer düğümler KSNN düğümlerdir.

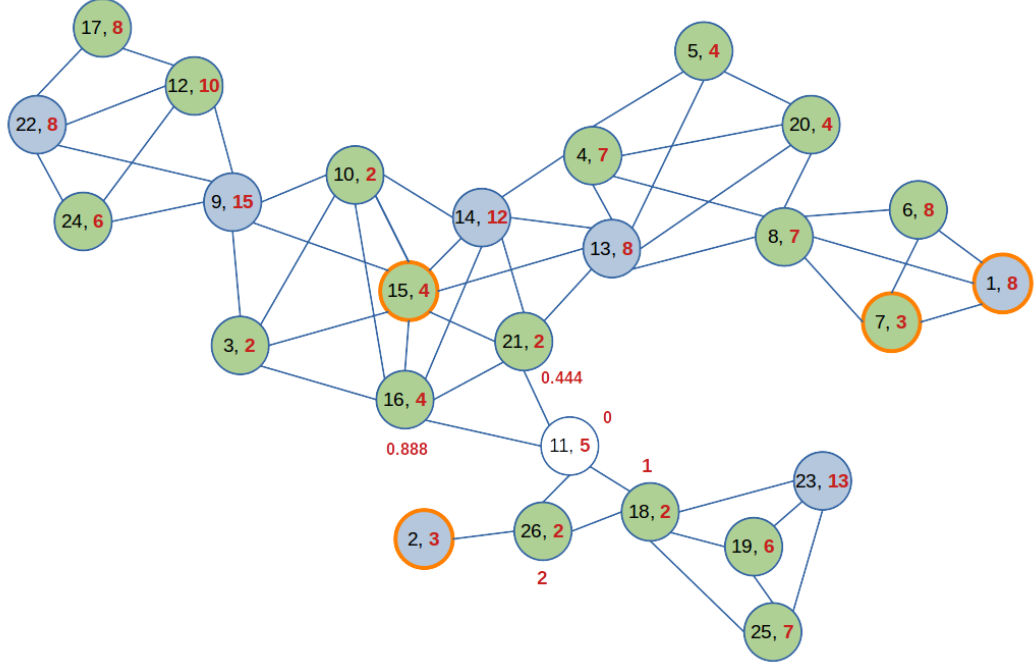
İlk tur bittiğinde çizge üzerinde hâlâ BSİZ durumda düğümler bulunmaktadır. BSİZ durumdaki 3, 10, 11 ve 16 numaralı düğümler için ikinci tur başlatılır. İkinci

tura durumu ne olursa olsun en az bir BSİZ komşuya sahip düğümler ile BSİZ durumdaki düğümler katılmaktadır. Bu nedenle ikinci tura 3, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 18, 21 ve 26 numaralı düğümler katılacaktır.



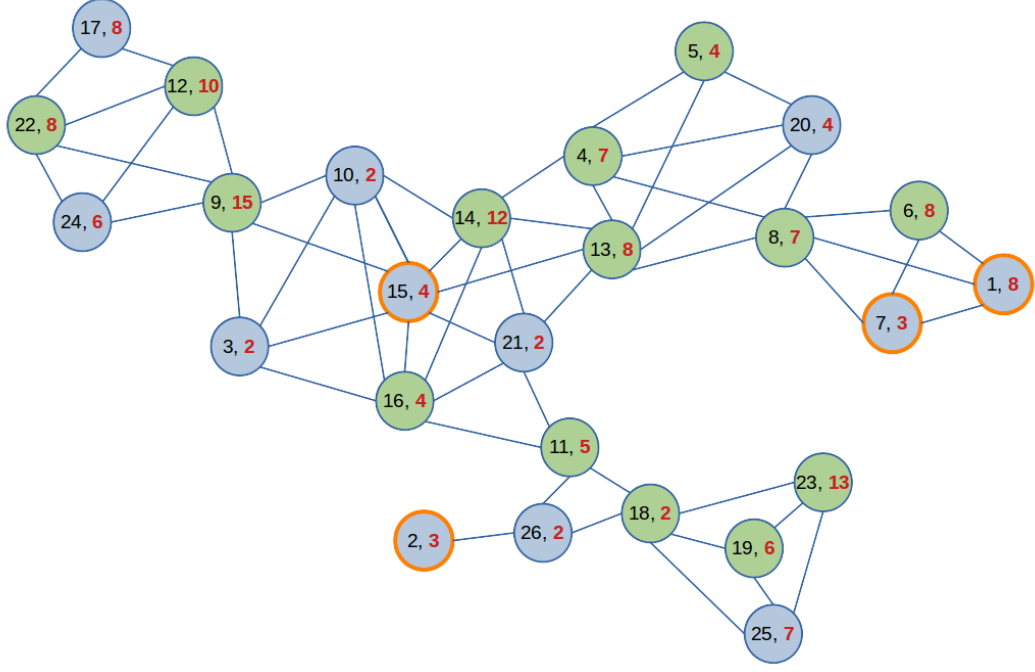
**Şekil 4.25:** İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazının 2. turu sonucunda hesaplanan düğümlerin ağırlık oranları.

Şekil 4.25 ile gösterilen ikinci turda enerji hasadı yapabilen 15 numaralı düğüm için eşik değeri 6.428 olarak hesaplanır ve bu değeri kendi ağırlığından büyük olduğu için düğüm KSYN olarak seçilmez. İkinci turda 9 ve 14 numaralı düğüm KSYN olarak seçilir, komşuları olan 3, 10, 15 ve 16 numaralı düğümlerin durumu KSN olarak güncellenir. İkinci tur sonunda sadece 11 numaralı düğüm BSİZ olarak kalmaktadır. Bu durumda üçüncü tur başlatılır.

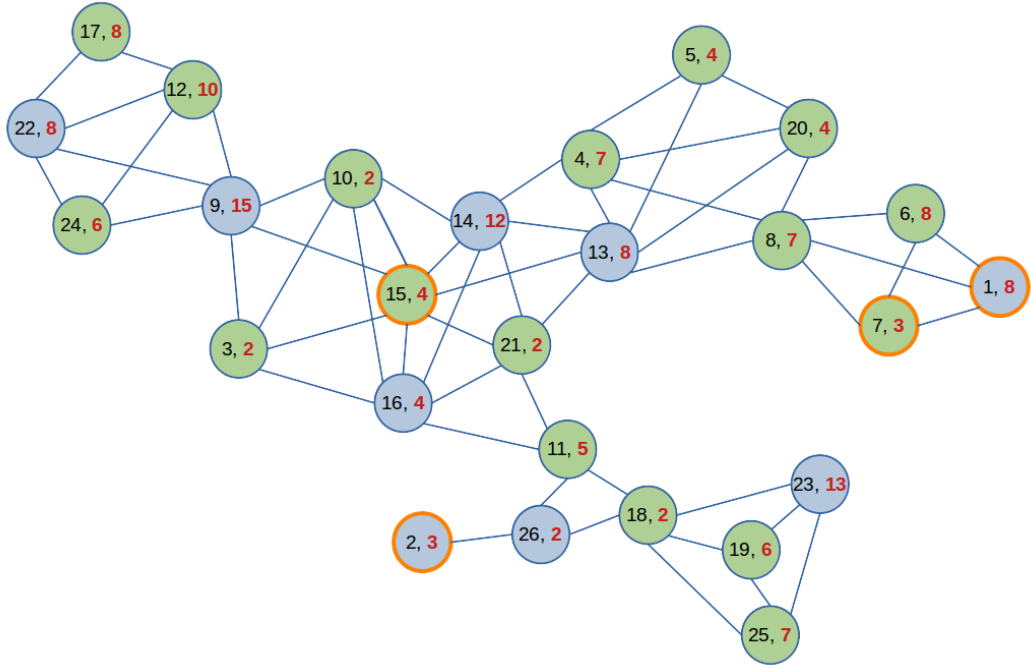


**Şekil 4.26:** İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazının 3. turu sonucunda hesaplanan düğümlerin ağırlık oranları.

Şekil 4.26 ile gösterilen üçüncü tura ise 11, 16, 18, 21 ve 26 numaralı düğümler katılarak 16 ve 26 numaralı düğümler KSYN, diğer düğümler KSNN olarak seçilmiştir. Üçüncü turun sonunda ağ üzerinde hiçbir BSİZ durumda düğüm kalmadığı için ilk faz sona erdirilir. Sonraki fazlarda ise KSYN olarak seçilen düğümleri bağlamak için KSNN düğümlerin durumları GHS yöntemi ile KSYN olarak güncellenecektir. Böylece ağ üzerinde bir BBK oluşturulacaktır. Şekil 4.27’de Shi ve diğ. (2017)’nin geliştirdiği dağıtık LMW algoritması ile oluşturulan BK, Şekil 4.28’de İyileştirilmiş GEHABBK algoritması ile örnek bir TDA üzerinde oluşturulan BK gösterilmektedir.

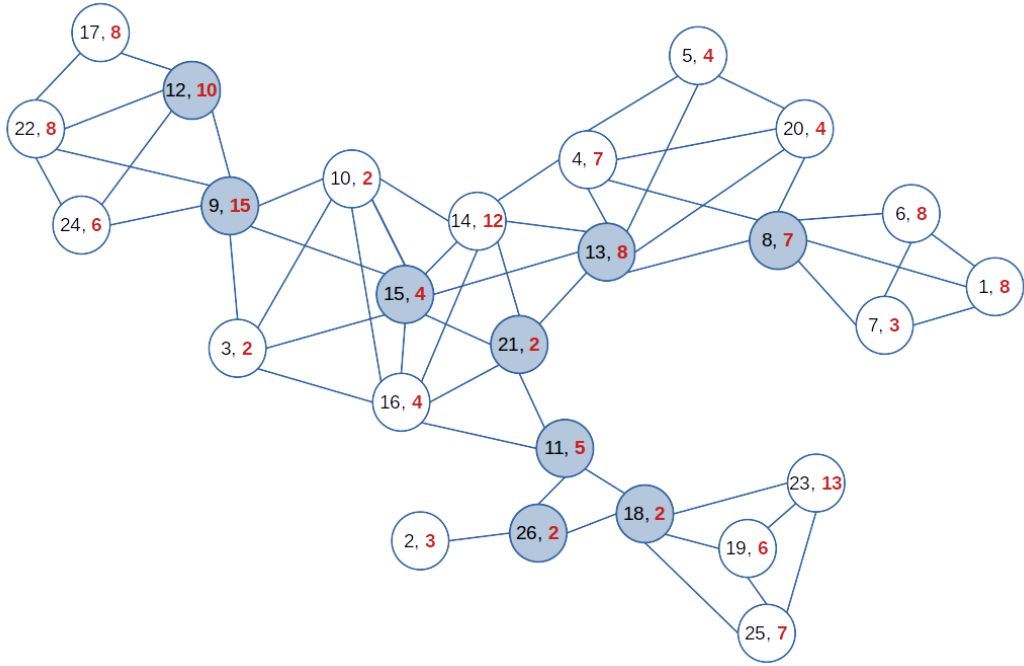


Şekil 4.27: Dağıtık LMW algoritmasının ilk fazında oluşan örnek bir BK.

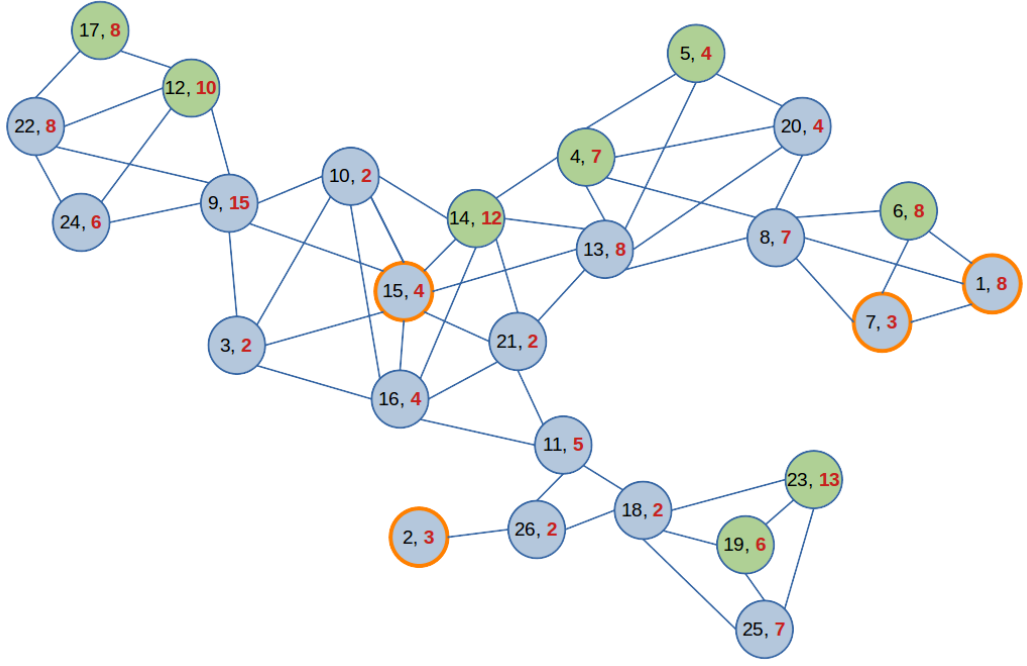


Şekil 4.28: İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasının ilk fazında oluşan örnek BK.

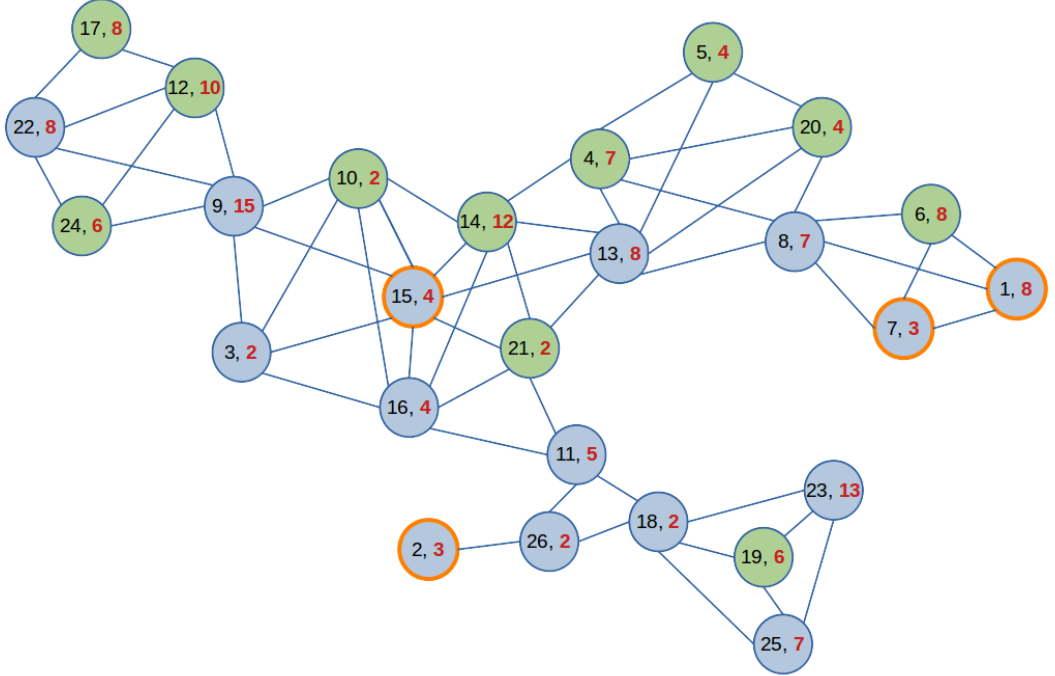
Şekil 4.29’da gösterildiği gibi örnek olarak alınan TDA’da en uygun koşulda 9 adet düğüm ile bir BBK oluşturulabilmektedir. Şekil 4.30’da gösterilen dağıtık LMW algoritmasında ise, tüm fazların sonucunda BBK oluşturmak için seçilen düğüm sayısı 16 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, Şekil 4.31’de gösterilen GEHABBK algoritmasında BBK oluşturmak için 15 adet düğüm, Şekil 4.32’de gösterilen İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasında ise 13 adet düğüm seçilmektedir.



Şekil 4.29: 26 adet düğüme sahip bir TDA’da en uygun durumda oluşan BBK.

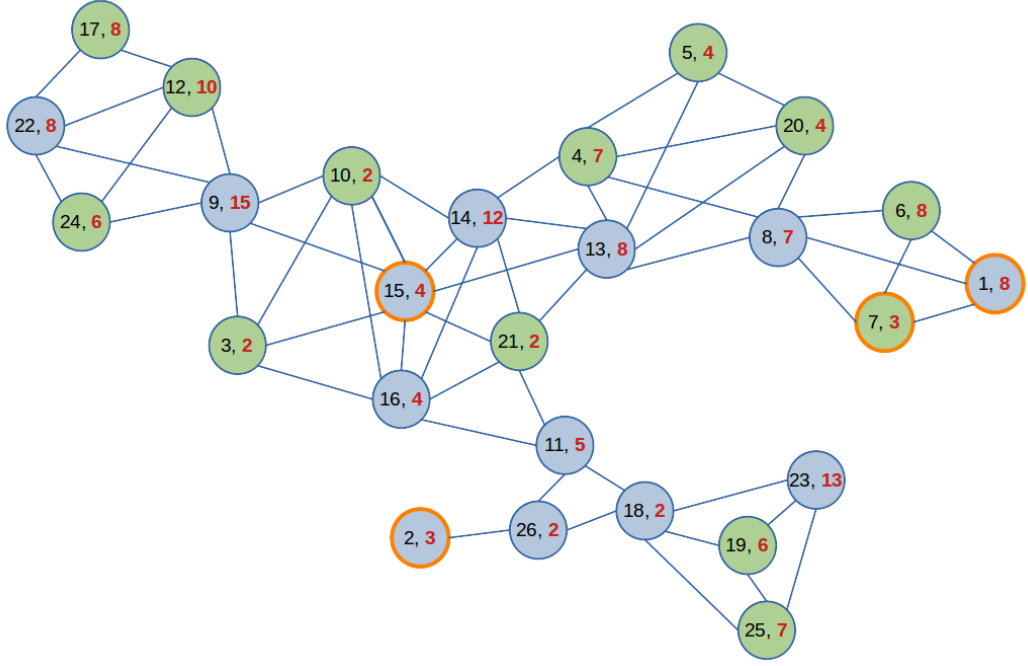


Şekil 4.30: Dağıtık LMW algoritmasıyla oluşturulan örnek bir BBK.



Şekil 4.31: GEHABBK algoritmasıyla oluşturulan örnek bir BBK.





Şekil 4.32: İyileştirilmiş GEHABBK algoritmasıyla oluşturulan örnek bir BBK.

Bir TDA içinde BBK oluşturulurken seçilen düğüm sayısının olabildiğince az olması, BK'ya seçilecek düğümlerin tespiti ile kapsayan düğümleri bağlayarak BBK'nın oluşturulma aşamalarında daha az enerji harcanacağından ve bu aşamalar daha az zamanda yapılacağından ağın yaşam süresine katkısı olacaktır. Ayrıca çevresel uygulama çalışırken, ağ üzerinde bulunan herhangi bir düğüm ölçtüğü çevresel veriyi BBK üzerinden bir merkeze iletteceğinden, BBK'nın az düğümden oluşması yönlendirme işleminin daha kısa şekilde tamamlanması sağlanacaktır.

Bir TDA içinde BBK oluşturulurken seçilen düğüm sayısının az olması iyi bir durum olsa da ağ yaşam süresinin artırılması için tek başına yeterli değildir. Şekil 4.29 ile verilen TDA'da en uygun koşulda 9 adet düğüm ile BBK oluşturulurken elde edilecek yaşam süresi, ağa enerji hasadı yapabilen düğümlerin eklenmesi vb. gibi durumlarda BBK için daha fazla düğüm seçilerek de artırılabilir. Kısacası bir TDA'nın ağ yaşam süresini artırmak için oluşturulacak BBK'da yer alacak KSYN düğümlerin sayısı, ağın yaşam süresi için tek başına yeterli bir etken değildir.

## 5. SONUÇLAR

Endüstride ya da doğada kurulan TDA'lar kolaylık, maliyet düşüklüğü vb. gibi birçok yarar sağladığı gibi enerji, güvenlik vb. gibi birçok farklı sorunu da beraberinde getirmektedir. TDA'lardan kuruluş amacına bağlı olarak aynı görevi uzun süre boyunca yerine getirmesi beklenmektedir. Ancak TDA'lar düşük güçte çalışan duyarga düğümlerinden oluştuğu için zamanla enerjileri bitmektedir. Bu nedenle yerine getirmesi gereken görevlerde aksaklıklar, yanlışlıklar ve hatta ölçümlerin durması gibi sorunlar yaşanmaktadır. Özet olarak, enerji sorunu TDA'larda çözülmesi gereken başlıca problemlerden bir tanesidir.

TDA'larda enerji probleminin çözümü motivasyonu ile tez kapsamında, enerji hasadı yapabilen düğümlerin bulunduğu telsiz duyarga ağlarının yaşam süresini artırmaya yönelik yeni bir dağıtık bağlı baskın küme algoritması geliştirilmiştir. Shi ve diğ. (2017)'nin geliştirdiği dağıtık LMW algoritmasından yola çıkılarak geliştirilmiş ve kısa ismi GEHABBK olan güneş enerjisi hasadı yapan düğümlerin bulunduğu akıllı çevresel uygulamalar için geliştirilmiş TDA'larda yaşam süresini artıran dağıtık bağlı baskın küme algoritması, SenseEH benzetim ortamında farklı sayıda düğüm içeren farklı ağ topolojileri ile test edilmiştir. GEHABBK algoritmasında ağ üzerinde enerjisi ilk biten düğümün yaşam süresi ağın yaşam süresi ile aynı olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, geliştirilen algoritmanın benzer özelliklerine sahip Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin geliştirdiği enerji etkin bağlı baskın küme algoritması ile aynı benzetim ortamında ve aynı parametreler altında karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma sonuçlarına göre GEHABBK algoritması, geleneksel sel yöntemine göre 4 ile 6 kat, Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin geliştirdiği algoritmaya göre 0.8 ile 1.4 kat daha etkin ağ yaşam süresi sağlamaktadır. Bunun yanı sıra GEHABBK algoritması, geleneksel sel yöntemine göre %89 ile %92 arasında, Al-Nabhan ve diğ. (2014)'nin geliştirdiği algoritmaya göre %49 ile %59 arasında daha az enerji harcamaktadır.

Yapılan analizler, TDA'da tüm düğümlerin enerji hasadı yapabilen düğümler olarak seçilmesi, ağ yaşam süresini artırmak için yeterli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle GEHABBK algoritması, hasatçı düğümleri iletişim omurgasına doğrudan dâhil eden ve düğümlerin kalan enerjisine göre kapsayan düğümleri belirleyen özgün bir algoritmadır.

Literatürde enerji hasadı teknikleri ile TDA'ların yaşam süresini artırmaya yönelik birçok farklı uygulama bulunmaktadır. Bunun yanı sıra güneş enerjisi de TDA'larda enerji hasadı için en verimli kaynaktır. Özetle GEHABBK algoritması, güneş enerjisi hasadı yapabilen düğümlerin yer aldığı akıllı çevresel uygulamalarda düğümler arası iletişimin sanal omurga olarak kurulan BBK'lar üzerinden gerçekleştirilmesini sağlayan ilk TDA uygulamasıdır.

Tez kapsamında geliştirilen GEHABBK algoritması, BBK iletişim omurgasını daha az zaman ve az enerji tüketerek oluşturmakta, TDA'nın kuruluş amacına yönelik çalışacak herhangi çevresel uygulamaya daha uzun zaman ve daha fazla enerji sağlamaktadır. Sonuç olarak, GEHABBK algoritmasının enerji hasadı yapabilen düğümlere sahip TDA'larda dağıtık bağlı baskın kümelerin sanal omurga olarak kullanılması ile ağın yaşam süresinin oldukça artırıldığı sonucuna varılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre geliştirilen GEHABBK algoritması, TDA'larda en uygun BBK'ların tespit edilmesi ve oluşturulması ile de düğümler arası paket alış verişinde mesaj trafiğini azaltarak karmaşıklığı ve veri kaybını en aza indirmektedir.

Bununla birlikte, GEHABBK algoritmasının iletişim omurgası olan BBK'ya seçilecek düğümlerin kapsayan düğüm olarak seçilmesi aşamasında düğüm ağırlıkları belirlenirken, düğüm tipine göre ağırlık hesaplamalarında iyileştirmeler yapılmıştır. Buna göre yeni ağırlık hesabında, sıradan düğümler için hasatçı komşu sayısı, sıradan komşu sayısı, sıradan komşuların hasatçı komşu sayısı ve sıradan komşuların sıradan komşu sayısı gibi farklı etkenler göz önüne alınmaktadır. Hasatçı düğümler için ise bir eşik değer hesaplanmaktadır. Böylece GEHABBK algoritmasından üretilen ve İyileştirilmiş GEHABBK adı verilen bu yeni algoritma, BBK iletişim omurgasına daha etkin bir şekilde kapsayan düğüm seçmektedir.

Sonraki çalışmalarda ise, ağın yaşam süresini artırmaya yönelik tekrar edilebilir bağlı baskın küme (TBBK) algoritmaları geliştirilecektir. GEHABBK algoritmasının aksine, TBBK algoritmasına göre ağın yaşam süresi ilk enerjisi biten düğümün yaşam süresi ile eş değer olmayacaktır. Bir başka deyişle, ağ üzerinde bulunan herhangi bir düğümün enerjisinin sona ermesi ile ağ alt ağlara bölünmüyorsa ve ağ üzerinde iletişim aksamıyorsa, ağ üzerinde dağıtık BBK'ların oluşturulabildiği toplam süre ağın yaşam süresi olarak kabul edilecektir.

Bunun yanı sıra, ağ topolojisi üzerinde bazı düğümler kritik konumlarda bulunabilirler. Eklem düğüm (*cut vertex*) adı verilen ve kritik konumda yer alan bu düğümlerin enerjilerinin tükenmesi, ağın alt ağlara bölünmesine, ağın yaşam süresinin sona ermesine ve ağ üzerindeki iletişiminin aksamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle ağın yaşam süresinin artırılmasına yönelik yapılacak gelecek çalışmalarda, kritik konumda yer alan bu düğümlerin saptanması ve enerjilerinin tükenmemesi için enerji etkin algoritmaların geliştirilmesi de planlanmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

Abdul-Salaam, G., Abdullah, A. H., Anisi, M. H., Gani, A. and Alelaiwi, A., “A comparative analysis of energy conservation approaches in hybrid wireless sensor networks data collection protocols”, *Telecommunication Systems*, 61 (1), 159-179, (2016).

Abrardo, A., Martalo, M. and Ferrari, G., “Information fusion for efficient target detection in large-scale surveillance wireless sensor networks”, *Information Fusion*, 38, 55-64, (2017).

Abreu, C., Miranda, F. and Mendes, P. M., “Smart context-aware QoS-based admission control for biomedical wireless sensor networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, 88, 134-145, (2017).

Adu-Manu, K. S., Adam, N., Tapparello, C., Ayatollahi, H. and Heinzelman, W., “Energy-harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs) A review”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, 14 (2), 1-50, (2018).

Ahmad, A., Ahmed, S., Imran, M., Alam, M., Niaz, I. A. and Javaid, N., “On energy efficiency in underwater wireless sensor networks with cooperative routing”, *Annals of Telecommunications*, 72 (3-4), 173-188, (2017).

Ali, H., “A performance evaluation of RPL in Contiki”, Yüksek Lisans Tezi, *School of Computing Blekinge Institute of Technology*, Stockholm, (2012).

Al-Nabhan, N., Al-Rodhaan, M. and Al-Dhelaan, A., “Distributed energy-efficient approaches for connected dominating set construction in wireless sensor networks”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10 (6), 625061, (2014).

AlSkaif, T., Bellalta, B., Zapata, M. G. and Ordinas, J. M. B., “Energy efficiency of MAC protocols in low data rate wireless multimedia sensor networks: A comparative study”, *Ad Hoc Networks*, 56, 141-157, (2017).

Alves, M. M., et al., “Damage prediction for wind turbines using wireless sensor and actuator networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, 80, 123-140, (2017).

Arkin, E. M., Efrat, A., Mitchell, J. S., Polishchuk, V., Ramasubramanian, S., Sankararaman, S. and Taheri, J., “Data transmission and base-station placement for optimizing the lifetime of wireless sensor networks”, *Ad Hoc Networks*, 12, 201-218, (2014).

Arora, A., et al., “A line in the sand: A wireless sensor network for target detection, classification, and tracking”, *Computer Networks*, 46 (5), 605-634, (2004).

Asgarnezhad, R. and Torkestani, J. A., “Connected dominating set problem and its application to wireless sensor networks”, *First International Conference on Advanced Communications and Computation*, Barcelona, Spain, 23-28, (2011).

Babayo, A. A., Anisi, M. H. and Ali, I., “A review on energy management schemes in energy harvesting wireless sensor networks”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1176-1184, (2017).

Basu, D., Moretti, G., Gupta, G. S. and Marsland, S., “Wireless sensor network based smart home: Sensor selection, deployment and monitoring”, *IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, 49-54, (2013).

Benedetti, D., Petrioli, C. and Spenza, D., “GreenCastalia: An energy-harvesting-enabled framework for the Castalia simulator”, *1st International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems*, 1-6, (2013).

Bhuvaneshwari, P. T. V., Balakumar, R., Vaidehi, V. and Balamuralidhar, P., “Solar energy harvesting for wireless sensor networks”, *First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 57-61, (2009).

Biggs, N., Lloyd, E. K. and Wilson, R. J., *Graph Theory 1736-1936*, United States: Oxford University Press, (1986).

Bormann, C., Castellani, A. P. and Shelby, Z., “Coap: An application protocol for billions of tiny internet nodes”, *IEEE Internet Computing*, 16 (2), 62-67, (2012).

Cardei, M., Cheng, M. X., Cheng, X. and Du, D. Z., “Connected domination in multihop ad hoc wireless networks”, *JCIS*, 251-255, (2002).

Caicedo-Ortiz, J., et. al., “Monitoring system for agronomic variables based in WSN technology on cassava crops”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 275-281, (2018).

Caviglione, L. and Merlo, A., “The energy impact of security mechanisms in modern mobile devices”, *Network Security*, 2012 (2), 11-14, (2012).

Chehri, A., Fortier, P. and Tardif, P. M., “Geo-location with wireless sensor networks using non-linear optimization”, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 145-154, (2008).

Chen, Q., Cheng, S., Gao, H., Li, J. and Cai, Z., “Energy-efficient algorithm for multicasting in duty-cycled sensor networks”, *Sensors*, 15 (12), 31224-31243, (2015).

Chen, Z., Liu, A., Li, Z., Choi, Y. J., Sekiya, H. and Li, J., “Energy-efficient broadcasting scheme for smart industrial wireless sensor networks”, *Mobile Information Systems*, 2017, (2017).

Cheng, H., Su, Z., Xiong, N. and Xiao, Y., “Energy-efficient node scheduling algorithms for wireless sensor networks using Markov random field model”, *Information Sciences*, 329, 461-477, (2016).

Cody-Kenny, B., Guerin, D., Ennis, D., Simon Carbajo, R., Huggard, M. and Mc Goldrick, C., “Performance evaluation of the 6LoWPAN protocol on MICAz and TelosB motes”, *4th ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks*, 25-30, (2009).

Cong, H., Li, Q., Zhou, C. and Yang, Q., “Analysis on connectivity of energy harvesting wireless sensor networks based on simulation”, *International Conference on Computing, Networking and Communications*, 762-768, (2018).

Crossbow Technology Micaz Datasheet [online], (17.05.2020), Web adresi:[http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz\\_datasheet.pdf](http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz_datasheet.pdf), (2003).

Dagdeviren, O., Akram, V. K. and Farzan, A., “A distributed evolutionary algorithm for detecting minimum vertex cuts for wireless ad hoc and sensor networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, 127, 70-81, (2019).

Dagdeviren, O., Erciyes, K. and Tse, S., “Semi-asynchronous and distributed weighted connected dominating set algorithms for wireless sensor networks”, *Computer Standards Interfaces*, 42, 143-156, (2015).

Dai, F. and Wu, J., “An extended localized algorithm for connected dominating set formation in ad hoc wireless networks”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 15 (10), 908-920, (2004).

Dall'Ora, R., Raza, U., Brunelli, D. and Picco, G. P., “SensEH: From simulation to deployment of energy harvesting wireless sensor networks”, *39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops*, 566-573, (2014).

Dargie, W. and Poellabauer, C., *Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice*, Singapore: John Wiley & Sons, (2010).

Daskalakis, S. N., Goussetis, G., Assimonis, S. D., Tentzeris, M. M. and Georgiadis, A., “A uW backscatter-morse-leaf sensor for low-power agricultural wireless sensor networks”, *IEEE Sensors Journal*, 18 (19), 7889-7898, (2018).

De Guglielmo, D., Anastasi, G. and Seghetti, A., “From IEEE 802.15.4 to IEEE 802.15.4e: A step towards the Internet of Things”, *Advances onto the Internet of Things*, 135-152, (2014).



Dedeoglu, V., Perreau, S. and Grant, A., “Cross-layer energy minimization in correlated data gathering wireless sensor networks”, *13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 304-308, (2012).

Derhab, A., Ounini, F. and Remli, B., “Mob-Tossim: An extension framework for TOSSIM simulator to support mobility in wireless sensor and actuator networks”, *8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, 300-305, (2012).

Devasena, A. and Sowmya, B., “Wireless sensor network in disaster management”, *Indian Journal of Science and Technology*, 8 (15), 1-6, (2015).

Dewi, A. K., Sahaya, A. A. B. A. and Sugiman, W., “Level and temperature monitoring system in blending process using ZigBee wireless sensor network”, *1st Borobudur International Symposium on Humanities, Economics and Social Sciences*, 372-375, (2020).

Ding, L., Gao, X., Wu, W., Lee, W., Zhu, X. and Du, D. Z., “Distributed construction of connected dominating sets with minimum routing cost in wireless networks”, *IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems*, 448-457, (2010).

Ding, L., Wu, W., Willson, J., Du, H., Lee, W. and Du, D. Z., “Efficient algorithms for topology control problem with routing cost constraints in wireless networks”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 22 (10), 1601-1609, (2011).

Djenouri, D. and Bagaa, M., “Energy harvesting aware relay node addition for power-efficient coverage in wireless sensor networks”, *IEEE International Conference on Communications*, 86-91, (2015).

Dlodlo, N. and Kalezhi, J., “The Internet of Things in agriculture for sustainable rural development”, *International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications*, 13–18, (2015).

Domingo, M. C., “An overview of the Internet of Things for people with disabilities”, *Journal of Network and Computer Applications*, 35 (2), 584-596, (2012).

Dragana, C., Stamatescu, G. and Popescu, D., “Binary consensus-based decentralized algorithm for event detection in large scale monitoring systems”, *7th International Conference on Sensors and Signals*, 12-14, (2015).

Dragos, K. and Smarsly, K., “A comparative review of wireless sensor nodes for structural health monitoring”, *7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, 1 (7), Turin, Italy, (2015).

Dunkels, A., Gronvall, B. and Voigt, T., “Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors”, *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, 455-462, (2004).

Dunkels, A., Osterlind, F., Tsiftes, N. and He, Z., “Software-based on-line energy estimation for sensor nodes”, *4th workshop on Embedded Networked Sensors*, 28-32, (2007).

Ephremides, A., Wieselthier, J. E. and Baker, D. J., “A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling”, *Proceedings of the IEEE*, 75 (1), 56-73, (1987).

Erciyes, K., *Distributed Graph Algorithms for Computer Networks*, London, U.K. : Springer, (2013).

Estrin, D., Sayeed, A. and Srivastava, M., “Wireless sensor networks”, *Eighth ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 255, (2002).

Farjow, W., Chehri, A., Mouftah, H. and Fernando, X., “An energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks through nonlinear optimization”, *International Conference on Wireless Communications in Underground and Confined Areas*, 1-4, (2012).

Feng, C. and Zhang, L. H., “A modified shuttled frog leaping algorithm for solving nodes position in wireless sensor network”, *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2, 555-559, (2012).

Feng, Z., “Design and implementation of an experimental platform for performance analysis in wireless sensor networks”, Yüksek Lisans Tezi, *KTH Design and Implementation of ICTs Products and Systems*, (2011).

Fraboulet, A., Chelius, G. and Fleury, E., “Worldsens: development and prototyping tools for application specific wireless sensors networks”, *6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 176-185, (2007).

Gallager, R. G., Humblet, P. A. and Spira, P. M., “A distributed algorithm for minimum-weight spanning trees”, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 5 (1), 66-77, (1983).

Gopakumar, A. and Jacob, L., “Performance of some metaheuristic algorithms for localization in wireless sensor networks”, *International Journal of Network Management*, 19 (5), 355-373, (2009).

Guang-Hui, L., Jun, Z. and Zhi, W., “Research on forest fire detection based on wireless sensor network”, *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 1, 275-279, (2006).

Gu, Y., Ji, Y., Chen, H. and Zhao, B., “Using mobile sinks in WSN: Computational complexity and a theoretical bound”, *Chinese Journal of Electronics*, 20, 147–150, (2011).

Gu, Y., Pan, M. and Li, W., “Prolonging the lifetime of large scale wireless sensor networks via base station placement”, *IEEE 78th Vehicular Technology Conference*, 1-5, (2013).

Guo, W., Hong, W., Zhang, B., Chen, Y. and Xiong, N., “Reliable adaptive data aggregation route strategy for a trade-off between energy and lifetime in WSNs”, *Sensors*, 14 (9), (2014).

Hadjidj, A., Souil, M., Bouabdallah, A., Challal, Y. and Owen, H., “Wireless sensor networks for rehabilitation applications: Challenges and opportunities”, *Journal of Network and Computer Applications*, 36 (1), 1-15, (2013).

Hammoodi, I. S., Stewart, B. G., Kocian, A. and McMeekin, S. G., “A comprehensive performance study of OPNET modeler for ZigBee wireless sensor networks”, *Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, 357-362, (2009).

Han, G., Xu, H., Duong, T., Jiang, J. and Hara, T., “Localization algorithms of wireless sensor networks: A survey”, *Telecommunication Systems*, 52 (4), 2419-2436, (2013).

Hartung, C., Han, R., Seielstad, C. and Holbrook, S., “FireWxNet: A multi-tiered portable wireless system for monitoring weather conditions in wildland fire environments”, *4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, 28-41, (2006).

Hashim, H. A., Ayinde, B. and Abido, M., “Optimal placement of relay nodes in wireless sensor network using artificial bee colony algorithm”, *Journal of Network and Computer Applications*, 64, 239-248, (2016).

Haytaoğlu, E., Güleç, Ö. and Tosun, M., “Enerji hasadı yapan düğümlerin bulunduğu telsiz duyurga ağlarının yaşam süresini arttıran yeniden oluşturulabilen bir dağıtık bağlı baskın küme algoritması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, DOI: 10.5505/pajes.2020.83030, (2020).

Hedley, C., Ekanayake, J. and Roudier, P., “Wireless soil moisture sensor networks for precision irrigation scheduling”, *Workshop Abstracts, Advanced Nutrient Management: Gains from the past-goals for the future*, 85, (2012).

Hill, J. and Culler, D., A wireless embedded sensor architecture for system-level optimization [online], (20.05.2020), Web adresi: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.85.7269&rep=rep1&type=pdf>, (2002).

Holland, M., Wang, T., Tavli, B., Seyedi, A. and Heinzelman, W., “Optimizing physical-layer parameters for wireless sensor networks”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, 7 (4), 28:1-28:20, (2011).

Hwang, R. H., Wang, C. C. and Wang, W. B., “A distributed scheduling algorithm for IEEE 802.15.4e wireless sensor networks”, *Computer Standards & Interfaces*, 52, 63-70, (2017).

IEEE Standards Association, “IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)”, *IEEE Standards Association*, (2011).

Jawad, H., Nordin, R., Gharghan, S., Jawad, A. and Ismail, M., “Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review”, *Sensors*, 17 (8), 1781, (2017).

Ji, S., Sze, K. F., Zhou, Z., So, A. C. and Ye, Y., “Beyond convex relaxation: A polynomial-time non-convex optimization approach to network localization”, *IEEE INFOCOM*, 2499-2507, (2013).

Jiang, H., Cao, R. and Wang, X., “Apply modified method of nonlinear optimization to improve localization accuracy in WSN”, *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 1-6, (2009).

Jiang, X., Polastre, J. and Culler, D., “Perpetual environmentally powered sensor networks”, *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 463-468, (2005).

Johnson, M., Healy, M., Van de Ven, P., Hayes, M. J., Nelson, J., Newe, T. and Lewis, E., “A comparative review of wireless sensor network mote technologies”, *Sensors*, 1439-1442, (2009).

Joo, C. and Shroff, C. B., “On the delay performance of in-network aggregation in lossy wireless sensor networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 22 (2), 662-673, (2013).

Kabashkin, I. and Kundler, J., “Reliability of sensor nodes in wireless sensor networks of cyber physical systems”, *Procedia Computer Science*, 104, 380-384, (2017).

Kalaiselvi, K., Suresh, G. R. and Ravi, V., “Genetic algorithm based sensor node classifications in wireless body area networks (WBAN)”, *Cluster Computing*, 22 (5), 12849-12855, (2019).

Kamalinejad, P., Mahapatra, C., Sheng, Z., Mirabbasi, S., Leung, V. C. and Guan, Y. L., “Wireless energy harvesting for the Internet of Things”, *IEEE Communications Magazine*, 53 (6), 102-108, (2015).

Kamath, R., Balachandra, M. and Prabhu, S., “Raspberry Pi as visual sensor nodes in precision agriculture: A study”, *IEEE Access*, 7, 45110-45122, (2019).

Kansal, A., Hsu, J., Zahedi, S. and Srivastava, M. B., “Power management in energy harvesting sensor networks”, *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 6 (4), 32, (2007).

Khattak, H. A., Ruta, M. and Di Sciascio, E. E., “CoAP-based healthcare sensor networks: A survey”, *11th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology*, Islamabad, Pakistan, 499-503, (2014).

Khan, T. F. and Kumar, D. S., “Ambient crop field monitoring for improving context based agricultural by mobile sink in WSN”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-9, (2019).

Khan, R., Ali, I., Zakarya, M., Ahmad, M., Imran, M. and Shoaib, M., “Technology-assisted decision support system for efficient water utilization: A real-time testbed for irrigation using wireless sensor networks”, *IEEE Access*, 6, 25686-25697, (2018).

Köpke, A., et al., “Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision”, *1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, 1-8, (2008).

Lajara, R., Pelegrí-Sebastiá, J. and Solano, J. J. P., “Power consumption analysis of operating systems for wireless sensor networks”, *Sensors*, 10 (6), 5809-5826, (2010).

Lee, S. H., Lee, S., Song, H. and Lee, H. S., “Wireless sensor network design for tactical military applications: Remote large-scale environments”, *IEEE Military Communications Conference*, 1-7, (2009).

Lei, X., Huimin, Z. and Weiren, S., “Mobile anchor assisted node localization in sensor networks based on particle swarm optimization”, *6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing*, 1-5, (2010).

Levis, P., Lee, N., Welsh, M. and Culler, D., “TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications”, *1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 126-137, (2003).

Li, M., Li, P., Huang, X., Fang, Y. and Glisic, S., “Energy consumption optimization for multihop cognitive cellular networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 14 (2), 358-372, (2014).

Li, P., Guo, S. and Hu, J., “Energy-efficient cooperative communications for multimedia applications in multi-channel wireless networks”, *IEEE Transactions on Computers*, 64 (6), 1670-1679, (2014).

Li, T., Liu, A. and Huang, C., “A similarity scenario-based recommendation model with small disturbances for unknown items in social networks”, *IEEE Access*, 4, 9251-9272, (2016).

Li, Y., Wu, Y., Ai, C. and Beyah, R., “On the construction of k-connected m-dominating sets in wireless networks”, *Journal of Combinatorial Optimization*, 23 (1), 118-139, (2012).

Lin, F. Y. S., Yen, H. H. and Lin, S. P., “A novel energy-efficient mac aware data aggregation routing in wireless sensor networks”, *Sensors*, 9 (3), (2009).

Lisiecki, D., Zhang, P. and Theel, O., “CONE: A connected dominating set-based flooding protocol for wireless sensor networks”, *Sensors*, 19 (10), 2378, (2019).

Liu, Y., Chen, Q., Liu, G., Liu, H. and Yang, Q., “EcoSense: A hardware approach to on-demand sensing in the Internet of Things”, *IEEE Communications Magazine*, 54 (12), 37-43, (2016).

Loreti, P., Catini, A., De Luca, M., Bracciale, L., Gentile, G. and Di Natale, C., “The design of an energy harvesting wireless sensor node for tracking pink iguanas”, *Sensors*, 19 (5), 985, (2019).

Luque, J., Larios, D. F., Personal, E., Barbancho, J. and León, C., “Evaluation of MPEG-7-based audio descriptors for animal voice recognition over wireless acoustic sensor networks”, *Sensors*, 16 (5), 717, (2016).

Ma, X. and Luo, W., “The analysis of 6LoWPAN technology”, *IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application*, 963-966, (2008).

Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R. and Anderson, J., “Wireless sensor networks for habitat monitoring”, *1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, 88-97, (2002).

Maleki, S., Sawhney, R., Farvaresh, H. and Sepehri, M. M., “Energy efficient hybrid wired-cum-wireless sensor network design”, *Journal of Cleaner Production*, 85, 408–418, (2014).

Mao, S., Cheung, M. H. and Wong, V. W., “An optimal energy allocation algorithm for energy harvesting wireless sensor networks”, *IEEE International Conference on Communications*, 265-270, (2012).

Mármol, F. G. and Pérez, G. M., “TRMSim-WSN, trust and reputation models simulator for wireless sensor networks”, *IEEE International Conference on Communications*, 1-5, (2009).



Marques, B., “Application-driven wireless sensor networks”, Doktora Tezi, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Porto, (2017).

Martinez, K., Hart, J. K. and Ong, R., “Environmental sensor networks”, *Computer*, 37 (8), 50-56, (2004).

Meda, N. S., Sadashiva, T. G., Ramani, S. K. and Iyengar, S. S., “Mobile WSN testbed for agriculture: Plant monitoring system”, *2nd International Conference On Emerging Computation and Information Technologies*, 1-6, (2017).

Mekikis, P. V., Antonopoulos, A., Kartsakli, E., Alonso, L. and Verikoukis, C., “Connectivity analysis in wireless-powered sensor networks with battery-less devices”, *IEEE Global Communications Conference*, 1-6, (2016).

Minakov, I. and Passerone, R., “PASES: An energy-aware design space exploration framework for wireless sensor networks”, *Journal of Systems Architecture*, 59 (8), 626-642, (2013).

Misra, R. and Mandal, C., “Rotation of cds via connected domatic partition in ad hoc sensor networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8 (4), 488-499, (2009).

Mohajerzadeh, A., Yaghmaee, M., Zahmatkesh, A. and Torshizi, A., “Fair, optimized routing protocol based on fuzzy variables in wireless sensor networks”, *19th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 1-1, (2011).

Mohanty, J. P., Mandal, C., Reade, C. and Das, A., “Construction of minimum connected dominating set in wireless sensor networks using pseudo dominating set”, *Ad Hoc Networks*, 42, 61-73, (2016).

Mohindru, V., Singh, Y. and Bhatt, R., “Hybrid cryptography algorithm for securing wireless sensor networks from node clone attack”, *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, 13 (2), 251-259, (2020).

Moritz, G., Golatowski, F., Lerche, C. and Timmermann, D., “Beyond 6LoWPAN: Web services in wireless sensor networks”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9 (4), 1795-1805, (2012).

Mukherjee, N., Neogy, S. and Roy, S., *Building wireless sensor networks: Theoretical and practical perspectives*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, (2015).

Nasseri, M., Al-Olimat, H., Alam, M., Kim, J., Green, R. and Cheng, W., “Contiki Cooja simulation for time bounded localization in wireless sensor network”, *18th Symposium on Communications & Networking*, 1-7, (2015).

Nath, T. and Azharuddin, M., “Application of wireless sensor networks for rhino protection against poachers in Kaziranga National Park”, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 111, 152882, (2019).

Nguyen, M. T. and Teague, K. A., “Compressive sensing based random walk routing in wireless sensor networks”, *Ad Hoc Networks*, 54, 99-110, (2017).

Orfanus, D., Lessmann, J., Janacik, P. and Lachev, L., “Performance of wireless network simulators: A case study”, *3rd ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks*, 59-66, (2008).

Park, C. and Chou, P. H., “Ambimax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes”, *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 1, 168-177, (2006).

Park, K. J., Zheng, R. and Liu, X., “Cyber-physical systems: Milestones and research challenges”, *Computer Communications*, 36 (1), 1-7, (2012).

Pau, G. and Salerno, V. M., “Wireless sensor networks for smart homes: A fuzzy-based solution for an energy-effective duty cycle”, *Electronics*, 8 (2), 131, (2019).

Pei, J. F., Gao, L. and Zhao, Y. D., “Wireless sensor forest anti-fire network simulation based on ns2”, *2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology*, 300-303, IEEE, (2009).

Penella, M. T., Albasa, J. and Gasulla, M., “Powering wireless sensor nodes: Primary batteries versus energy harvesting”, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1625-1630, (2009).

Perla, E., Catháin, A. Ó., Carbajo, R. S., Huggard, M. and Mc Goldrick, C., “PowerTOSSIM z: Realistic energy modelling for wireless sensor network environments”, *3rd ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks*, 35-42, (2014).

Pham, C., “Communication performances of IEEE 802.15.4 wireless sensor nodes for data-intensive applications: A comparison of WaspMote, Arduino MEGA, TelosB, MicaZ and iMote2 for image surveillance”, *Journal of Network and Computer Applications*, 46, 48-59, (2014).

Pirbhulal, S., et al., “A novel secure IoT-based smart home automation system using a wireless sensor network”, *Sensors*, 17 (1), 69, (2017).

Pour, N. K., “Energy efficiency in wireless sensor networks”, Doktora Tezi, *The University of Technology Sydney*, Sydney, (2016).

Prayati, A., Antonopoulos, C., Stoyanova, T., Koulamas, C. and Papadopoulos, G., “A modeling approach on the TelosB WSN platform power consumption”, *Journal of Systems and Software*, 83 (8), 1355-1363, (2010).

Radoi, I. E., Mann, J. and Arvind, D. K., “Tracking and monitoring horses in the wild using wireless sensor networks”, *11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 732-739, (2015).

Ragnoli, M., Barile, G., Leoni, A., Ferri, G. and Stornelli, V., “An autonomous low-power LoRa-based flood-monitoring system”, *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 10 (2), 15, (2020).

Ransing, R. S. and Rajput, M., “Smart home for elderly care, based on wireless sensor network”, *International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field*, 1-5, (2015).

Rao, L., Liu, X., Chen, J. J. and Liu, W., “Joint optimization of system lifetime and network performance for real-time wireless sensor networks”, *International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness*, 317-333, (2009).

Rao, L., Liu, X., Kang, K. D., Liu, W., Liu, L. and Chen, Y., “Optimal joint multi-path routing and sampling rates assignment for real-time wireless sensor networks”, *International Conference on Communications*, 1-5, (2011).

Rashid, B. and Rehmani, M. H., “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey”, *Journal of Network and Computer Applications*, 60, 192-219, (2016).

Rege, V. and Pecorella, T., “A realistic MAC and energy model for 802.15.4”, *Workshop on ns-3*, 79-84, (2016).

Saifullah, A., Wu, C., Tiwari, P. B., Xu, Y., Fu, Y., Lu, C. and Chen, Y., “Near optimal rate selection for wireless control systems”, *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 13 (4s), 1-25, (2014).

Saleem, Y., Salim, F. and Rehmani, M. H., “Routing and channel selection from cognitive radio network’s perspective: A survey”, *Computers & Electrical Engineering*, 42, 117-134, (2015).

Sankarasubramaniam, Y., Akyildiz, I. F. and McLaughlin, S. W., “Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks”, *First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, 1–8, (2003).

Schmid, S. and Wattenhofer, R., “Algorithmic models for sensor networks”, *20th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium*, (2006).

Senivasan, S., Drieberg, M., Singh, B. S. M., Sebastian, P. and Hiung, L. H., “An MPPT micro solar energy harvester for wireless sensor networks”, *13th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, 159-163, (2017).

Sensors Magazine, “Editorial: this changes everything-market observers quantify the rapid escalation of wireless sensing and explain its effects”, *Wireless for Industry, Supplement to Sensors Magazine*, S6–S8, (2004).

Shaikh, F. K. and Zeadally, S., “Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1041-1054, (2016).

Sheu, J. P., Cheng, P. W. and Hsieh, K. Y., “Design and implementation of a smart mobile robot”, *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 422-429, (2005).

Shi, L. and Fapojuwo, A., “TDMA scheduling with optimized energy efficiency and minimum delay in clustered wireless sensor networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9 (7), 927-940, (2010).

Shi, L., Han, J., Han, D., Ding, X. and Wei, Z., “The dynamic routing algorithm for renewable wireless sensor networks with wireless power transfer”, *Computer Networks*, 74, 34–52, (2014).

Shi, T., Cheng, S., Cai, Z., Li, Y. and Li, J., “Exploring connected dominating sets in energy harvest networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25 (3), 1803-1817, (2017).

Shi, W., Liu, W., Wang, T., Zeng, Z. and Zhi, G., “Adding duty cycle only in connected dominating sets for energy efficient and fast data collection”, *IEEE Access*, 7 (2019), 120475-120499, (2019).

Shinghal, D., Noor, A., Srivastava, N. and Singh, R., “Wireless sensor networks in agriculture: For potato farming”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (8), 3955-3963, (2010).

Simjee, F. and Chou, P. H., “Everlast: Long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node”, *International Symposium on Low Power Electronics and Design*, 197-202, (2006).

Simonetto, A. and Leus, G., “Distributed maximum likelihood sensor network localization”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62 (6), 1424-1437, (2014).

Singh, J., Kaur, R. and Singh, D., “A survey and taxonomy on energy management schemes in wireless sensor networks”, *Journal of Systems Architecture*, 101782, (2020).

Sinha, S., Chaczko, Z. and Klempous, R., “SNIPER: A wireless sensor network simulator”, *International Conference on Computer Aided Systems Theory*, Springer, 913-920, (2009).

Sobeih, A., et al., “J-Sim: a simulation and emulation environment for wireless sensor networks”, *IEEE Wireless Communications*, 13 (4), 104-119, (2006).

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M. and Czarnecki, J. J., A review of structural health review of structural health monitoring literature 1996-2001 (No. LA-UR-02-2095) [online], (20.05.2020), Web adresi: <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-02-2095>, (2002).

Stehlik, M., “Comparison of simulators for wireless sensor networks”, Yüksek Lisans Tezi, *Masaryk University Faculty of Informatics*, Brno, (2011).

Talzi, I., Hasler, A., Gruber, S. and Tschudin, C., “Permasense: Investigating permafrost with a WSN in the Swiss Alps”, *4th Workshop on Embedded Networked Sensors*, ACM, 8-12, (2007).

Tapiador, J., Srivatsa, M., Clark, J. and McDermid, J., “Decorrelating WSN traffic patterns with maximally uninformative constrained routing”, *International Conference on Research in Networking*, Springer, 207-218, (2011).

Telosb Datasheet [online], (02.06.2020), Web adresi: [http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/telosb\\_datasheet.pdf](http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/telosb_datasheet.pdf), (2003).

Tennina, S., Di Renzo, M., Santucci, F. and Graziosi, F., “On the distribution of positioning errors in wireless sensor networks: A simulative comparison of optimization algorithms”, *Wireless Communications and Networking Conference*, IEEE, 2075-2080, (2008).

Tiliute, D. E., “Battery management in wireless sensor networks”, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 76 (4), 9-12, (2007).

Tmote Sky Datasheet [online], (01.05.2020), Web adresi: <https://fccid.io/TOQTMOTESKY/User-Manual/Users-Manual-Revised-613136.pdf>, (2005).

Tomic, S., Beko, M. and Dinis, R., “RSS-based localization in wireless sensor networks using convex relaxation: Noncooperative and cooperative schemes”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64 (5), 2037-2050, (2015).

Tong, B., Wang, G., Zhang, W. and Wang, C., “Node reclamation and replacement for long-lived sensor networks”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 22 (9), 1550-1563, (2011).

Ullah, Z., et al., “Energy-efficient harvested-aware clustering and cooperative routing protocol for WBAN (E-HARP)”, *IEEE Access*, 7, 100036-100050, (2019).

Ünlü, B., Özceylan, B. and Baykal, B., “Performance evaluation of network startup in TSCH protocol”, *25th Signal Processing and Communications Applications Conference*, IEEE, 1-4, (2017).

Varsa, G. S. and Sridharan, D., “A balanced energy efficient virtual backbone construction algorithm in wireless sensor networks”, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 107, 110-124, (2019).

Varta V4906 Datasheet [online], (26.05.2020), Web adresi: <http://www.farnell.com/datasheets/39632.pdf>, (2005).

Velinov, A. and Mileva, A., “Running and testing applications for Contiki OS using Cooja simulator”, *International Conference on Information Technology and Development of Education*, 279-285, (2016).

Villarrubia, G., Paz, J. F. D., Iglesia, D. H. and Bajo, J., “Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation”, *Sensors*, 17 (8), 1775, (2017).

Wang, C., Zhang, Y. and Wang, H., “A node localization scheme based on virtual beacons in wireless sensor network”, *Journal of Computational Information Systems*, 8 (14), 5691–5698, (2012).

Wang, N., Zhang, N. and Wang, M., “Wireless sensors in agriculture and food industry-recent development and future perspective”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 50 (1), 1-14, (2006).

Wang, Z., Li, W. and Dong, H., “Review on open source operating systems for Internet of Things”, *Journal of Physics: Conference Series*, 887 (1), 012044, (2017).

Wang, Z., Song, H., Watkins, D. W., Ong, K. G., Xue, P., Yang, Q. and Shi, X., “Cyber-physical systems for water sustainability: Challenges and opportunities”, *IEEE Communications Magazine*, 53 (5), 216-222, (2015).

Wang, X., Wang, S. and Bi, D., “Distributed visual-target-surveillance system in wireless sensor networks”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 39 (5), 1134-1146, (2009).

Wani, A. and Rahnavard, N., “Compressive sampling for energy efficient and loss resilient camera sensor networks”, *Military Communications Conference*, 1766-1771, (2011).

Winkler, M., Tuchs, K. D., Hughes, K. and Barclay, G., “Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks”, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 37-45, (2008).

Winter, T., et al., RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks [online], (12.05.2020), Web adresi: <https://www.hjp.at/doc/rfc/rfc6550.html>, (2012).

Wu, J. and Li, H., “A dominating-set-based routing scheme in ad hoc wireless networks”, *Telecommunication Systems*, 18 (1-3), 13-36, (2001).

Xiao, K., Wang, R., Fu, T., Li, J. and Deng, P., “Divide-and-conquer architecture based collaborative sensing for target monitoring in wireless sensor networks”, *Information Fusion*, 36, 162-171, (2017).



Yang, C. and Chin, K. W., “On complete targets coverage and connectivity in energy harvesting wireless sensor networks”, *22nd International Conference on Telecommunications*, IEEE, 391-397, (2015).

Yang, H. and Zhang, Y., “Modeling and analysis of a solar powered wireless sensor node”, *International Conference on Computing, Networking and Communications*, IEEE, 970-974, (2012).

Yu, F. and Jain, R., A survey of wireless sensor network simulation tools [online], (17.05.2020), Web adresi: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse567-11/ftp/sensor>, (2011).

Yuan, D., Kanhere, S. S. and Hollick, M., “Instrumenting wireless sensor networks-a survey on the metrics that matter”, *Pervasive and Mobile Computing*, 37, 45-62, (2017).

Yun, Y. and Xia, Y., “Maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sink in delay-tolerant applications”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9 (9), 1308-1318, (2010).

Zolertia Z1 Datasheet [online], (01.05.2020), Web adresi: [http://wiki.zolertia.com/wiki/images/e/e8/Z1\\_RevC\\_Datasheet.pdf](http://wiki.zolertia.com/wiki/images/e/e8/Z1_RevC_Datasheet.pdf), (2010).

Zhang, H., Liu, J., Pang, A. C. and Li, R., “A data reconstruction model addressing loss and faults in medical body sensor networks”, *IEEE Global Communications Conference*, IEEE, 1-6, (2016).

Zhang, W., Han, G., Feng, Y. and Lloret, J., “IRPL: An energy efficient routing protocol for wireless sensor networks”, *Journal of Systems Architecture*, 75, 35-49, (2017).

Zhao, Y., Wu, J., Li, F. and Lu, S., “VBS: Maximum lifetime sleep scheduling for wireless sensor networks using virtual backbones”, *IEEE INFOCOM*, 1-5, (2010).

Zhou, Y., Sheng, Z., Mahapatra, C., Leung, V. C. and Servati, P., “Topology design and cross-layer optimization for wireless body sensor networks”, *Ad Hoc Networks*, 59, 48-62, (2017).

Zikria, Y. B., Afzal, M. K., Ishmanov, F., Kim, S. W. and Yu, H., “A survey on routing protocols supported by the Contiki Internet of Things operating system”, *Future Generation Computer Systems*, 82, 200-219, (2018).

Zorbas, D., Raveneau, P. and Ghamri-Doudane, Y., “Assessing the cost of RF-power harvesting nodes in wireless sensor networks”, *IEEE Global Communications Conference*, IEEE, 1-6, (2016).

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : ÖMER GÜLEÇ  
Lisans : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
Yüksek Lisans : PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ  
E-Posta : omer@pau.edu.tr

### Yayın Listesi :

• Gulec, O., Haytaoglu, E. and Tokat, S., “A novel distributed CDS algorithm for extending lifetime of WSNs with solar energy harvester nodes for smart agriculture applications”, *IEEE Access*, 8, 58859-58873, (2020).

• Haytaoğlu, E., Güleç, Ö. and Tosun, M., “Enerji hasadı yapan düğümlerin bulunduğu telsiz duyurga ağlarının yaşam süresini arttıran yeniden oluşturulabilen bir dağıtık bağlı baskın küme algoritması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, DOI: 10.5505/pajes.2020.83030, (2020).

• Güleç, Ö., Tokat, S., Akyol, E., Söğüt, B. and Alkan, M., “Tarihi yerleşim ve arkeolojik yapı bilgi sistemi: Denizli ili örneği”, *Afyon Kocatepe University Journal of Science & Engineering*, 15 (3), 12-20, (2015).

### Konferans Listesi :

• Tosun, M., Haytaoğlu, E. and Güleç, Ö., “A minimal weight and routing cost connected dominating set algorithm for wireless sensor networks”, *26th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 1-4, IEEE, (2018).