

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN YENİ BİR RÖLE MEKANİZMASI TASARIMI VE
BENZETİMİNİN YAPILMASI

Davut ARI

TEMMUZ 2018

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN YENİ BİR RÖLE MEKANİZMASI TASARIMI VE
BENZETİMİNİN YAPILMASI

Hazırlayan

Davut ARI

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK

Dr. Öğr. Üyesi Kemal BALIKÇI

TEMMUZ 2018

Davut ARI tarafından hazırlanan “**Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Yeni Bir Röle Mekanizması Tasarımı Ve Benzetiminin Yapılması**” adlı tez çalışması 25/07/2018 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.


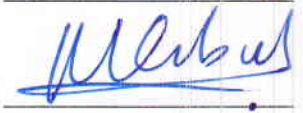

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
(Başkan)


Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK
(Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Kemal BALIKÇI
(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 23/08.2018 gün ve 33/23 Sayılı kararı ile onaylanmıştır.


Doç. Dr. Koray KÖKSAL
Enstitü Müdürü

ÖZET

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN YENİ BİR RÖLE MEKANİZMASI TASARIMI VE BENZETİMİNİN YAPILMASI

Davut ARI

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Musa ÇIBUK

Temmuz 2018, 116 sayfa

Son zamanlarda teknolojinin hızlı ilerlemesi ve haberleşmedeki gelişmeler sayesinde Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA)'ın kullanım alanları hızla yaygınlaşmıştır. KAA fikri ilk olarak askeri amaçlar için düşünülmüş olmasına rağmen, günümüzde gittikçe gelişerek ticari ve ticari olmayan birçok alanda uygulanmaya başlamıştır. Askeri, sağlık, çevre, kentsel ve akıllı evler gibi alanlarda KAA uygulamaları hızla artmaktadır. Araştırma konusu olarak KAA'ların öneminin artmasına paralel olarak KAA araştırma konuları arasında Ortam Erişim Kontrolü (OEK) protokolü araştırmalarına sıkça rastlanılmaktadır. OEK protokolleri kapsamında ağın nasıl organize edileceği, enerji tasarrufu, ağ ömrünün artırılması, çarpışma, sıkışıklık, veri toplama yöntemleri gibi KAA'larda kritik öneme sahip olan parametreler sıklıkla üzerinde çalışılan konulardır. Özellikle yoğun şekilde algılayıcı düğümlerden oluşan karmaşık yapıdaki uygulamalar için tercih edilen çok atlamalı KAA'larda, tüm düğümlerin ağda kalabilmeleri ve ağdaki düğümlerin ağdan kopmaması için çok esnek OEK protokollerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada KAA'lar için OEK katmanında çalışan yeni bir röle mekanizması tasarlanmıştır. Bu mekanizma ile çok atlamalı KAA'larda, çoklu topoloji desteği, ağa daha hızlı katılım sağlamak, çarpışmayı minimuma indirmek ve tüm düğümlerin ağda sürekli kalması amaçlanmıştır. Geliştirilen röle mekanizması Riverbed Modeler benzetim ortamında farklı ağ topolojisi ve farklı düğüm sayılarına göre benzetimleri yapılarak elde edilen bulgular irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Röle Mekanizması, Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Kanal Tahsis, Benzetim

ABSTRACT

DESIGN AND SIMULATION OF A NEW RELAY MECHANISM FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Davut ARI

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric - Electronic Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Musa ÇIBUK

July 2018, 116 pages

Recently, thanks to the rapid progress of technology and improvements in telecommunication, the applications of Wireless Sensor Networks (WSNs) have spread rapidly. Although the idea of WSN application was originally intended for military purposes, it is now being developed and implemented in many commercial and non-commercial areas. WSN applications have rapidly increased in areas such as military, health, environment, urban and smart houses. In parallel with the increasing importance of WSNs as a research topic, with investigations on Media Access Control (MAC) protocol among WSN research topics are frequently encountered. Within the scope of MAC protocols, parameters that have critical importance in the WSNs such as how to network organize, energy saving, network lifetime, collision, congestion, data gathering techniques are frequently studied topics. Especially, for complex applications in multi-hopping WSNs, which have numerous sensors, for keeping constantly all nodes in the network very flexible MAC protocols are needed. In this study, a new relay mechanism was designed for the MAC layer in the multi-hop WSNs. With this mechanism, it has been aimed at supporting multiple topologies, provides faster participation to the network, to minimize collision, and ensuring that all nodes keep constantly on the network in multi-hop WSNs. Developed relay mechanism, the findings obtained has examined by simulating according to different network topology and different node numbers in the Riverbed Modeler simulation environment.

Keywords: Relay Mechanism, Wireless Sensor Networks, Channel Allocation, Simulation

TEŞEKKÜR

Yoęun geęen tez ęalıőması sırasında her tűrlű fedakârlıęı gűsteren kıymetli eőime, uzaktan da olsa hayır dualarını eksik etmeyen ęok sevdięim annem ve babama űkranlarımı sunmayı borę bilirim. Tez ęalıőması sırasında her tűrlű bilgi, teővik ve deneyimleri ile yardımlarını esirgemeyen danıőman hocam Sayın Dr. Őęr. Őyesi Musa ęIBUK'a ve tecrűbelerinden sık sık faydalandıęım, yardım konusunda her tűrlű fedakârlıęı gűsteren Őęr. Gűr. Fikri AęGŪN'e ęok teőekkűr ederim. Ayrıca katkılarından dolayı baőta Elektrik-Elektronik Műhendislięi Anabilim Dalı Baőkanı Prof. Dr. Sabir RŪSTEMLİ olmak űzere dięer bűlűm hocalarıma ęok teőekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Bağlantı Biçimlerine Göre Kablosuz Algılayıcı Ağlar	1
1.2. Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Röle Mekanizmasının Önemi	2
1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Literatür Açısından Önemi.....	3
1.4. Tezin Organizasyonu.....	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
3. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR	8
3.1. Kablosuz Algılayıcı Ağ Nedir?	8
3.2. Algılayıcı Düğümlerin Yapısı ve Çeşitleri	10
3.3. Kablosuz Algılayıcı Ağ Mimarisi, Protokol Yığını ve Protokol Çeşitleri	11
3.3.1. Kablosuz Algılayıcı Ağlar’da Protokol Çeşitleri.....	12
3.3.1.1. IEEE 802.15.4	13
3.3.1.2. Bluetooth ve Düşük Enerjili Bluetooth	14
3.3.1.3. Z-wave.....	15
3.3.1.4. ANT teknolojisi	15
3.3.1.5. Wavenis teknolojisi	15
3.3.1.6. Dash7	16
3.3.1.7. EnOcean	16
3.4. Kablosuz Algılayıcı Ağ Topolojileri.....	16
3.4.1. Yıldız Topoloji	17
3.4.2. Örgü Topoloji	17
3.4.3. Melez Topoloji	18
3.4.4. Doğrusal Topoloji.....	18
3.4.5. Rasgele Topolojisi	19
3.4.6. Izgara Topolojisi.....	20
3.4.7. Ağaç Topolojisi	20

3.5.	Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Tasarım Zorlukları ve Kısıtlamaları	21
3.6.	Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin OEK Protokolleri ve Önemi	22
3.7.	Kablosuz Algılayıcı Ağlar'da Çok Kanallı İletişim ve Çok Radyolu İletişim	23
4.	KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN YENİ BİR RÖLE MEKANİZMASI.....	24
4.1.	Tasarlanan Röle Mekanizmasının Genel Yapısı	25
4.2.	Mekanizmanın Kanal ve Zaman Dilimi Tahsis Yaklaşımları	27
4.3.	Paket Türleri	32
4.3.1.	Zamanlama Paketi(P_{sch}).....	33
4.3.2.	Kontrol Paketi(P_{ctrl})	34
4.3.3.	Röle Paketi(P_{rly}).....	35
4.3.4.	Veri Paketi(P_{data}).....	36
4.4.	Düğüm Akış Şemaları ve Algoritmalar	36
4.4.1.	Koordinatör Düğüm Akış Şeması ve Algoritmaları	37
4.4.1.1.	Koordinatör Düğümün Kanal Tahsis Algoritmaları.....	38
4.4.2.	Algılayıcı Düğüm Akış Şeması	44
4.4.3.	Üç Yollu El Sıkışma	47
4.4.4.	Öncelik Temelli Röle Kabul Mekanizması	48
5.	RÖLE MEKANİZMASININ BENZETİMİNİN YAPILMASI.....	50
5.1.	Benzetim Ortamının Genel Yapısı	50
5.2.	Yeni Mekanizmanın Benzetim Ortamında Oluşturulması	52
5.2.1.	Proje Modeli	52
5.2.2.	Düğüm Modeli.....	52
5.2.2.1.	Koordinatör Düğüm Modeli.....	53
5.2.2.2.	Algılayıcı Düğüm Modeli	54
5.2.3.	Süreç Modeli	54
5.2.3.1.	Koordinatör Düğüm Süreç Modeli	55
5.2.3.2.	Algılayıcı Düğüm Süreç Modeli	56
5.2.4.	Paket Yapıları	59
5.2.4.1.	Zamanlama Paket Yapısının Oluşturulması.....	59
5.2.4.2.	Kontrol Paket Yapısının Oluşturulması	60
5.2.4.3.	Röle Paket Yapısının Oluşturulması	61
5.2.4.4.	Veri Paket Yapısının Oluşturulması	62
6.	BAŞARIM ÖLÇÜTLERİ.....	63
6.1.	Ağa Katılım Hızı	63
6.2.	Ağa Katılan Düğüm Sayısı.....	63
6.3.	Maksimum Uçtan Uca Gecikme	63
6.4.	Çarpışma Sayısı.....	63

6.5. Enerji Tasarrufu.....	64
7. BENZETİM ANALİZLERİ.....	65
7.1. Düğümlerin Aġa Katılma Durumu Sonuçları	69
7.1.1. Izgara Topoloji İçin Aġa Katılım Durumları.....	69
7.1.2. Doġrusal Topoloji İçin Aġa Katılım Durumları.....	70
7.1.3. Rasgele Topoloji İçin Aġa Katılım Durumları.....	71
7.1.4. Aġa Topoloji İçin Aġa Katılım Durumları	72
7.1.5. Tüm Benzetim Senaryolarında Aġa Katılım Durum Analizi	73
7.2. Aġdaki Gecikme Durum Sonuçları	73
7.2.1. Izgara Topoloji İçin En Yüksek Uçtan Uca Gecikme	74
7.2.2. Doġrusal Topoloji İçin Uçtan Uca Gecikme	75
7.2.3. Rasgele Topoloji İçin Uçtan Uca Gecikme	76
7.2.4. Aġa Topoloji İçin Uçtan Uca Gecikme	77
7.2.5. Tüm Benzetim Senaryoların Uçtan Uca Gecikme Analizi.....	78
7.3. Çarpışma Durum Analizi.....	78
7.4. Enerji Durum Analizi	81
7.5. Aġdan Kopan D�ġ�m�n Aġa Katılma Analizi	85
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	86
KAYNAKLAR.....	89
�ZGEMİř	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bağlantı biçimlerine göre KAA yapısı	1
2.1. Röle düğümlü KAA yapısı	7
3.1. Kablosuz Algılayıcı Ağlar'ın temel yapısı	8
3.2. Fiziksel koşullara göre KAA'lar.....	9
3.3. Algılayıcı düğümün bileşenleri	11
3.4. KAA protokol mimari yapısı.....	12
3.5. Yıldız topoloji.....	17
3.6. Örgü Topoloji	17
3.7. Melez Topoloji	18
3.8. Doğrusal topolojiye sahip KAA	18
3.9. Rasgele topolojiye sahip KAA	19
3.10. Izgara topolojisine göre dizilmiş KAA ağ yapısı	20
3.11. Ağaç topolojisine sahip KAA yapısı	20
4.1. Röle mekanizmasının iki KD'li rastgele dağıtılmış senaryosu	24
4.2. Röle mekanizmasının paket akış zamanlama senaryosu	26
4.3. Kontrol kanalı zaman dilimi çizelgesi.....	28
4.4. Formül 3.1'de görüldüğü üzere örnek bir zaman dilimi hesabı	29
4.5. Veri kanalı zaman dilimi çizelgesi	31
4.6. Zamanlama paket yapısı	33
4.7. Kontrol paket yapısı	34
4.8. Röle paket yapısı	35
4.9. Veri paketi yapısı.....	36
4.10. KD düğüm Ana Akış Şeması	37
4.11. 20 düğümlü örnek bir ağ dizilimi	39
4.12. KD'nin KPKT algoritmasının akış şeması	41
4.13. Röle Paketi ile Kanal Tahsis Algoritması.....	43
4.14. AD düğüm akış şeması	44
4.15. Uç düğümün röle olarak ağa katılmasının üç yollu el sıkışmalı paket senaryosu.....	48
5.1. 25-düğümlü senaryonun ızgara dizilimindeki proje model editörde yapılması	52
5.2. Düğüm Editör'de KD düğümün modelinin yapılması	53

5.3. Dügüm Editör’de AD’nin modelinin yapılması	54
5.4. Süreç Editör’de KD düğümün süreç modelinin yapılması.....	55
5.5. Süreç Editör’de AD düğümün süreç modelinin yapılması.....	56
5.6. Paket Editör’de zamanlama paket modelinin yapılması.....	59
5.7. Paket Editör’de kontrol paket modelinin yapılması	60
5.8. Paket Editör’de röle paket modelinin yapılması.....	61
5.9. Paket Editör’de veri paket modelinin yapılması.....	62
7.1. 25-düğümünden oluşan ağın farklı topolojideki düğüm dizilimleri.....	66
7.2. 50- düğümünden oluşan ağın farklı topolojideki düğüm dizilimleri.....	68
7.3. Izgara topoloji için düğüm sayılarına bağlı olarak ağa katılım durumları	69
7.4. Doğrusal topoloji için düğüm sayılarına bağlı olarak ağa katılım durumları.....	70
7.5. Rasgele topoloji için düğüm sayılarına bağlı olarak ağa katılım durumları.....	71
7.6. Ağaç topoloji için düğüm sayılarına bağlı olarak ağa katılım durumları	72
7.7. Tüm senaryoların ağa katılım performans analizi	73
7.8. Izgara topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi	74
7.9. Doğrusal topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi	75
7.10. Rasgele topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi	76
7.11. Ağaç topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi	77
7.12. Tüm senaryoların uçtan uca paket gecikmesinin mukayese edilmesi	78
7.13. Zamanlama kanalının çarpışma durumu.....	79
7.14. Çekişmeli kontrol kanalının çarpışma durumu.....	80
7.15. 25-düğümlü senaryolara ait enerji tüketimleri	82
7.16. 50-düğümlü senaryolara ait enerji tüketimleri	83
7.17. 100-düğümlü senaryolara ait enerji tüketimleri.....	83
7.18. 200-düğümlü senarolara ait enerji tüketimleri	84
7.19. Ağdan kopan düğümlerin tekrardan ağa bağlanması	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

3.1. Sık kullanılan KAA protokollerinin kıyaslanması	13
3.2. IEEE 802.15.4-tabanlı KAA protokolleri.....	14
3.3. Kablosuz Algılayıcı Ağ tasarım zorlukları ve gerekli mekanizmalar.	21
3.4. Nordic platformun özellikleri	23
4.1. KAK kanallarının tahsis durumu	27
4.2. VAK kanallarının tahsis durumu	30
4.3. YVAK kanallarının tahsis durumu	32
4.4. Paket türü kodlaması	33
4.5. Şekil 4.11'deki senaryoya göre örnek bir kanal tahsis tablosu	40
7.1. Düğüm sayılarına göre farklı dizilimlere sahip seneryoları özellikleri	65
7.2. Nordic platformunun enerji tüketim miktarları	81

SİMGELER DİZİNİ

S_{max}	Maksimum zaman dilimleme
R_d	Veri iletim oranı(bps)
L_{dp}	Veri paketi uzunluğu(bit)
L_{ifs}	İki paket arasındaki mesafe (bit)
S_n	Düğüm zaman dilimi(s)
T_{dp}	Veri paketi iletim periyodu(s)
T_{cp}	Kontrol paketi iletim periyodu(s)
C_u	Kanal kullanıcı sayısı
P_{one}	Tek paketin iletim süresi(s)
L_{cp}	Kontrol paketi uzunluğu(bit)
O_{ca}	Kanal tahsis sırası
C_{sch}	Zamanlama sayacı
P_{sch}	Zamanlama paketi
P_{data}	Veri paketi
P_{ctrl}	Kontrol paketi
P_{rly}	Röle paketi
$P_{rly-rls}$	Röle bırakma paketi
$P_{rly-ack}$	Röle olumlu cevap paketi
$P_{rly-nack}$	Röle olumsuz cevap paketi
$P_{rly-req}$	Röle istek paketi
s, sn	Saniye
T_{th}	Eşik zaman değeri(s)
P_{Tx}	Verici gücü(W)
P_{Rx}	Alıcı gücü (W)
P_{Sp}	Uyku durumunda harcanan enerji (W)
P_{LPL}	Düşük seviye dinleme gücü (W)
E_T	Tüm düğümler tarafından harcanan toplam enerji(W)
N_{Rpkt}	Tüm düğümler tarafından alınan toplam paket sayısı
N_{Tpkt}	Tüm düğümler tarafından gönderilen toplam paket sayısı
P_{PRP}	Bir paket alınırken harcanan enerji(W)
P_{PTP}	Bir paket gönderirken harcanan enerji(W)
C_N	Toplam düğüm sayısı

R_{ch}	Kanal veri oranı(bps)
L_{pkt}	Paket boyutu(bit)
W	Watt



KISALTMALAR DİZİNİ

KA	Kablosuz Algılayıcı Ağ	WSN	Wireless Sensor Network
AHK	Ağ Hizmet Kalitesi	QoS	Quality of Service
MEMS	Mikro Elektro-Mekanik Sistem	MEMS	Micro electro-mechanical Systems
ADD	Analog Dijital Dönüştürücü	ADC	Analog Digital Converter
EBS	Endüstriyel, Bilimsel, Sağlık	ISM	Industrial Scientific Medical
MTE	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü	MIT	Massachusetts Institute of Technology
Wi-Fi	Kablosuz Bağlantı Alanı	Wi-Fi	Wireless Fidelity
OEK	Ortam Erişim Kontrolü	MAC	Media Access Control
	Kişisel Veri Yardımcısı	PDA	Personal Data Assistant
	Sıvı Kristal Ekranı	LCD	Liquid Crystal Display
EKG	Elektrokardiyogram	EKG	Electrocardiogram
	Küresel Konumlama Sistemi	GPS	Global Positioning System
	Radyo Frekanslı Tanımlama	RFID	Radio Frequency Identification
AA	Alternatif Akım	AC	Alternating Current
RAM	Rasgele Erişimli Bellek	RAM	Random Access Memory
SRAM	Sabit Rasgele Erişimli Bellek	SRAM	Static Random Access Memory
		CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
KHz	Kilohertz	KHz	Kilohertz
MHz	Megahertz	MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz	GHz	Gigahertz
RF	Radyo Frekansı	RF	Radio Frequency
KD	Koordinatör Düğüm	CN	Coordinator Node
AD	Algılayıcı Düğüm	SN	Sensor Node
	Uçtan Uca Gecikme	ETE Delay	End-to-End Delay
RD	Röle Düğüm	RN	Relay Node
	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim	TDMA	Time-division multiple access

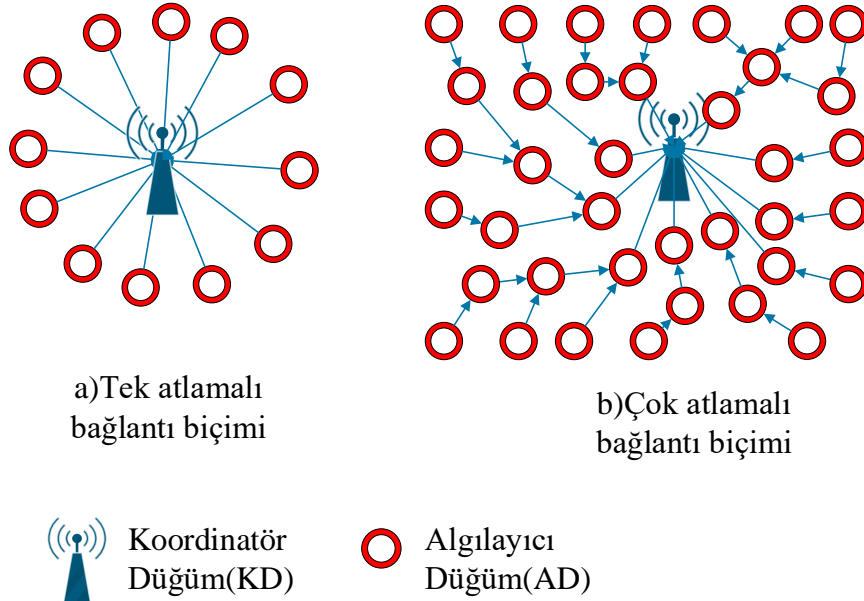
	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim	FDMA	Frequency-division multiple access
	Çarpışma Kaçınmalı Çoklu Erişim	CSMA-CA	Carrier-sense multiple access with collision avoidance
		IEEE	
KKAA	Kablosuz Kişisel Alan Ağı	WPAN	Wireless Personal Area Network
		ISO	International Organization of Standardization
		ISA	International Society of Automation
		IETF	Internet Engineering Task Force
	Radyo Alıcısı	Rx	Receiver Transceiver
	Radyo Vericisi	Tx	Transmitter Transceiver
		6LoWPAN	Internet protocol version 6 over LoWPAN
	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	PDF	Probability Density Function
KPKT	Kontrol paketleri ile kanal tahsis algoritması		
RPKT	Röle paketleri ile kanal tahsis algoritması		
KTT	Kanal tahsis tablosu		
VAK	Veri Amaçlı Kanal		
KAK	Kontrol Amaçlı Kanal		
YVAK	Yüksek Veri Amaçlı Kanal		
	Düşük Seviye Güç Tüketimi	LPL	Low Power Listen

1. GİRİŞ

Günümüzde haberleşme teknolojilerindeki son gelişmeler sayesinde çok küçük boyutlarda, daha az maliyetli ve daha fazla işleve sahip algılama görevi icra eden algılayıcı elektronik cihazlar (algılayıcı düğüm) üretilebilmektedir. Bu algılayıcılar basınç, sıcaklık, nem, hava kirliliği, ses vb. dış dünya verilerini algılayıp saklama ve birbirleri ile işbirliği yaparak kablosuz olarak iletebilme yeteneklerine sahiptir. Algılayıcı düğümlerin bu yetenekleri sayesinde belirli görevleri yerine getirmek üzere birbiri ile kablosuz olarak haberleşebilen çok sayıda algılayıcı düğümün bir araya getirilmesi ile Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) oluşturulmaktadır. Algılayıcı düğümler genellikle gözlemlenmek istenen bir yere, rastgele ya da düzenli olarak yoğun bir şekilde dağıtılabilir. KAA oluşturulurken algılayıcı düğümlerin konumlarının önceden belirlenmesine ihtiyaç yoktur. Son zamanlarda askeri, sağlık, ev otomasyonları, çevre görüntüleme, savunma vb. birçok alanda KAA uygulamaları hızla yaygınlaşmaktadır [1-3].

1.1. Bağlantı Biçimlerine Göre Kablosuz Algılayıcı Ağlar

KAA'larda temel eleman olarak, ağda kablosuz haberleşmeyi destekleyen ve algılama görevlerini yerine getiren algılayıcı düğümler (AD) ve bu düğümleri organize eden bir koordinatör düğüm (KD) bulunur. AD'ler dış dünya verilerini algılar ve kablosuz olarak KD'ye iletir. KAA düğümlerin birbiri ile bağlantı biçimlerine göre Şekil 1.1'de görülebildiği gibi tek-atlamalı ve çok-atlamalı olarak iki kısma ayrılır.



Şekil 1.1. Bağlantı biçimlerine göre KAA yapısı

Tek atlamalı bağlantı biçimine sahip KAA'larda AD'ler, KD ile doğrudan iletişime geçerler. AD'ler tarafından algılanan ve işlenen ham verileri doğrudan KD'ye iletirler. Ağın kurulması ve yönetilmesi kolaydır. Tek atlamalı bağlantı biçimi düğüm sayısının az olduğu kısa mesafeli ağ ortamlarında tercih edilmektedir ve uzun mesafeli KAA iletişimi için uygun değildir. Çok atlamalı bağlantı biçiminde KD'nin kapsama alanındaki düğümler KD ile doğrudan iletişime geçebilirken, KD'nin kapsama alanında olmayan AD'ler birbiri üzerinden (hop-by-hop) KD ile iletişime geçmektedir. Gönderici düğüm veriyi kendisine komşu olan ve ağa bağlanmış düğüme iletir. Veri, düğümler üzerinden aktarılarak merkezi birime ulaştırılır. Hedef düğüm ile kaynak düğüm arasındaki düğümler hem kendi algılama görevlerini yerine getirir hem de diğer düğümlerden gelen verileri bir sonraki düğüme iletirler. Çok atlamalı bağlantı biçimi düğüm sayısı çok fazla olan KAA'lar için tercih edilmektedir. Bunun sebebi düğüm sayısı arttıkça ağdaki girişim oranı artmakta ve karmaşık bir ağ yapısı oluşmaktadır. Algılayıcı düğümler de en fazla enerjiyi veri transferi sırasında RF (Radio Frekans) modülü harcamaktadır. Bundan dolayı ağ iletişim mesafesi arttıkça veri iletimi sırasında harcanan enerji miktarı da artmaktadır. Çok atlamalı bağlantı biçiminde düğüm en yakın komşu düğüme veri ileteceğinden kısa mesafe veri iletimi söz konusudur ve veri iletimi için daha az enerji gereksinimi duyulur. Böylece ağın toplam harcayacağı enerji miktarı azalacağından daha az enerji ile veri iletimi gerçekleşmiş olur [3-7].

1.2. Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Röle Mekanizmasının Önemi

Çok atlamalı KAA'lar için yukarıdaki avantajlarının yanı sıra; düğüm sayısı, ortam erişim metodu vb. gibi durumlardan kaynaklı dezavantajlar da ortaya çıkmaktadır. Çok atlamalı bağlantıda düğüm sayısına bağlı olarak atlama sayısı da artacağından uçtan uca gecikme (End To End Delay) de artmaktadır. Bu durumda uçtan uca gecikmenin ağın performansını olumsuz etkileyecek seviyeye ulaşacağı aşikârdır [8]. KAA oluşturulurken üzerinde çalışılan en temel konular enerji verimliliği [9], algılayıcı düğümlerdeki veri iletim hatalarının en aza indirilmesi, elde edilen verilerin iletimi sırasında bağlantı sorunlarının giderilmesidir [10]. Çok sayıda AD'den oluşan KAA yapısında, düğümlerin ağa bağlanması, yönetilmesi, verilerin eksiksiz toplanması, topoloji seçimi, enerji tasarrufu sağlama gibi birçok parametre bu tür ağlarda karşılaşılan en temel zorluklardır. Ayrıca çok sayıda düğüm olması ağın kolay yönetilmesi açısından kendi kendine organize olma özelliğinin esnek çalışmasını gerektirmektedir. Gizli terminal problemi [11] ve eş zamanlı iletişimden kaynaklı problemler (çarpışma) sık karşılaşılan problemlerdir. Bu tür ağlarda çok muazzam bir veri trafiği oluşacağından sıkışıklık problemleri de ortaya çıkmaktadır. Tüm bu olumsuzluklar, çok atlamalı KAA için çözülmesi gereken problemlerdir. Bu problemlerin çözümü

için KAA mimarisinde her katmanda çok iyi mekanizmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Paket çarpışması, gecikme, hata kontrol, radyo kullanımı gibi durumların kontrol edildiği ortam erişim katmanında çok gelişmiş ve esnek mekanizmalara ihtiyaç vardır. Çok sayıda AD'den oluşan KAA'larda haberleşme metotlarında AD'leri ağda tutmak ve çarpışmadan kaynaklı veri kayıplarını en aza indirmek için gelişmiş röle mekanizmalarına ihtiyaç vardır. Röle mekanizması çok atlamalı KAA'larda AD'lerin kendi algılama işlerini icra ederken diğer düğümler için de yönlendirici vazifesi görmesini sağlayan mekanizmadır. Röle mekanizmasına sahip bir ağda düğümler, algıladığı verileri bağlı olduğu düğüme iletirken aynı zamanda kendisine bağlı olan düğümlerin de verilerini iletir. Bazı ağlarda [12] röle düğüm (RD) olarak adlandırılan düğümler sadece gelen veriyi iletmek için programlanır. Algılama görevi icra etmezler. Çok atlamalı KAA'larda ağ performansını artırmak için çok iyi tasarlanmış röle mekanizmasına sahip OEK protokollerine ihtiyaç vardır [13–22].

1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Literatür Açısından Önemi

Bu tez çalışmasında önceki başlıklarda bahse konu olan çok atlamalı bağlantı biçiminden kaynaklı sorunların çözümüne yönelik olarak çok atlamalı KAA'larda OEK katmanı için yeni bir röle mekanizması tasarlanmıştır. Ortam erişim olarak melez (TDMA-zaman bölümlü çoklu erişim, FDMA- frekans bölümlü çoklu erişim) bir metot benimsenmiştir. Ayrıca tıkanıklık ve çarpışmayı en aza indirmek için çok kanallı bir yapı tercih edilmiştir. Kanal tahsis metodu olarak tahsis işlevini KD'nin yaptığı yeni bir merkezi sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu röle mekanizması sayesinde çok atlamalı KAA'da topoloji bağımsız çalışan bir yapı oluşturulmuştur. Birçok topoloji ağdaki iki temel ağ elamanı ile oluşturulabilmektedir. KD çok sayıda düğüme koordinatörlük (kanal tahsis, zamanlama) yapacak şekilde tasarlanmıştır. Ağa bağlanmada hiyerarşik bir yaklaşım benimsenmiştir. AD'ler kendi algılama görevinin yanında ihtiyaç durumunda alt düğümlerden gelen verileri üst düğüme iletmek için kullanacağı bir röle mekanizmasına sahiptir. Ayrıca bir RD'ye ihtiyaç duyulmamaktadır. KD'nin kapsama alanındaki AD'ler doğrudan KD'ye bağlanmaktadır (FDMA). KD kapsamında olmayan düğümler ağa bağlı bir komşu düğümden rölelik (dolaylı olarak ağa bağlanma) bir nevi ebeveyni olmasını istemektedir. Kabul durumunda ebeveyn düğümün kanalını kendi zaman diliminde (TDMA) kullanarak ağa bağlanmış olmaktadır. Bu durum KD'ye bağlı düğümlerden itibaren AD'ler kendi verilerini iletirken hiyerarşik olarak kendinden sonra gelen düğümlerin verilerini kendi ebeveynine iletme fonksiyonu ile donatılmıştır. Bu mekanizmaya sahip KD ve AD'ler ile başka bir ağ elemanına ihtiyaç duymadan her hangi bir topolojide ağ oluşturmak çok basit hale gelmektedir.

Bu çalışmayı literatür açısından önemli olmasını sağlayan başlıca özellikleri;

1. Çoklu topoloji desteği
2. Röle düğüm yerleştirme zorluğunun ortadan kalkması
3. Uçtan uca gecikmeyi azaltma
4. Kendi kendine organize
5. Çarpışmayı minimize etme
6. Üç yönlü el sıkışma ile gizli terminal problemini giderme
7. Uzun mesafeli iletişime uygunluk
8. Düğümlerin ağdaki sürekliliğinin sağlanması
9. Esnek bir röle mekanizması ile ağ kurmada kolaylık vb. gibi sıralanabilir.

1.4. Tezin Organizasyonu

Bölüm 1’de tez çalışması ile ilgili giriş bilgilerine yer verilmiştir. Bölüm 2’de tez çalışmasının konusu ile ilgili önceki çalışmalar kısmına yer verilmiştir.

Bölüm 3’de KAA ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir. KAA tanımı, uygulama alanları, KAA’yı oluşturan algılayıcı düğümlerin genel yapısı ve çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca KAA mimarisi, protokol yığını ve KAA protokolleri ile ilgili detaylı bilgiler anlatılmıştır. Daha sonra KAA’da, uygulamadan uygulamaya farklılık gösteren topolojiler ve çeşitleri hakkında bilgilere yer verilmiştir. Daha sonra KAA tasarımında karşılaşılan zorluklar ve bu zorluklar ile ilgili çözüm önerileri anlatılmıştır. Son olarak KAA mimarisinde OEK protokollerinin önemi hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Bölüm 4’te bu tez çalışması kapsamında geliştirilen çok atlamalı KAA için OEK katmanında çalışan yeni bir röle mekanizması tasarımı anlatılmıştır. Bu röle mekanizmasında tercih edilen kanal ve zaman tahsis metotları, geliştirilen röle mekanizmasına ait akış şemaları, paket yapısı ve paket türleri ele alınmıştır.

Bölüm 5’de Riverbed Modeler yapısı ve üstünlükleri ele alındıktan sonra geliştirilen röle mekanizmasının Riverbed Modeler ortamında oluşturulması anlatılmıştır. Çalışmanın ilk olarak proje editörde oluşturulan proje modeli anlatılmıştır. Daha sonra düğüm editörde düğüm modellerinin oluşturulması, süreç editörde düğümlere ait oluşturulan süreç modellerinin oluşturulması ve ağdaki paket yapıları detaylı olarak açıklanmıştır.

Bölüm 6’te röle mekanizmasının başarımlı ölçütleri değerlendirilirken dikkate alınacak ağ parametreleri anlatılmıştır.

Bölüm 7’te Riverbed Modeler ortamında yapılan çalışmanın benzetim sonuçları değerlendirilmektedir. Farklı senaryoların sonuçları mukayese edilmiştir. Çalışmanın üstünlükleri benzetim sonuçları ile analiz edilmiştir.

Son olarak Bölüm 8’de sonuç ve öneriler kısmına yer verilmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Daha önceki çalışmalar incelendiğinde, çok atlamalı KAA modellerinin kullanıldığı birçok yaklaşım gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda en temel hedefler enerji verimini artırma, uçtan uca gecikmeyi düşürme, çarpışmayı ve tıkanıklığı azaltmaktır.

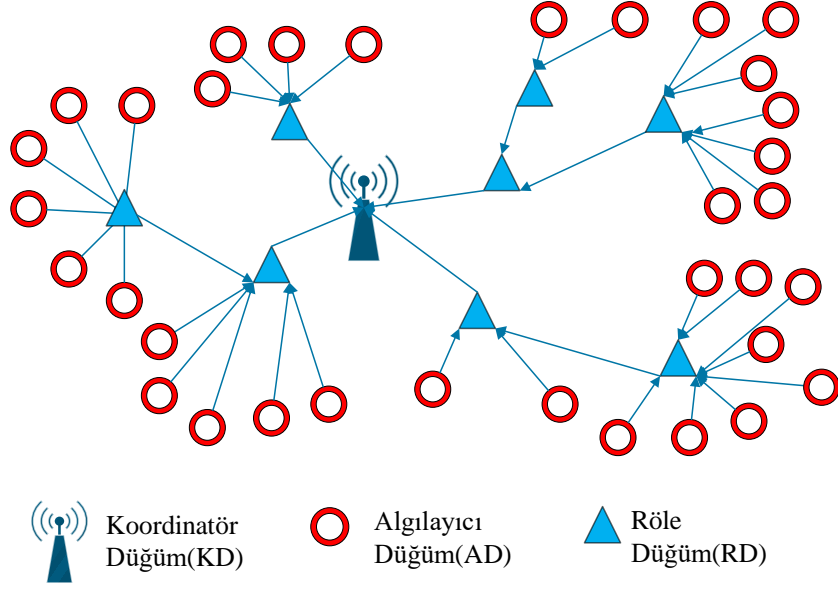
DW-MAC (Demand Wakeup MAC) [23] protokolü çok atlamalı KAA'larda düşük gecikme ve yüksek verimli enerji tüketimi amacıyla önerilmiştir. Yazarlar bu çalışma kapsamında yeni bir zamanlama algoritması önermişlerdir. İç döngü senkronizasyonu, veri iletimi ve uyku modu olmak üzere üç periyoda ayrılmıştır. Bu protokolün temel çalışma mantığı, ağdaki bir düğümün veri iletilmesi sırasında uyku modundaki diğer düğümlere uyanma talebi göndermesi temeline dayanmaktadır. Böylelikle enerji verimliliği sağlanmış olmaktadır.

AM-MAC (Adaptive Multi-hop MAC) [24] protokolü çok atlamalı KAA'ları destekleyen bir OEK protokolüdür.

L-CSMA [14] adını verilen çalışmada, doğrusal KAA için CSMA tabanlı bir metot önerilmiştir. Bu çalışmada doğrusal şekilde dizilen düğümler hem veri üretmekte hem de başka düğümlerin verilerini hedefe doğru iletmektedir. Bu çalışmanın amacı gizli terminal problemini önlemektir. Hedefe daha yakın düğümlere çekişmeli kanal erişimlerinde öncelik verilmesi, bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bu çalışmada sadece doğrusal yapıdaki KAA'lar için önerilerde bulunulmuştur ve topoloji desteği sınırlıdır.

Başka bir çalışmada, doğrusal topolojide çekişme tabanlı WiWi[25] adını verilen bir metot önerilmektedir. Bu metotta ağ boyunca doğrusal olarak dizilen düğümlerin, sabit boyuttaki bir mesaj ile zamanlama işlevi yapılmaktadır. Bu şekilde komşu düğümlerin eş zamanlı paket iletilmesinin önüne geçilmektedir.

Diğer bir çalışmada, doğrusal KAA'larda veri toplama hızını artırmak için birden çok algoritma [26] önererek içlerinde en uygun olanı bulmayı amaçlamışlardır. İlk algoritmada her düğüm için çalışma çevriminde kullanabileceği zaman dilimi atanmaktadır. Her döngüde önceki düğümünden paket almak ya da sonraki düğüme paket göndermek için bir düğüm uyanmaktadır. Diğer zaman dilimlerinde enerji tasarrufu için düğüm kendini uyku moduna almaktadır. Çalışma zaman dilimleri eş zamanlı iletişim olmaması için en az üç atlama sonraki düğüm ile aynı olabilmektedir.



Şekil 2.1. Rôle düğümlü KAA yapısı

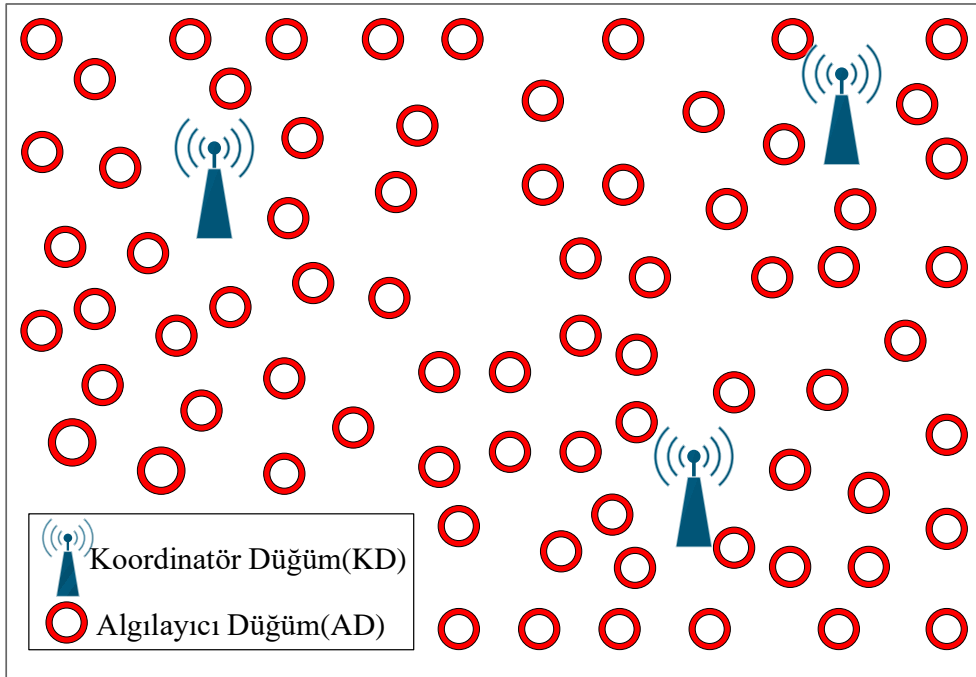
Detaylı bir literatür incelemesi ile çok atlamalı KAA'larda enerji tasarrufu sağlamak için düğümler arasına daha fazla enerjiye sahip RD'ler yerleştirilerek bu RD'ler vasıtası ile veri toplama metodu ile ilgili çalışmaların olduğunu görülmektedir [27–33]. Bu düğümlere rôle düğüm adı verilmektedir. Rôle düğüm yönteminde Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ağda üç temel elaman vardır; KD, AD ve RD. Bu yaklaşımda AD'ler algıladığı dış dünya verilerini RD'ye iletmekle görevlidir. RD sadece gelen veriyi iletir. Her RD birden çok düğümden veri toplayabilir. Veri KD'ye RD'ler üzerinden iletilmektedir. RD, AD'ye göre daha donanımlı yapıya sahiptir. Bu yaklaşımda RD yerleştirme gibi ek bir iş ortaya çıkmaktadır. Çünkü herhangi bir rôle düğüm kapsamında olmayan AD'ler ağa bağlanamaz ve algıladığı veriyi iletemezler. Ayrıca ek maliyetler oluşturmaktadır, sistemin kurulumu zaman alıcı ve maliyetli olmaktadır.

3. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

KAA'lar, AD'lerin gelişmesi ve haberleşmedeki hızlı gelişmeler ile beraber birçok alanda kullanılmaya başlamış olup hızla yaygınlaşmaktadır. Başlangıçta askeri amaçlar için düşünülmüş ve uygulanmış olan KAA, her geçen gün geliştirilerek ticari ve ticari olmayan birçok alanda uygulanmaya başlanmıştır [34]. Askeri [34], sağlık [35, 36], çevre [37], kentsel [38] ve akıllı evler [39] gibi alanlarda uygulamaları hızla artmaktadır. Bu sebeple son zamanlarda araştırma konusu olarak KAA'ların önemi artmıştır. Günümüzde mobil telefonlardan otomobillere kadar çok geniş bir şekilde algılayıcılar kullanılmaktadır. Algılayıcıların birçok alanda kullanılması, KAA araştırma konusu olarak dikkatleri üzerine çekmesine neden olmuştur. Kullanım alanı ve karşılaşılan zorluklara göre araştırma konularının popülerliği artmaktadır. Fiziksel koşullar ve algılayıcı düğümlerin enerji kısıtlılığı gibi konular KAA tasarımında karşılaşılan zorlukların başında gelmektedir. Bu doğrultuda bu problemlerle ilgili çalışmalara, literatürde daha sık karşılaşılmaktadır [40, 41].

3.1. Kablosuz Algılayıcı Ağ Nedir?

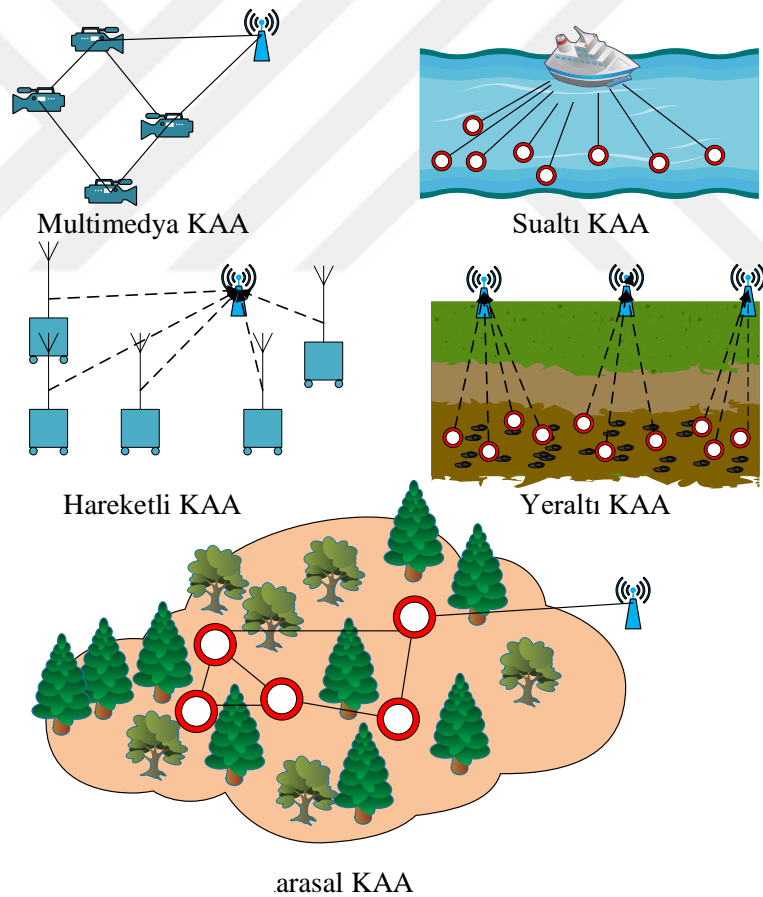
KAA'lar algılayıcı düğüm adı verilen bağımsız elemanlardan oluşur. Düğümler farklı görevler üstlenebilirler. Bir alana dağıtılmış onlarca veya daha fazla algılayıcı düğümler olabilir. Şekil 3.1'de örnek bir KAA yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1. Kablosuz Algılayıcı Ağlar'ın temel yapısı

Ağda bir veya daha fazla koordinatör düğüm bulunabilir. Koordinatör düğüm algılayıcı düğümlerden verileri toplar ve bir merkeze iletir. Ayrıca düğümlerin ağdaki kontrolünü yapar. KD KAA'larda ağ geçidi vazifesi görür [42]. İşlem kapasitesi ağdaki diğer düğümlere göre daha yüksektir. AD'ler sınırlı enerji ve hesaplama kapasitesine sahiptir. Asıl işi veri algılayıp koordinatör düğüme iletmektir. AD'ler birbiri ile kablosu haberleşerek KAA'ları oluşturmaktadır. KAA'larda ihtiyaç durumuna göre düğüm sayısı değişebilmektedir [43].

KAA'larda düğümler bir görevi yerine getirmek üzere bir alana düzenli ya da düzensiz olarak yerleştirilirler. Konumlarının önceden belirlenmesine gerek yoktur. Yüzlerce ya da binlerce AD'lerden oluşan bir KAA için kendi kendine organize özelliğinin olması gerekmektedir. KAA tasarımında başarı sağlamak için enerji kısıtlaması, bant genişliği kısıtlaması, ölçeklenebilirlik, kendi kendine organize olma ve sık sık topoloji değişikliği gibi parametrelere önem verilmesi gerekmektedir [44, 45]



Şekil 3.2. Fiziksel koşullara göre KAA'lar

AD'ler ihtiyaca göre hareket işlevine sahip olabilir. AD'ler bir alana dağıtıldıktan sonra ortamı gözetleme işlemine geçerler. Herhangi bir fiziksel dış olay meydana geldiğinde bu veriyi algılayıp uygun bir biçime dönüştürür ve bu veriyi kablosuz olarak haberleştiği koordinatör düğüme iletir[42]. KAA ortamı uygulamanın türüne göre değişir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi karasal[46], su altı [47, 48], multimedya [49], yeraltı [50] ve hareket [51] gibi fiziksel koşullara göre tasarlanmış birçok KAA uygulamaları mevcuttur [43].

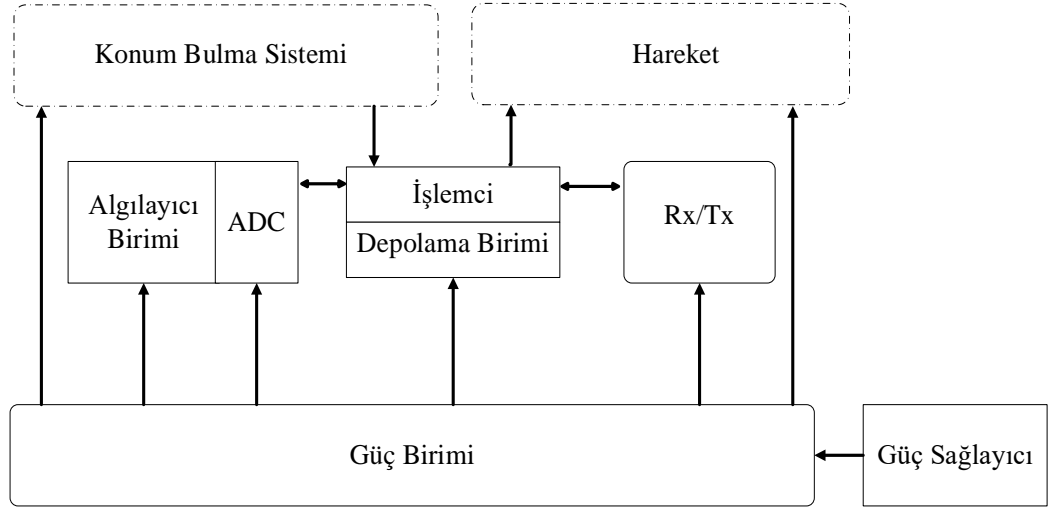
KAA'lar diğer geleneksel ağlardan farklı olarak kendine özgü özelliklere sahiptir. Kolay ve hızlı kurulum, az enerji tüketimi, ucuza mal edilme gibi birçok özellikler, geleneksel ağlara göre en önemli farklılıklarıdır. Bu farklılıklar aşağıda listelenmiştir.

1. Düğüm sayısı daha fazladır.
2. Bir alana daha fazla yoğunlukta dağıtılır.
3. Başarısız olmaya daha yatkındır [52].
4. Daha sık topoloji değiştirir.
5. Genelde diğer ağlarda uçtan uca iletişim yapılmasına karşın, KAA'larda broadcast olarak iletişim yapılır [1].
6. Düğümler, sınırlı enerji kaynağı, sınırlı hesaplama ve bellek kapasitesine sahiptir [1].
7. Düğümler evrensel bir kimliğe sahip değildir. Bulunduğu ağ içinde bir kimliği vardır [1].

Şekil 1.1'te gösterildiği üzere KAA düğümlerin bağlantı durumlarına göre tek atlamalı ve çok atlamalı olarak ikiye ayrılır. Tek atlamalı iletişim çok atlamalı iletişime göre veri aktarım için daha fazla enerji gerektirir. Tek atlamalı ağlarda uçtan uca gecikme daha azdır. Düğüm sayısı az olan KAA uygulamaları için tek atlamalı ağ, düğüm sayısı çok olan KAA uygulamalar için çok atlamalı ağlar tercih edilmektedir. KAA'nın en önemli kısıtlaması enerjidir. Bu yüzden geleneksel tasarsız ağlar (ad-hoc) ile ilgili çalışmalarda ağ iletişimi hizmet kalitesine (Quality of Service, QoS) odaklanılmasına karşın KAA'lar için yapılan çalışmalarda enerji verimliliği ile ilgili çalışmaların yoğunluğu görülmektedir [53–57].

3.2. Algılayıcı Düğümlerin Yapısı ve Çeşitleri

AD'lerin yapısı genel olarak Şekil 3.3'de gösterildiği gibidir. Enerji desteği sağlayan bir güç kaynağı olarak genellikle batarya kullanılır. Bataryalar yeniden doldurulabilir veya tek kullanımlık olabilir. Basit te olsa verileri işlemek için bir mikro denetleyici mevcuttur. Mikro denetleyici düğüm içindeki diğer bileşenleri kontrol eder.

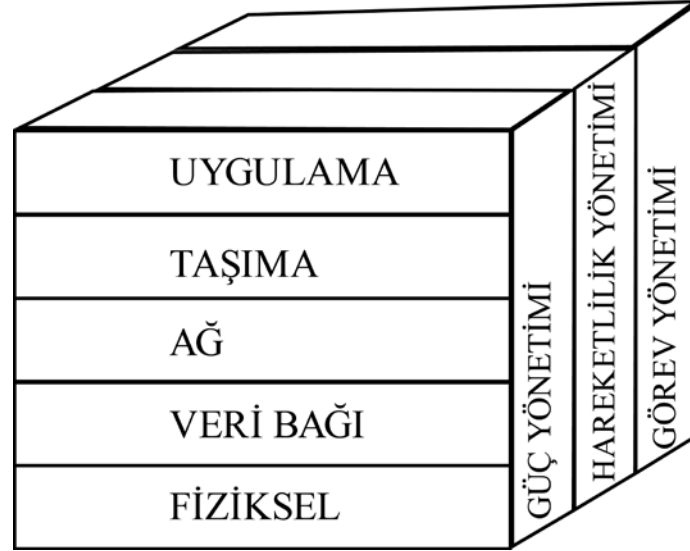


Şekil 3.3. Algılayıcı düğümün bileşenleri [1]

ADC (Analog Digital Convertor), Analog sinyalleri dijital sinyallere dönüştürür. Algılayıcı bileşenler dış dünyadaki fiziksel verileri algılamak için kullanılır. Alıcı-Verici antenler kablosuz haberleşmeyi sağlayan bileşenlerdir. Alıcı-Verici antenler tümleşiktir. Algılayıcı düğümler lisans gerektirmeyen ISM (Industrial, Scientific and Medical) frekans bandını kullanır. Bellek, elde edilen verilerin saklanması ve mevcut mikro denetleyici programının saklandığı bileşenlerdir [1].

3.3. Kablosuz Algılayıcı Ağ Mimarisi, Protokol Yığını ve Protokol Çeşitleri

KAA kullanım amaçlarına göre farklı ağ protokolleri kullanmaktadır. Bir uygulama alanında bir ağ parametresi önemli iken başka bir uygulama alanında çok önemli olmayabilir. İhtiyaçlara göre KAA protokolleri geliştirilmiştir. Örnek olarak Zigbee, düşük boyutlarda veri iletişimi gerektiren uygulamalar için uygunken yüksek bant genişliği gerektiren multimedya uygulamaları için uygun değildir. Bazı uygulamalar yoğun bir düğüm sayısı gerektirirken başka bir uygulamada hız parametresi önemlidir. Şekil 3.4. KAA protokol mimari yapısı verilmiştir. Mimari, 5 katman ve 3 düzlem olarak gruplandırılmıştır.



Şekil 3.4. KAA protokol mimari yapısı

Uygulama katmanında, uygulama yazılımlarının farklı tipleri oluşturulup kullanılır. İnternet yoluyla erişilmesi planlanan diğer ağlar için taşıma katmanına ihtiyaç vardır. Ağ katmanı, KAA’da yönlendirme işlemlerinin yapıldığı katmandır. Kümeleme işlemleri bu katmanda yapılır. Veri Bağı Katmanı(OEK), veri çerçeveleri bulma, hata kontrol, ortam erişim gibi işlemleri yapan katmandır. OEK katmanı ağ altyapısının oluşturulduğu ilk katmandır. Fiziksel katman, frekans seçimi, sinyal bulma, veri şifreleme gibi işlemlerden sorumludur.

Güç yönetimi düzlemi, güç yönetimi mekanizmalarının iyileştirilmesinin yapıldığı düzlemdir. Hareketlilik yönetimi, hareketlilik mekanizması iyileştirme düzlemidir. Düğümlerin hareket yeteneğinin yönetildiği birimdir. Görev yönetimi sayesinde her katmanda görev yönetimi yapılabilmektedir [1].

3.3.1. Kablosuz Algılayıcı Ağlar’da Protokol Çeşitleri

Zamanla KAA’larda farklı amaçlar için ağ protokolleri geliştirilmiştir. Bir uygulama alanında bir ağ parametresi önemli iken başka bir uygulama alanında çok önemli olmayabilir. KAA protokolleri ihtiyaçlara göre geliştirilmiştir. Çizelge 3.1’de KAA uygulamalarında sık kullanılan protokollerin özellikleri ve birbirleri ile karşılaştırılması verilmiştir [43].

Çizelge 3.1. Sık kullanılan KAA protokollerinin kıyaslanması

Özellik	IEEE 802.15.4 (ZigBee)	Bluetooth	Z-wave	ANT	Wavenis	Dash7	EnOcean
Frekans (ISM)	868/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz	sub-1 GHz	2.4 GHz	868, 915, 433 MHz	433 MHz	868; 315 MHz
Maksimum Veri Oranı	250 kbps	3 Mbps	40 kbps	1 Mbps	100 kbps	200 kbps	125 kbps
Mesafe	100 m	10–100 m	30 m		1–4 km	2 km	300 m
Batarya Ömrü	Günler, Yıllar		Bir Çok Yıl	Yıl	Bir Çok Yıl	Bir Çok Yıl	Batarya yok
Ağ Topolojisi	Yıldız, P2P, Örgü	P2P	Örgü	Yıldız, P2P Ağaç Örgü	P2P		
Güç Tüketimi	Düşük	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük	Düşük	Çok Düşük
Açık Kaynak	Evet	Evet	Evet	Hayır	Evet	Evet	Evet
IPv6	Evet	Hayır	Evet		Evet		
Hedef Piyasası	Akıllı Sayaçlar, Akıllı Şebekeler	Tüketici Elektronikleri	Ev otomasyonu, güvenlik, tüketici elektroniği	Sağlık Fitness	Akıllı Sayaçlar, Telemetre Akıllı Evler	Mobil Ödeme, Akıllı sayaç	Bina, Sanayi Otomasyon

3.3.1.1. IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 Çalışma Grubu [58] tarafından düşük veri hızı gerektiren Kişisel Alan Ağları için tanımlanmış KAA standardıdır. Kısa mesafelerde etkin olarak düşük seviyelerde enerji harcaması ve düşük veri iletimi sağlar. Çizelge 3.2’de IEEE 802.15.4 temelli protokoller ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. IEEE 802.15.4-tabanlı KAA protokolleri [43]

Standart	Topoloji	Batarya Ömrü(gün)	Ağ Düğümleri	İş Çıkarım	Alan (m)	Frekans
ZigBee	Örgü	100–1000+	255	250 kbps	10–100	868/915 MHz; 2.4 GHz
6LoWPAN	Örgü	100–365+	65536	250 kbps	1–100	
WirelessHART	Örgü	760+	200	250 kbps	1–100	2.4GHz
ISA100.11a	Örgü, Yıldız	1000+		250 kbps	100	2.4 GHz

ZigBee: Düşük veri hızı ve düşük maliyetli bir protokoldür. Genelde Zigbee kablosuz gömülü sistemler için kullanılır. ZigBee standardı ZigBee Alliance [59] tarafından sürdürülmektedir. KAA'lara en önemli katkılarından bir tanesi örgü ağ topolojilerini desteklemesidir.

6LoWPAN: 6LoWPAN Internet Engineering Task Force(IETF)'nin [60] 6LoWPAN [61] çalışma grubu tarafından geliştirilmektedir. 6LoWPAN, IPv6 paketlerinin IEEE 802.15.4 protokolündeki düşük enerji seviyeli WPAN (Wireless Personal Area Network- Kişisel Kablosuz Ağ Alanı) ağ ortamında iletilmesine olanak sağlamaktadır.

WirelessHART: WirelessHART [62] ilk olarak 2007 yılında duyurulmuştur. Daha çok endüstriyel uygulamalarda ölçüm ve kontrol mekanizması için kullanılmaktadır. WirelessHART ağ yapısında bir ağ geçidi, otomatik kontrol, ana makine uygulaması ve ağ yönetiminden oluşur. WirelessHART 2.4 GHz ISM bandında çalışır.

ISA100.11a: ISA100.11a protokolü [63] International Society of Automation (ISA) [64] bir alt grubu olan ISA100 standart topluluğu tarafından geliştirilmektedir. Ağda temelde, saha cihazı, ağ geçidi ve elde tutulan cihaz bulunmaktadır. Endüstriyel otomasyon ihtiyaçlarını gidermek ana amacdır. ISA100.11a'nın temel özelliklerinden biri, 100 ms'lik düşük gecikme süresidir. Sadece 2.4 GHz ISM bandını kullanır.

3.3.1.2. Bluetooth ve Düşük Enerjili Bluetooth

1994 yılında İsveç mobil cep telefonu firması Ericsson [65], cep telefonları ve cep telefonu aksesuarları arasında kablosuz haberleşme imkânı sunan düşük enerjili, düşük maliyetli bir radyo arabirimi üzerinde çalışmalar başlatması Bluetooth teknolojisinin doğuşu olarak kabul edilebilir. Daha sonra, 1998'de Ericsson [65], IBM [66], Intel [67], Nokia [68] ve Toshiba [69] firmaları kısa

mesafe kablosuz iletişim için uluslararası bir standart olarak kabul ettiler. Bluetooth mobil bilgisayarlar, Kişisel dijital asistan (Personal Digital Assistant-PDA)'lar, taşınabilir telefonlar ve birbirlerine kısa kablolarla bağlanan cihazların kablosuz haberleşmesini sağlamak üzere geliştirilmiş yeni bir kablosuz ağ türüdür. Bluetooth teknolojisi de radyo ve televizyon yayınlarına paralel RF teknolojisini temel alır. Bluetooth 2.4 GHz'deki lisanslı olmayan ISM bandını kullanır. Yüksek katmanlarında ise kızıl ötesi kablosuz haberleşme teknolojisinde kullanılan transfer ve uygulama protokollerini kullanır.

Bluetooth enerji durumun iyileştirilmesi için Bluetooth Low Energy(BLE) teknolojisi duyurulmuştur. Bu durum sağlık, spor, güvenlik ve uygulamalarında kullanıma uygun hale getirilmektedir. BLE bilinen Bluetooth gibi 2.4GHz ISM bandını kullanmaktadır. Ancak kanal ayarlaması farklıdır. Bluetooth kanalı 1 MHz 79'lik kanala bölerken; BLE kanalı 2MHz'lik 40 kanala böler. BLE 200m'ye kadar diğer protokollere göre daha az enerji harcayarak 1Mbps veri iletebilir [70].

3.3.1.3. Z-wave

Z-wave [71] RF tabanlı bir teknolojidir. Daha çok uzaktan kontrol ve aydınlatma teknolojilerinde ev otomasyonları, gömülü sistemler gibi uygulamalarda kullanılır. Zensys tarafından geliştirilmiş şu anda ZWave Alliance [72] tarafından desteklenmektedir. En önemli sunduğu avantajlardan bir tanesi diğer kablosuz teknolojilerden yayılan sinyallerden etkilenmemesidir. 900 MHz (868.42-908.42) dolaylarında işlev görür [73].

3.3.1.4. ANT teknolojisi

ANT [74] teknolojisi çok düşük enerji ihtiyacı duyan kablosuz uygulamaları için uygun bir protokoldür. 2.4 GHz ISM bandını kullanır. Düşük maliyet gerektirir. Birçok ağ topolojisine destek verir. Yıldız, eşten eşe iletişim, ağaç topolojisi gibi birçok topoloji ile uyumludur. Spor, sağlık, evde bakım sistemleri için uygundur. Enerji verimliliği yüksektir. IEEE 802.15.4 (250 kbps) ağları düşündüğümüzde 1Mbps veri iletim oranı ile veri iletim performansı daha yüksektir [43].

3.3.1.5. Wavenis teknolojisi

Wavenis teknolojisi [75] Coronis [76] tarafından geliştirilmiştir. Çok uzak mesafelere çok düşük enerjilerle veri aktarabilmektedir. İlk olarak 2001 yılında bir firmaya özgü geliştirilmiştir. Ayrıca 2008 yılından sonra Wavenis Open Standard Alliance tarafından açık kaynak olarak

sunulmaktadır. Uzaktan kontrollü sağlık uygulamaları, telemetre uygulamaları, endüstriyel uygulamalar, alarm sistemleri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [77].

3.3.1.6. Dash7

Açık standartlı ISO 18000-7 temelli bir kablosuz ağ protokolüdür. Dash7 [78] 433 MHz bandında aktif RFID(Radio-Frequency Identification) kullanır. Algılayıcı ağlar uygun olan çok düşük seviyelerde enerji harcaması yapar. Çok yıllara uzanan batarya ömrüne sahiptir. Dash7'i diğerlerinden ayıran özellikleri çok yıllı batarya ömrüne sahip olması,10 km'ye kadar düşük gecikmelerde veri iletebilmesi, hareketli ve taşınabilir nesnelere için uygun olmasıdır. Kullanım alanlarına örnek olarak mobil ödeme, üretim, market zincirleri stok yönetimi, tehlikeli malzeme gösterimi, gelişmiş yer bildirimli hizmetler, akıllı sayaçlar ve bina otomasyonları verilebilir [43].

3.3.1.7. EnOcean

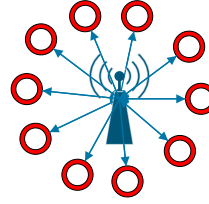
EnOcean[79] protokolü, KAA protokolü olarak ortaya çıkmış ve EnOcean Alliance [80] tarafından desteklenmektedir. Düşük seviyelerde enerji tüketimi çözümleri için uygundur. EnOcean kendi kendine enerji üreten KAA teknolojileri imkânı sunmaktadır. Bu enerjiyi çevresinden hareket, basınç, ışık, sıcaklık farkı gibi fiziksel etkileri kendi ihtiyacı olan enerjiye dönüştürerek elde eder. EnOcean kablosuz algılayıcı ağlar, endüstriyel otomasyonlar ve yapı sektöründe kullanılan algılayıcıların haberleşmesinde kullanılmaktadır. 868 MHz ve 315 MHz frekans bandını kullanır. Dış ortamlarda 300m iç ortamlarda 30m'ye kadar etkinlik gösterir [43].

3.4. Kablosuz Algılayıcı Ağ Topolojileri

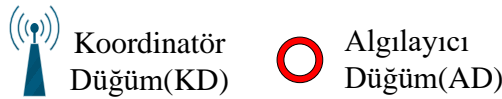
KAA uygulamaları ihtiyaç durumunda birden çok topoloji kullanmaktadır. Uygulamanın ihtiyacına göre literatürde birçok topoloji mevcuttur. Yıldız, örgü, melez topolojilerin yanı sıra doğrusal, kümeleme ve ağaç topoloji gibi topolojiler KAA uygulamalarında sıkça rastlanılabilmektedir. Her topolojinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Topoloji tercihleri ağın performansını ve ömrü üzerine doğrudan etkiye sahiptir. Ağın kendi kendine organize olması, çarpışmaları azaltma, sıkışıklıkları giderme, girişimleri azaltma, enerji tasarrufu sağlama ve ağ ömrünü uzatma için topoloji seçimi hayati öneme sahiptir. Karasal KAA uygulamalarında genellikle düğümler rastgele dizilim ile araziye dağıtılırken, petrol boru hattı için tasarlanacak bir KAA uygulamasında doğrusal topoloji tercih edilmektedir [81, 82].

3.4.1. Yıldız Topoloji

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi yıldız topolojide merkezde bir KD ve bunun etrafında KD ile doğrudan bağlantı kuran AD’lerden oluşur.



Yıldız topoloji

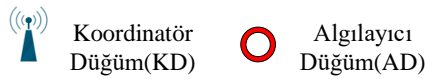
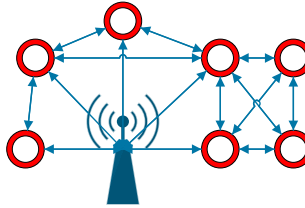


Şekil 3.5. Yıldız topoloji

Genelde bütün ağ çeşitlerinde kullanılan ve en basit topolojilerdendir. Düğümler kendi arasında veri alış-verişi yapamazlar. Bu topolojinin avantajı, düğümlerin tek atlamalı iletişim yapmasıdır. Tek atlamalı haberleşmede düğümler arası veri gecikmesi daha azdır. Yıldız topolojili KAA’nın dezavantajı bütün düğümler merkez düğümün kapsama alanı içinde olması zorunluluğudur [82].

3.4.2. Örgü Topoloji

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi örgü ağ topolojisinde bir düğümün kapsama alanı içinde bulunan bütün düğümler ile haberleşebilmektedir.

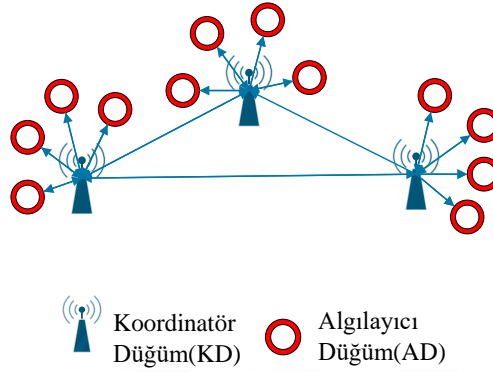


Şekil 3.6. Örgü Topoloji

Geniş arazilere yayılma ihtiyacı duyan büyük çaplı KAA uygulamaları için kullanışlı bir topolojidir. Bir bağlantı noktasından kopan bir algılayıcı düğüm diğer bir bağlantı noktasıyla iletişime geçip ağda kalmayı sürdürebilmektedir. Geniş alan kablosuz algılayıcı ağlarında oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Çok atlamalı iletişim kurulması durumlarında örgü topoloji çok kullanışlıdır. Örgü topolojide karakteristiği gereği yönlendirme işlevleri önem kazanmaktadır [83].

3.4.3. Melez Topoloji

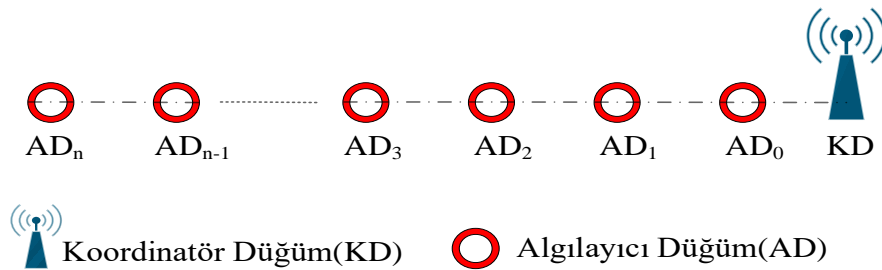
Şekil 3.7’de görüldüğü gibi yıldız ağ topolojisi ile örgü ağ topolojisinin yapısını bir arada kullanarak ağın kapsama alanını genişletmek ve enerji tüketiminin de alt seviyelere indirilmesi için düşünülmüş bir kablosuz ağ bağlantı biçimidir.



Şekil 3.7. Melez Topoloji

Bu ağ topolojisinde sınırlı enerji kapasitesine sahip düğümlere başka düğümlerin bağlanmasına izin verilmez. Kapasitesi daha yüksek düğümler başka düğümlere aracılık edebilir. Sınırlı kapasiteli düğümler sadece kendi verilerini yüksek kapasiteli merkezi düğüme iletmekle görevlidir. Bu şekilde daha az enerji tüketilerek kablosuz ağ alanı genişletilmiş olmaktadır. Bu topolojiye özellikle ZigBee teknolojilerinde rastlanmaktadır. Zigbee KD’ler diğer Zigbee düğümlere göre daha yüksek enerji kapasitesine sahiptir [83].

3.4.4. Doğrusal Topoloji

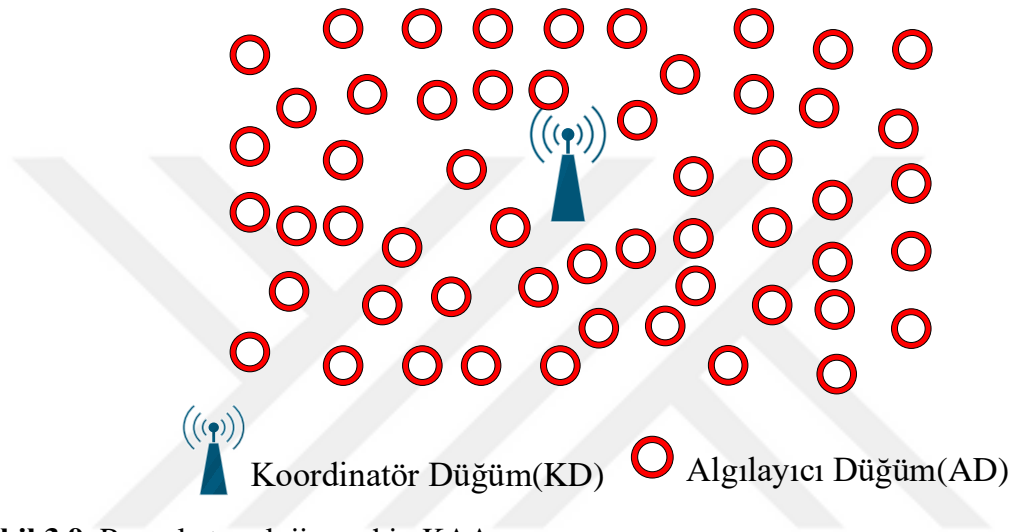


Şekil 3.8. Doğrusal topolojiye sahip KAA

Doğrusal topoloji Şekil 3.8’de gösterildiği gibi birçok AD’nin bir çizgi halinde izleme alanına dizilmesi ile oluşmaktadır. Son zamanlarda doğrusal topolojinin kullanıldığı sınır boyları, gaz, petrol ve su boru hatlarının gözlemlenmesi vb. birçok alanda yapılmış uygulamaları mevcuttur. Kullanım sıklığıyla beraber doğrusal topolojinin önemi artmıştır [84].

Doğrusal topolojide kaynak düğümden veriler diğer düğümler üzerinden aktarılarak KD'ye iletilmektedir. Aktarım mesafesi artıkça düğümlerin paket gönderim başına tükettiği enerjide artmaktadır. Düğüm sayısı artıkça paketlerin uçtan uca gecikmesi ve koordinatör düğüme yakın olan düğümlerin veri trafiği artmaktadır. Doğrusal topolojiler için geliştirilen protokollerin gecikmeye karşı duyarlı olması, bağlantı sorunu olmaması ve verilerin hatasız bir şekilde merkeze iletilmesi gibi karakteristiklere sahip olması gerekmektedir [85].

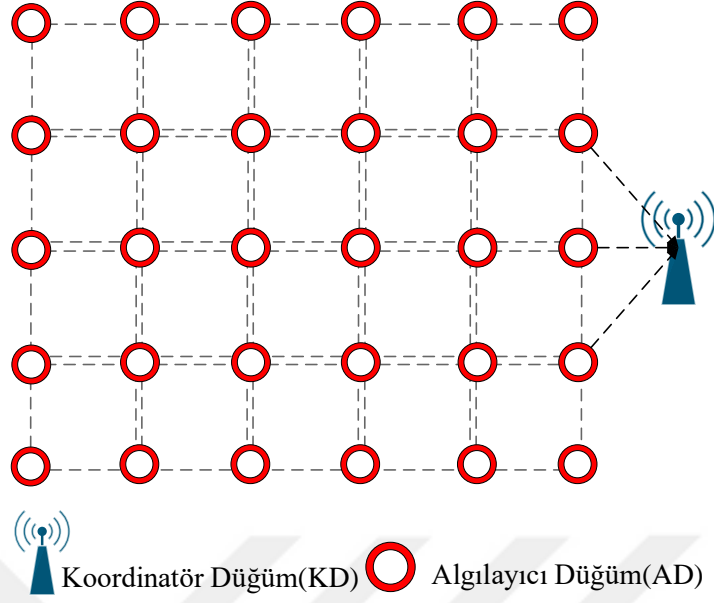
3.4.5. Rasgele Topolojisi



Şekil 3.9. Rasgele topolojiye sahip KAA

Rasgele topolojide AD'ler, konuları önceden belirlenmeksizin ağ ortamına Şekil 3.9'da görüldüğü gibi dağıtılırlar. Rasgele topolojiye sahip KAA'larda en iyi verimin alınması için kendi kendine organize, yönlendirme ve ağa katılım mekanizmalarının iyi çalışması gerekmektedir [86]. Özellikle fiziksel koşulların zor olduğu karasal [87, 88] ve çevresel [89, 90] uygulamalarda genellikle rasgele topoloji kullanılmaktadır.

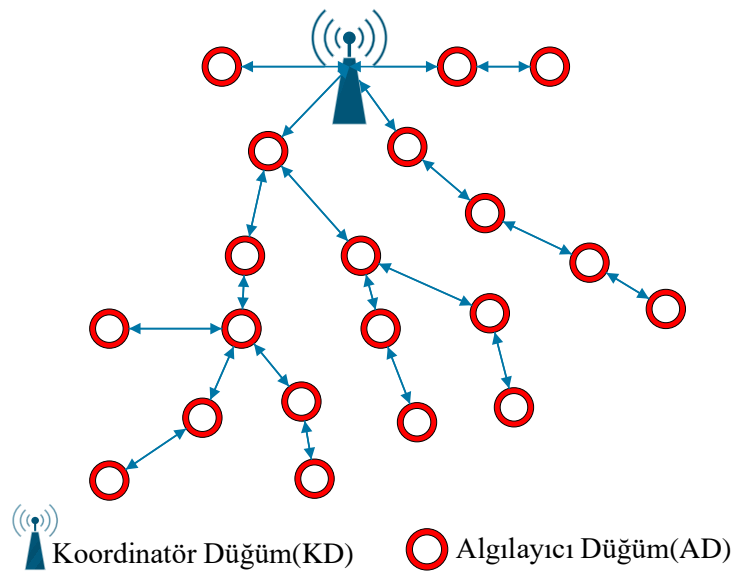
3.4.6. Izgara Topolojisi



Şekil 3.10. Izgara topolojisine göre dizilmiş KAA ağ yapısı

Bazı KAA uygulamalarında [91] AD'ler ızgara benzeri bir dizilim ile ağ ortamına dağıtılırlar. AD'ler düzgün bir biçimde Şekil 3.10'da gösterildiği gibi yerleştirilir. Bu tür KAA topolojilerinde uç düğüm verilerinin KD'ye birden çok yoldan ulaşma imkânı olduğundan verilerin en kısa yoldan KD'ye ulaştıracak yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

3.4.7. Ağaç Topolojisi



Şekil 3.11. Ağaç topolojisine sahip KAA yapısı

Ağaç topolojisi KD'den itibaren düğümlerin her biri bir ata düğüme bağlanması ile ağaç yapısı benzeri bir dizilim gösterir. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi ağaç topolojisindeki AD'ler arasında hiyerarşik bir yapı vardır. Her AD'nin KD'ye kaç atlama ile ulaşacağı bir seviyesi vardır. Bu topolojide veri iletimi, kaynak düğümden itibaren her düğüm kendi ata düğüme ilemesi ile KD düğüme ulaştırılması şeklinde gerçekleştirilir [92].

3.5. Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Tasarım Zorlukları ve Kısıtlamaları

KAA tasarımını etkileyen bir takım faktörler mevcuttur. Bu faktörler tasarlanmak istenen protokol ve algoritmaları olumsuz etkilemektedir. Düğümlerin kaynak kısıtlaması, KAA tasarımında başlıca olumsuz faktördür. Bununla ilgili enerji tasarruflu metotlar [9, 57, 93, 94] geliştirilmektedir. Enerji tasarrufu KAA mimarisinde Şekil 3.4'te görüldüğü gibi her katmanda yapılan çalışmalarda gözlenmektedir. Çevre koşulları düğüm ve ağ tasarlarken dikkate alınması gerekmektedir. Çizelge 3.3'te KAA tasarımını etkileyen faktörler ve gerekli iyileştirme mekanizmaları verilmiştir. Kablosuz algılayıcı ağları, uygulama ortamına kolay ve çabuk bir şekilde bırakılması, kendi başına yıllarca organize olarak müdahale edilmeden işlevleri yerine getirmesi sayesinde uygulama alanları çeşitlenmiştir [43].

Çizelge 3.3. Kablosuz Algılayıcı Ağ tasarım zorlukları ve gerekli mekanizmalar.

ZORLUKLARI	GEREKLİ MEKANİZMA
Kaynak Kısıtlamaları	Verimli kaynak kullanımı [57]
Dinamik ve zor çevre koşulları	Uyarlanabilir ağ işlemleri [95]
Veri bolluğu	Veri birleştirme ve yerel veri işleme [96, 97]
Güvensiz iletişim	Güvenlik iyileştirme [98]
Evrensel bir kimliğe(ID-Identification) sahip olmama	Veri merkezli iletişim örneği
Başarısızlığa meyilli olmak	Hata tolerans mekanizması geliştirme [99, 100]
Büyük ölçeklerde konuşlandırılmak	Düşük maliyet, düşük ölçekli düğüm, kendiliğinden organizasyon [101], otomatik kurulum

KAA tasarlarken uygulama ortamının fiziksel koşullarının iyi analiz edilmesi KAA uygulamasının başarılı olmasında önemli bir etmen olduğu aşikârdır. Örnek olarak; karasal bir KAA uygulaması ile denizaltı için düşünülen bir KAA uygulamasında ağdaki düğümlerin fiziksel

yapısı ve ağ iletişim mekanizması farklılık göstermektedir. Bu yüzden dinamik ve zor çevre koşulları KAA tasarımında karşılaşılan zorluklardan birisidir.

Binlerce düğümün olduğu bir KAA ortamında olağanüstü bir veri bolluğu oluşmaktadır. Bu verilerin eksiksiz işlenebilmesi için veri birleştirme ve yerel veri işleme(düğümelerde) mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. KAA'da şifreleme işlevleri yetersiz olduğundan güvenlik sorunu mevcuttur. KAA'da düğümler evrensel bir kimliğe (ID-Identification) sahip olmadığından, konumlandırma işlemlerinde RFID ve GPS (Global Positioning System) gibi teknolojilerden faydalanılmaktadır. KAA'da düğümlerin basit yapısından ya da dışarıdan müdahalelerden dolayı bir düğümün ağdan kopma ihtimali diğer geleneksel ağlara göre daha yüksektir. Bundan dolayı, KAA tasarımında iyi bir hata tolerans mekanizmasına ihtiyaç vardır [1-2].

3.6. Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin OEK Protokolleri ve Önemi

Sınırlı kaynaklara sahip olan algılayıcı düğümlerin kaynakları verimli kullanmasına etki eden faktörler arasında iyi tasarlanmış OEK protokolleri önemli bir yere sahiptir. KAA katmanlı mimarisinde OEK katmanının bağlantıda hata olduğu durumda yeniden veri transferi yapmanın sağlandığı, girişimlerin minimize edilmeye çalışıldığı, gecikmelerin azaltma çalışmalarının yapıldığı ve paket kayıplarını azaltmak için olası çarpışmaların engellendiği katmandır. Ayrıca düğümlerin alıcı-verici (Rx/Tx) radyo ünitesi bu katman tarafından kontrol edilmektedir. Algılayıcı düğümlerde radyo birimi enerji tüketiminin en fazla olduğu birimdir. Sınırlı enerji kaynağına sahip olan AD'ler için enerji tasarrufu ağ ömrü açısından çok önemli olduğu aşikârdır [9, 16, 102, 103].

Geleneksel diğer ağlara göre KAA'lar için güç desteği yönetimi zordur. Bu yüzden KAA tasarlarken ilk olarak amaçlanan ağ yaşam süresinin maksimize edilmesidir. Enerji tasarrufu çalışmaları Şekil 2.4'te görüldüğü üzere KAA mimarisinde her katmanın çalışma konusudur. İkincil olarak da ağ performansı değerlerinin iyileştirilmesi amaçlanır [104]. Tüm bu sebeplerle OEK katmanı için tasarlanan OEK protokolleri KAA uygulamalarının performansı için hayati öneme sahiptir.

Enerji tasarrufu, ölçeklenebilirlik, açıklık, düşük gecikme ve iş başarımları iyi bir OEK protokolünün karakteristikleridir. Algılayıcılarda radyo arabirimin durumlarını enerji harcamasına göre çoktan aza doğru sıralayacak olursak; veri iletimi, veri alma, dinleme ve uyku durumlarıdır [55].

3.7. Kablosuz Algılayıcı Ağlar'da Çok Kanallı İletişim ve Çok Radyolu İletişim

Gelişen MEMS teknolojileri sayesinde donanımsal yapı olarak çok kanallı ve çok radyolu yapıyı destekleyecek AD'ler mevcuttur. FireFly [105], MICAz [106] ve Telos [107] gibi algılayıcı düğümler CC2420 [108] radyosu sayesinde, 16 kanallı çoklu haberleşmeyi desteklemektedir. Nordic nRF905 ve nRF9E5 radyoları da çok kanallı haberleşmeyi desteklemektedir. Nordic platformun özellikleri Çizelge 3.4'te tablo halinde verilmiştir. Toplamda 218 kanal desteği sunmaktadır [109, 110].

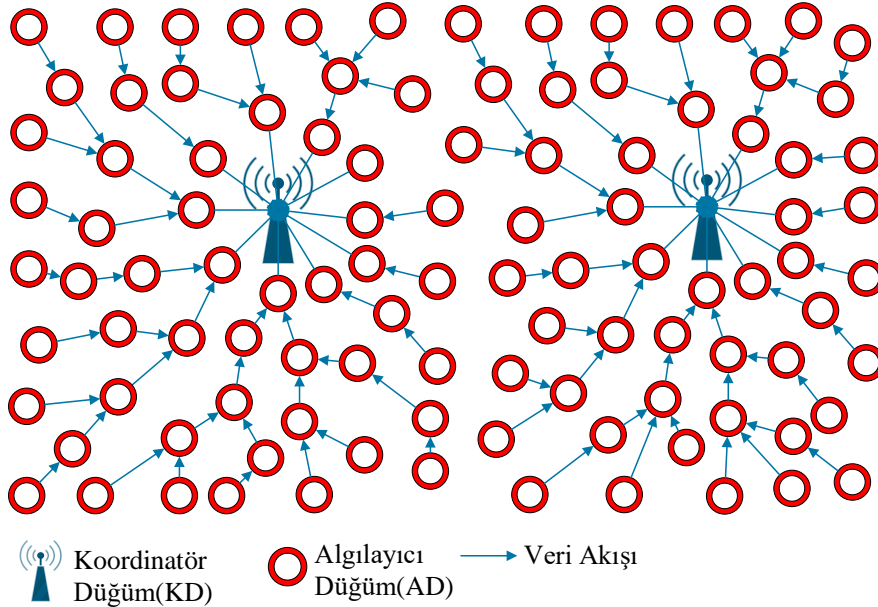
Çizelge 3.4. Nordic platformun özellikleri

Frekans Aralığı	Kanal Bant Genişliği	Kanal Sayısı
430 – 437,7 MHz	100 KHz	48
862 – 869,8 MHz	200 KHz	40
902-927.8 MHz	200 KHz	130

Çok kanallı haberleşme yaklaşımı birçok çalışmada tercih edilmektedir [111–115]. Bu çalışmada, AD ve KD'lerin iletişim radyoları için çift radyolu ve çok kanallı desteğine sahip olduğu için Nordic platformu temel alınmıştır. Çok kanallı haberleşme modelleri, girişim, çarpışma, gecikme gibi olumsuz birçok etkiyi azaltmaya yardımcı olmaktadır. Düğümlere farklı frekans atama şansı olduğundan gerçek zamanlı iletişimde elverişli olmaktadır. Ayrıca farklı paket türlerinin farklı kanallardan ileterek bir kanalda oluşabilecek paket trafiğinin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır.

4. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN YENİ BİR RÖLE MEKANİZMASI

İyi bir röle mekanizmasından beklenen, çok atlamalı KAA'lardaki olumsuz durumları minimize etmesi ya da ortadan kaldırmasıdır. Düğüm sayısının çok olduğu karmaşık KAA uygulamaları için çok atlamalı yapıların tercih edildiği bir gerçektir. Düğüm sayısı arttıkça ağ yönetimi de karmaşık hale gelmekte, eş zamanlı iletişimden kaynaklı çarpışma olasılıkları artmakta, gizli terminal problemi ortaya çıkmakta ve girişim oranı artmaktadır. Kendi kendine organize olma ve topoloji değişiklikleri de çok sayıda düğümden oluşan KAA uygulamaları için öngörülmesi gereken zorluklar ve etmenlerdir. Bu tür KAA uygulamaları düğüm sayısı fazla olduğundan düğümlerin enerji yönetimi(batarya değişimi) çok zor bazen de imkânsız olmaktadır. Bu yüzden mekanizmanın enerji verimli olması kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 4.1'de örnek birçok atlamalı KAA yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Röle mekanizmasının iki KD'li rastgele dağıtılmış senaryosu

Çok atlamalı KAA'larda KD'nin kapsama alanındaki düğümler doğrudan iletişim kurarken, diğer düğümler birbiri üzerinden(hop-by-hop) iletişim kurarlar. Literatürde çok atlamalı KAA'lar ile ilgili düğümlerin birbiri üzerinden nasıl haberleşmesi gerektiği ile ilgili birçok yaklaşım mevcuttur [7, 16, 116, 117]. Bu önerilerde enerji tüketimini minimize etmek üzerine çalışmaların yoğun olduğunu görmekteyiz. Bu tez çalışmasında, enerjiden ziyade daha çok bağlantı sürekliliği, uçtan uca gecikme, topoloji değişimlerine adaptasyon gibi diğer KAA konularına odaklanılmıştır. Çalışmanın temel karakteristikleri;

- Çok kanallılık

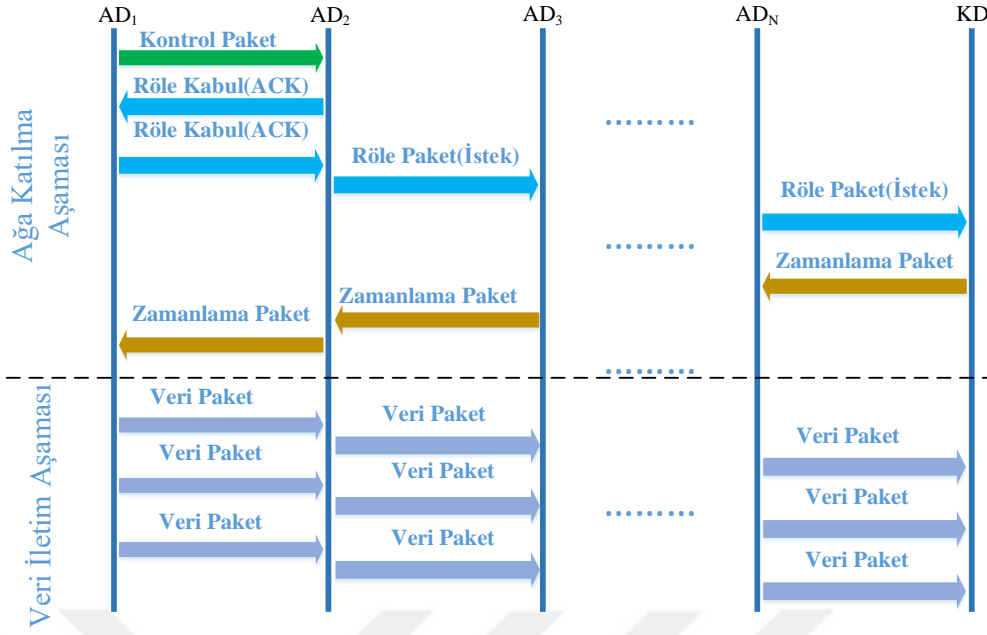
- Melez OEK yaklaşımı
- Esnek bir röle mekanizması
- Melez kanal tahsis yaklaşımı (statik, yarı dinamik)
- Üç yöllü el sıkışma

Çalışmanın temel amaçları;

- Birçok topolojiye uygunluk (kümeleme tabanlı topoloji, doğrusal topoloji, yıldız topoloji, rastgele topoloji, ağaç topoloji vb. gibi)
- Röle düğüm yerleştirme problemlerini ortadan kaldırmak (RD'siz çözüm)
- Uçtan uca gecikmeyi azaltmak
- Kendi kendine organize
- Çarpışmayı minimize etmek (çok kanallı, TDMA, FDMA)
- Gizli terminal problemini gidermek (üç yöllü el sıkışma)
- Uzun mesafe iletişime uygunluk
- En önemlisi tüm düğümlerin ağa katılarak sürekli bağlantıda kalmalarını sağlamak
- Esnek bir röle mekanizması olarak sıralanabilir.

4.1. Tasarlanan Röle Mekanizmasının Genel Yapısı

Bu tez çalışmasında önerilen röle mekanizmasında, AD'ler kendi temel algılama görevlerini aksatmadan ağ hiyerarşisinde atası olduğu düğümlerin verilerini de hatasız bir şekilde iletmekle görevlendirilmiştir. Şekil 4.2'de uçtaki bir düğümün ağa katılma ve veri gönderme aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Röle mekanizmasının paket akış zamanlama senaryosu

Düğümmler ilk olarak uyandığı zaman, çekişme tabanlı(CSMA-CA) kanaldan etrafına kontrol paketi gönderir. Bu kontrol paketlerinde varsayılan olarak doğrudan KD'ye(ağa) bağlanma isteğı vardır. Yani röle istek biti "0" dır. Eğer KD, isteğı gönderen düğümün kapsama alanında ise ilgili düğüme doğrudan bir kanal ataması yapar. Bu durumu da zamanlama paketi ile düğüme bildirir. Düğüm gelen zamanlama paketinde kendisine atanan kanalları ayarlar ve bu kanallardan(FDMA) iletişime başlar. Bu şekilde ilk olarak KD'nin kapsama alanında olan düğümmler ağa bağlanırlar. Ağ doğrudan bağlanamayan AD'ler belli bir süre sonra ağ röle olarak bağlanmak için kontrol paketindeki röle istek bitini "1" yaparak çekişme tabanlı kanaldan kontrol paketi göndermeye devam ederler. Eğer kapsama alanında ağ katılmış rölelik için uygun başka AD'ler var ise bu isteklere Röle Kabul(ACK) paketleri ile ona rölelik yapacağını ve kaç atlama ile onu KD'ye ulaştıracağı Röle Kabul(ACK) bilgisini iletirler. Ağ röle üzerinden katılmak isteyen AD, bu gelen röle kabul bilgilerinden minimum sayıda atlama ile KD'ye ulaşmasını sağlayacak AD'yi kendine röle düğüm olarak kabul eder ve o düğüme bu durumu bir Röle Kabul(ACK) paketi ile bildirir. Röle olarak kabul edilen AD bu düğüm adına röle istek paketi oluşturur ve bağı olduğu KD'ye iletir. KD, röle düğümün kanallarını ağ katılmak isteyen düğüme atar. KD gerekli zaman ve kanal tahsislerini yaptıktan sonra zamanlama paketi ile röle düğüme bildirir. Röle düğüm zamanlama paketini ağ katılmak isteyen düğüme iletir. Zamanlama paketini alan düğüm artık bu kanallara kendini ayarlar. Kendi zaman diliminde(TDMA) ebeveyn(röle) düğümün kanallarını kullanarak verilerini iletmeye başlar. Veri iletim kanallarının bant genişliğı diğer kanallardan daha fazladır. Bu da gerçek zamanlı veri iletimine olanak sağlamaktadır. Ayrıca AD'ler daha yüksek

boyutlarda veri iletimi yapmak istediklerinde KD'ye kontrol paketi ile bildirirler. KD de yüksek boyutlarda veri transferi yapabilecekleri bir veri kanalı atamaktadır.

4.2. Mekanizmanın Kanal ve Zaman Dilimi Tahsis Yaklaşımları

Bu tez çalışmasında geliştirilen yaklaşımda çok kanallı ve melez bir kanal tahsis metodu benimsenmiştir. TDMA, FDMA, CSMA-CA ortam erişim metotları geliştirilen bu röle mekanizmasında kullanılmıştır. Bu çalışmanın gerçek hayatta uygulanabilirliği açısından Nordic NRF905 ve NRF9E5 [109, 110] iletişim çipleri temel alınmıştır. Bölüm 2'de Nordic NRF905 kanal yapısı detaylı olarak anlatılmıştır.

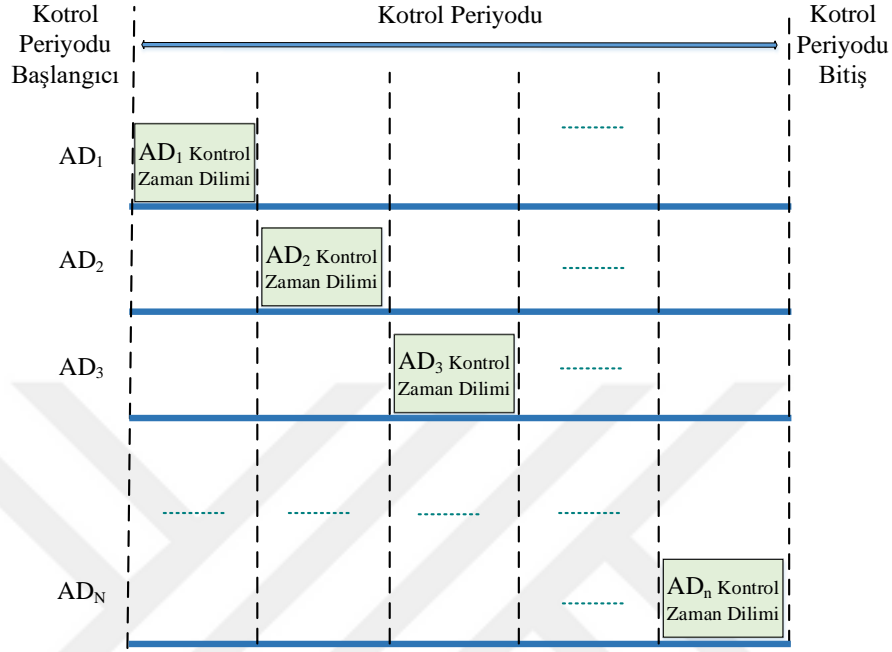
Çalışma kapsamında frekans bandının 430 – 437,7 MHz arası 100 KHz'lik 48 adet KAK(Kontrol Amaçlı Kanal) kanal düşük boyutlu kontrol paketi iletimi için kullanılmak üzere ayrılmıştır.

Çizelge 4.1. KAK kanallarının tahsis durumu

Kanal No	Kullanım Amacı	Tahsis Metodu
1-7	KD'ler Zamanlama paketi gönderir	Statik
8	AD ilk uyandığında çekişmeli olarak kontrol paketi gönderir.	Statik
9-48	AD'ler Ağa katıldıklarında kontrol ve röle paketlerinin iletimi için KD tarafından tahsis edilir.	Dinamik

Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi 1-7 arası kanallar KD düğümlerin AD düğümlere zamanlama paketleri göndermek için tahsis edilmektedir. KD düğümün radyosunun verici bölümüne (TX-transmitter) bu kanallardan biri statik olarak ayarlanmaktadır. Ayrıca bütün AD düğümler 1-7 arası KAK kanallarını dinleyecek şekilde statik olarak ayarlanmaktadır. AD'lerin TX kanalına frekans atarken yarı dinamik bir yaklaşım benimsenmiştir. KAK kanallarından 8. kanal ağdaki bütün AD düğümlerin radyosunun TX bölümüne varsayılan olarak ilk başta statik olarak atanmaktadır. AD düğümler ilk uyandığında bu kanaldan çekişme tabanlı olarak kontrol paketleri göndermektedir. KAK kanallarının 9-48 arası kanalları düğüm ağa katıldığında bu kanallardan birisi ona kontrol kanalı olarak tahsis edilir. Bu kanalların tahsisinde iki yaklaşım (FDMA, TDMA) mevcuttur. Birincisinde KD düğüme doğrudan kontrol paketi gelirse yani kontrol paketi (ağa katılma) gönderen AD kapsama alanında ise KAK kanallarının 9-48 arasındaki kanallar sıra ile tahsis edilmektedir (FDMA). İkinci yaklaşımda eğer bütün kanallar tahsis

edilmişse en az yoğun kanaldan itibaren kanal zaman dilimlerine bölünerek başka düğümlere de tahsis edilmektedir(TDMA). Eğer AD ağa dolaylı (röle) olarak bağlanma isteği gönderirse KD'ye doğrudan bağlı ata düğümün kanalları atanır.



Şekil 4.3. Kontrol kanalı zaman dilimi çizelgesi

Zamanlama diliminde düğümler her kontrol paketi gönderim periyodu geldiğinde kendi zaman diliminde kontrol paketini gönderirler. Zaman dilimlemesi Şekil 4.3'te gösterildiği gibidir. İlk katılan düğümün kullanıcı sırası "0" olduğundan kontrol periyodunda ilk dilimi almaktadır. Bir düğüm ortak bir kanalı kullanarak ağa katıldığı zaman KD tarafından o düğüme kanalın kullanıcı sayısı ve kendisinin kaçınıcı sırada kullanıcısı olduğu zamanlama paketleri ile bildirilmektedir. Bir düğüm kendi zaman dilimini aşağıdaki Formül(3.1) ile hesaplamaktadır.

$$S_n = \frac{T_{cp}}{C_u} x O_{ca} \quad (4.1)$$

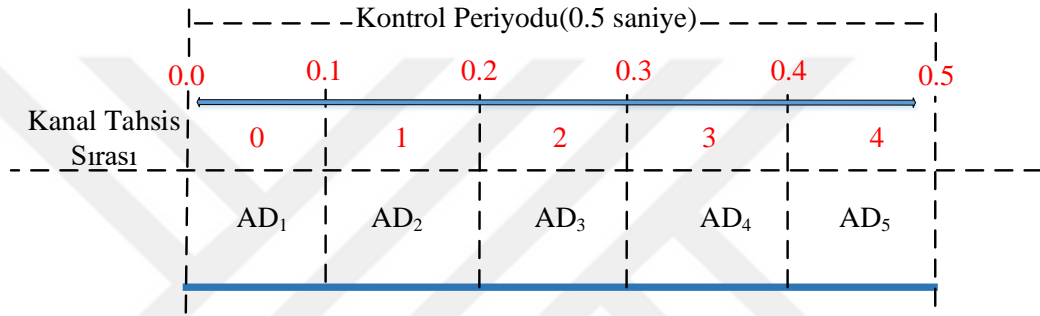
T_{cp} : Kontrol paketi iletim periyodu(s)

S_n : Algılayıcı düğümün zaman dilimi(s)

C_u : Kontrol kanal kullanıcı sayısı

O_{ca} : Kontrol kanal tahsis sırası(0,1,2,...n)

Sabit bir kontrol periyodunun(T_{cp}) atanan kanalın kullanıcı sayısına(C_u) bölünmesi ve sonucun kanal tahsis sırası ile çarpılması ile zaman dilimi hesaplanır. Örnek bir zaman dilimi hesabı Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Kontrol periyodu 0.5 saniye olan 5 düğümlü bir kanalda her düğüm 0.1 saniyelik zaman dilimlerini kullanmaktadır. Zaman dilimi aralığını kanal kullanım sırası ile çarpılması ile zaman diliminin başlangıcı bulunmaktadır. AD_1 kanalı ilk kullanan ve kullanım sırası 0'dır. Kontrol zaman periyodunun AD_1 hemen başlangıcından(0.0 saniye) kanalı kullanmaya başlar. AD_2 kullanım sırası 1'dir ve 0.1 saniyeden 0.2 saniye kadar AD_2 kanalını kullanır. AD_3 kullanım sırası 2'dir ve 0.2 saniyeden 0.3 saniye kadar AD_3 kanalını kullanır. AD_4 kullanım sırası 3'dir ve 0.3 saniyeden 0.4 saniye kadar AD_4 kanalını kullanır. AD_5 kullanım sırası 4'dir ve 0.4 saniyeden 0.5 saniye kadar AD_5 kanalını kullanır.



Şekil 4.4. Formül 4.1'de görüldüğü üzere örnek bir zaman dilimi hesabı

TDMA metodunda kanalı kullanan düğüm sayısı artıktıkça düğümlere ait zaman dilimleri de daralmaktadır. Dolayısı ile bir kanalın zaman dilimlemesinin sınırı olması gerekmektedir. KD'ye doğrudan bağlanan ve birçok düğüme rölelik yapan bir AD'nin paket trafiği alt düğümlerden röle olarak gelen paketlerden dolayı daha fazladır. Bundan dolayı bir kanalın maksimum zaman dilimlemesi KD'ye en yakın olan en fazla alt düğüme sahip AD'ye göre hesaplanması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen röle mekanizmasına göre maksimum kullanıcı sayısını tahmin etmek, düğüm sayısı değişken olduğundan zordur. Ancak teorik olarak bir kanalın maksimum kullanıcı sayısını aşağıdaki Formül (4.2) ve Formül 4.3 ile hesaplanabilmektedir.

$$P_{one} = \frac{L_{cp} + L_{ifs}}{R_d} \quad (4.2)$$

T_{cp} : Kontrol paketi iletim periyodu(s)

R_d : Veri iletim oranı(bps)

L_{cp} : Kontrol paketi uzunluğu(bit)

L_{ifs} : İki kontrol paketi arasındaki mesafe (bit)

S_{max} : Maksimum kullanıcı (zaman dilimleme) sayısı

P_{one} : Bir kontrol paketinin iletme süresi(s)

Bir kontrol paketi iletmek için gereken zaman periyodu(P_{one}) yukarıdaki Formül 4.2 ile hesaplanmaktadır. Bu tez çalışmasında kontrol paket boyutu(L_{cp}) 32-bit, kontrol paketleri arası boşluk(L_{ifs}) 5-bit ve kanal veri iletim oranı(R_d) 594000 bps olarak belirlenmiştir. Bir kontrol paketinin iletme süresi bu değerlere göre 6.23×10^{-5} saniye olarak hesaplanabilir.

$$S_{max} = \frac{T_{cp}}{P_{one}} \quad (4.3)$$

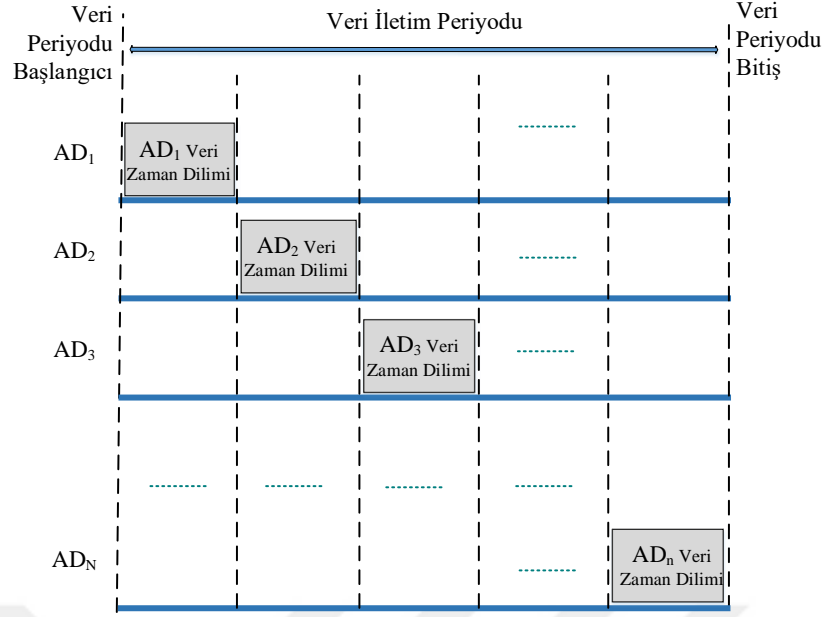
Teorik olarak bir kanalın en çok zaman dilimlemesi(S_{max}) yukarıdaki Formül 4.3 ile hesaplanır. Değerleri yerine koyduğumuzda bir kanal en çok $0.5/6.23 \times 10^{-5} = 8027$ zaman dilimine bölünebilir. Bir düğümün zaman aralığı hesabı $P_{one} \leq S_{max} \leq T_{cp}$ aralığında olması gerekmektedir.

Öte yandan frekans aralığının 862 – 869,8 MHz'lik arası 200 KHz 40 VAK(Veri Amaçlı Kanal) kanallar veri iletim için tahsis edilmektedir. Düğümlerin veri kanalları ilk başta boştur. Daha sonra ağa katıldığı zaman KD tarafından ona bir veri kanalı atanmaktadır ve düğümler verileri bu kanaldan iletmektedir.

Çizelge 4.2. VAK kanallarının tahsis durumu

Kanal No	Kullanım Amacı	Tahsis Metodu
1-40	AD'lere Veri haberleşmesi için atanır.	Dinamik

Çizelge 4.2'de VAK kanallarının tahsis durumu verilmiştir. Düğümler ağa katıldıkça bu kanallar sıra ile atanır. Bu kanalları atama şeklinde de hem FDMA hem de TDMA yaklaşımı benimsenmiştir. Düğüm sayısı 40 ve daha az olan ağda her AD düğüme bir kanal tahsis edilir. Düğüm sayısı 40'dan fazla olan ağda kanal tahsisinde bu kanallar sıra ile tekrardan zaman dilimlerine bölünerek tahsis edilmektedir. Bu şekilde melez bir ortam erişim metodu benimsenmiştir. Şekil 4.5'de veri kanalı zaman dilimlemesi verilmiştir.



Şekil 4.5. Veri kanalı zaman dilimi çizelgesi

Veri kanallarının zaman dilimi tahsisi, kontrol kanalı tahsis yaklaşımı ile aynıdır ve aşağıdaki Formül 4.3 ile yapılmaktadır. Zaman dilimleme hesabı, düğümler tarafından yapılmaktadır. Düğümlerin verilerini kendi zaman diliminde göndermektedir. Bu zaman dilimi hesabı aşağıdaki Formül (4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$S_n = \frac{T_{dp}}{C_u} \times O_{da} \quad (4.4)$$

T_{dp} : Veri paketi iletim periyodu(s)

S_n : Algılayıcı düğümün zaman dilimi

C_u : Veri kanalı kullanıcı sayısı

O_{da} : Veri kanalı tahsis sırası(0,1,2,...n)

Bir VAK kanalının TDMA zaman dilimlerine bölerken veri paketi periyodunun maksimum kullanıcı sayısını aşağıdaki Formül(4.5) ile hesaplanmaktadır.

$$P_{one} = \frac{L_{dp} + L_{ifs}}{R_d} \quad (4.5)$$

T_{dp} : kontrol paketi iletim periyodu(s)

R_d : Veri kanalı veri iletim oranı(bps)

L_{dp} : Veri paketi uzunluğu(bit)

L_{ifs} : İki veri paketi arasındaki mesafe (bit)

S_{max} : maksimum zaman dilimleme

P_{one} : Bir veri paketinin iletirme süresi

Bir veri paketinin iletirme süresi(P_{one}) yukarıdaki formül ile hesaplanmaktadır. Veri paketinin boyutu uygulamadan uygulamaya fark gösterdiğinden burada bir rakam verilmemiştir. Bir düğümün veri paketi zaman dilimi hesabı $P_{one} \leq S_{max} \leq T_{dp}$ aralığında olması gerekmektedir.

$$S_{max} = \frac{T_{dp}}{P_{one}} \quad (4.6)$$

Bu tez çalışmasında geliştirilen röle mekanizmasına göre, S_{max} sayısından fazla düğüm bir kanal tahsisi yapılamamaktadır. Bu durum Formül (4.6)'ya göre hesaplanmaktadır. Zaman periyodu ile kanalın veri iletim oranı çarpılarak bu kanaldan iletilmek istenen paketin boyutuna bölünerek maksimum kanal kullanıcı sayısı ya da zaman dilimlemesi hesaplanmaktadır. Veri iletimi bu tez çalışması kapsamı dışında olduğundan örnek hesaplamalara yer verilmemiştir.

Son olarak 902-927.8 MHz arası 200 KHz'lik 130 YVAK(Yüksek Veri Amaçlı Kanal) kanalları yüksek veri iletim ihtiyacı olduğu durumda kullanılmak üzere ayrılmıştır.

Çizelge 4.3. YVAK kanallarının tahsis durumu

Kanal No	Kullanım Amacı	Tahsis Metodu
1-7	KD'ler arası veri iletimi için tahsis edilmektedir.	Statik
8-130	AD'lerin yüksek veri iletim talebi durumunda KD'ler tarafından AD'lere tahsis edilir.	Dinamik

Çizelge 4.3'te YVAK kanallarının tahsis durumu verilmiştir. 1-7 arası kanallar KD düğümlerin kendi aralarında veri haberleşmesi yapması için tahsis edilmektedir. 8-130 arası kanallar eğer ağdaki AD'lerden yüksek veri iletim talebi gelirse KD, bu kanallardan birini ilgili düğümüne veri iletim kanalı olarak kullanması için atamaktadır.

4.3. Paket Türleri

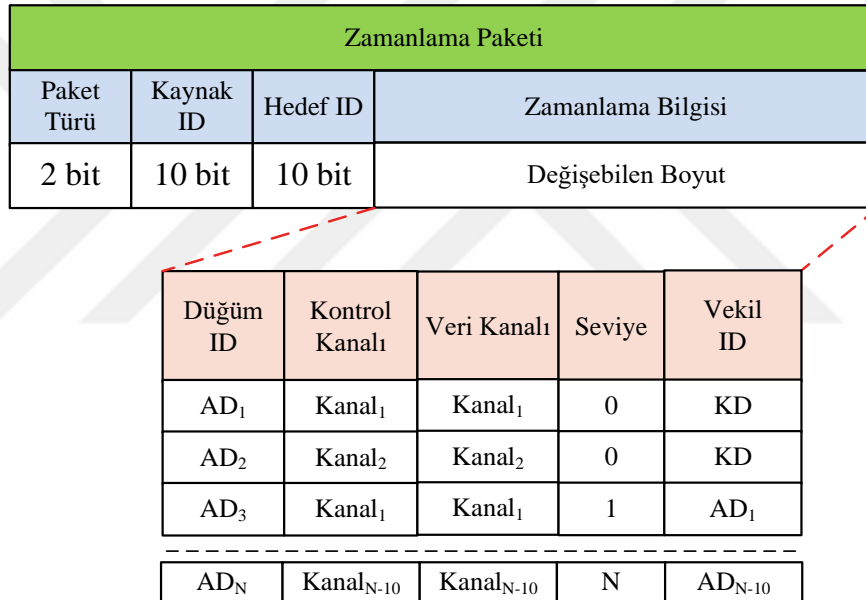
Bu çalışmada ağ elemanları kendi aralarında 4 paket türü ile iletişim kurmaktadır. Röle paketi (P_{rly}), kontrol paketi (P_{ctrl}), veri paketi (P_{data}) ve zamanlama paketidir (P_{sch}). Kontrol, röle ve veri

paketleri AD tarafından oluşturulurken, zamanlama paketleri KD tarafından oluşturulmaktadır. Paketlerin ayrımı için her pakette 2-bitlik bir paket türü alanı mevcuttur. Çizelge 4.4'te paket türlerin kodlanması verilmiştir.

Çizelge 4.4. Paket türü kodlaması

0	0	Zamanlama Paketi (P_{sch})
0	1	Kontrol Paketi (P_{ctrl})
1	0	Röle Paketi (P_{rly})
1	1	Veri Paketi (P_{data})

4.3.1. Zamanlama Paketi (P_{sch})



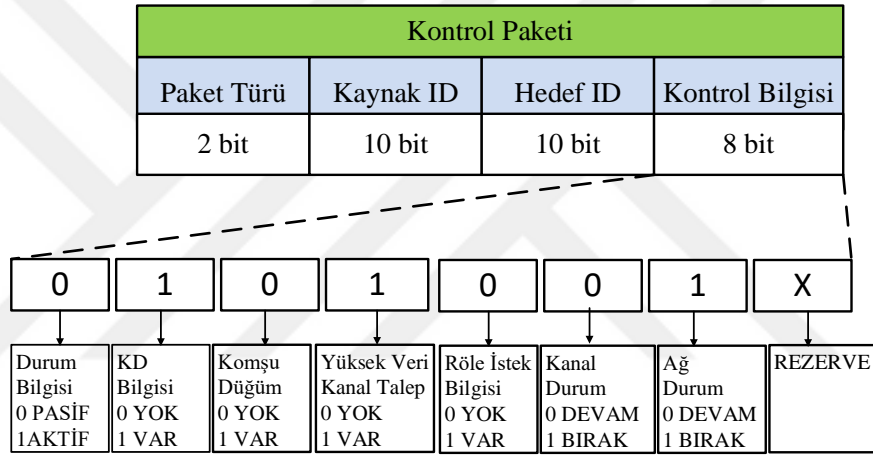
Şekil 4.6. Zamanlama paket yapısı

Zamanlama paketleri KD'nin kanal tahsis, kanal kullanım sırası ve vekil (ata) bilgilerini AD'lere ilettiği paket türüdür. AD'ler bu paketi aldığı zaman ağa katılıp ya da ağdan düşürülme gibi bilgilere erişmektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 2-bitlik paket türü, 10-bitlik kaynak düğüm kimliği (ID), 10-bitlik hedef düğüm ID ve ağın yoğunluğuna göre değişkenlik gösteren zamanlama bilgisi olmak üzere dört alandan oluşmaktadır. Paket türü alanında paketin hangi tür paket olduğu bilgisi saklanmaktadır. Kaynak ve hedef ID bilgileri gönderici ve alıcı düğüm bilgilerinin saklandığı kısımdır. Zamanlama bilgisi kısmında düğümlerin veri ve kontrol kanal tahsisleri, atanan kanalların başka kullanıcıları, seviye bilgisi ve vekil bilgisi bulunmaktadır. Bu alan ağdaki düğüm sayısına göre değişiklik göstermektedir. Paket akışı her düğüm kendi alt düğümlerine çok

atlamalı bir şekilde iletecek biçimdedir. İlk olarak KD, doğrudan bağlı düğümlere iletilmektedir. Daha sonra her düğüm röle olduğu düğümlere zamanlama paketini iletmektedir. Paket iletimi uç(röle olmayan) düğümlere kadar iletilmektedir.

4.3.2. Kontrol Paketi (P_{ctrl})

Kontrol paketleri AD düğümler tarafından ağa katılmak ve ağda sürekliliği sağlamak için oluşturulmaktadır. KD düğüm ya da diğer düğümler ile haberleşmek için kullanılmaktadır. AD'ler ilk uyandığı zaman KD düğüm aramak için çevreye kontrol paketi yaymaktadır. Herhangi bir cevap gelemese kontrol bilgisi kısmında bulunan röle istek bitini "1" yapar ve tekrar kontrol paketi göndermeye devam eder.

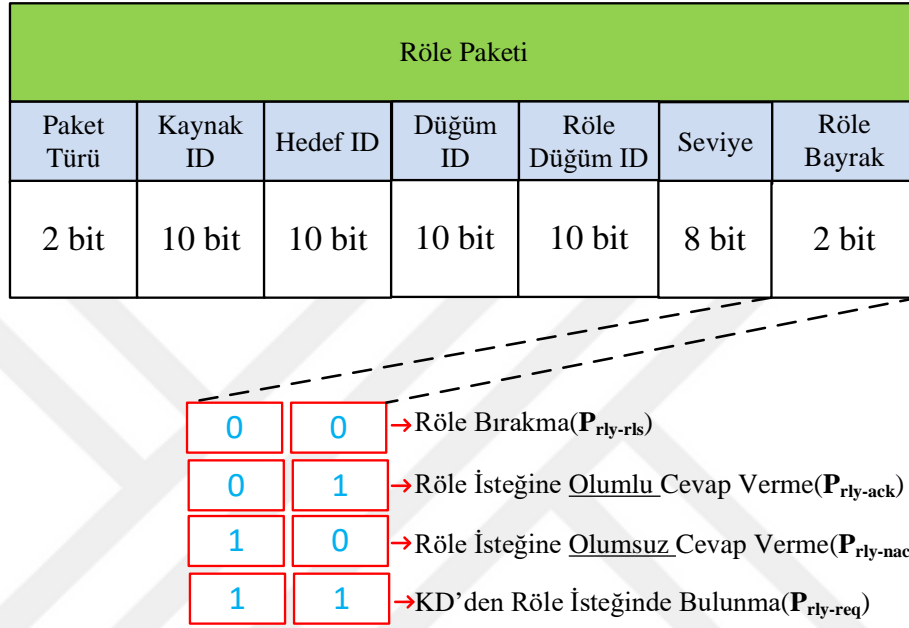


Şekil 4.7. Kontrol paket yapısı

Şekil 4.7'de bir kontrol paketi yapısı gösterilmektedir. Paket içeriğinde 2-bitlik paket türü bilgisi, 10-bitlik kaynak(oluşturan) düğüm kimliği (ID), 10-bitlik hedef düğüm ID'si ve 8-bit kontrol bilgisi olmak üzere 30-bitlik bir boyuta sahiptir. Paket türü kısmı paketin hangi paket türü olduğu bilgisini tutmaktadır. Kaynak ve hedef ID kısmında gönderici ve alıcı düğümün ID'si tutulmaktadır. Kontrol bilgisi kısmında 8-bitlik bir alan mevcuttur. 1. bit gönderen düğümün aktif ya da pasif olduğu bilgisini tutmaktadır. 2. bit doğrudan KD'nin bağlı olup olmadığını, 3.bit herhangi bir komşu AD'nin olup olmadığını, 4.bit yüksek boyutlarda veri transferi isteği olup olmadığını, 5.bit röle isteği olup olmadığını, 6.bit tahsis edilen kanalları bırakma bilgisini ve 7.bit ağı bırakma ya da devam bilgisini tutmaktadır. 8.bit rezerve edilmiştir.

4.3.3. Rôle Paketi (P_{rly})

Rôle paketi düğümün ağa rôle olarak bağlanması ya da bağlı ise, bağlı olduğu rôle düğümü bırakması için kullandığı sadece ağa katılma aşamasında kullanılan bir pakettir. Düğümün rôle olarak ağa bağlanması, rôle olarak bağlı ise tekrar kanalları bırakma durumunda ve KD düğümüne rôle isteği gönderme bu paket ile yapılan temel görevlerdir.



Şekil 4.8. Rôle paket yapısı

Rôle paket yapısı Şekil 4.8'de gösterilmiştir. 2-bitlik paket türü, 10-bitlik kaynak düğüm ID'si, 10-bitlik hedef düğüm ID'si, 10-bitlik düğüm ID'si, 10-bitlik rôle düğüm ID'si, 8-bitlik seviye bilgisi ve 2-bitlik rôle bayrak bilgisi olmak üzere toplam 4 alandan oluşmaktadır. Paket türü alanında paket türü bilgisi saklanmaktadır. Kaynak ID kısmında gönderici düğüm kimliği bulunmaktadır. Hedef ID kısmında alıcı düğüm kimliği bulunmaktadır. Düğüm ID kısmında rôle talebinde bulunan düğüm kimlik bilgisi saklanmaktadır. Rôle düğüm ID kısmında düğümüne rôle düğüm olacak düğümün kimliği eklenmektedir. Seviye alanında rôle olacak düğümde KD'ye kaç atlama ile ulaştığı bilgisi bulunmaktadır. Ağa katılmak isteyen düğüm paketindeki seviye bilgisine bir ekleyerek KD'ye kaç atlama ile ulaşacağını hesaplar. Bu şekilde en kısa atlama ile ulaşacağı KD'yi bulmaktadır. Rôle türü kısmında paketin hangi işlevi yapacağı bilgisi saklanmaktadır. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi 2-bitlik alanda "00" bilgisi varsa düğüm rôle kanallarını bırakıyor demektir. "01" bilgisi olduğu durumda ise gönderen düğüm rôle düğüm olmayı kabul ediyor demektir. Aynı zamanda alan düğüm bu kabule aynı paket yapısı ile cevap vermektedir. Eğer rôle düğüm isteğini kabul etmezse pakete "10" bilgisini eklemektedir. "11" bilgisinin eklenildiği rôle paket türünde

ise artık röle olacak düğüm KD düğüme ağa katılmak isteyen düğüm adına röle isteği göndermektedir.

4.3.4. Veri Paketi (P_{data})

Veri paketleri ağa katılan düğümlerin elde ettikleri dış dünya fiziksel verilerini KD düğüme iletmek için kullandığı paket türüdür. Şekil 4.9’da gösterildiği gibi 2-bitlik paket türü alanı, 10-bitlik kaynak düğüm ID alanı, 10-bitlik hedef düğüm ID alanı ve boyutu değişken olan iletilmek istenen veri alanı olmak üzere dört alandan oluşmaktadır. Paket türü alanında veri paketi olduğunu belirtmek için kullanılmaktadır. Kaynak ID bilgisi alanında veriyi gönderen düğüm kimliği, hedef ID alanında iletilmek istenen düğüm kimlik bilgisini tutmaktadır. Veri alanında iletilmek istenen veri bulunmaktadır.

Veri Paketi			
Paket Türü	Kaynak ID	Hedef ID	Veri
2 bit	10 bit	10 bit	Değişebilen Boyut

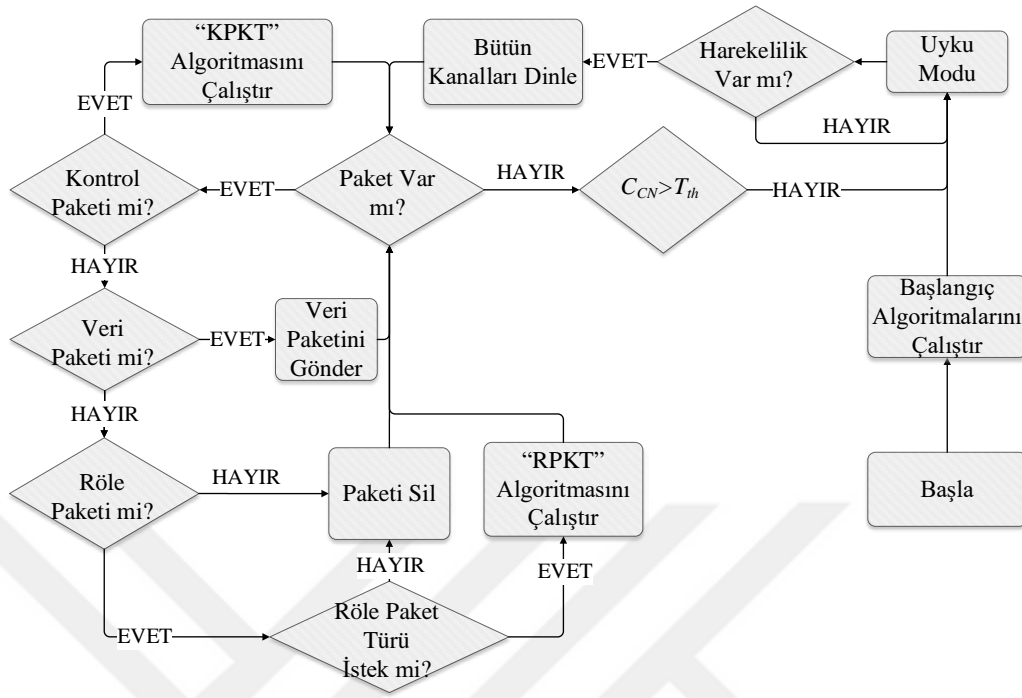
Şekil 4.9. Veri paketi yapısı

İletilmek istenen veri, farklı uygulamalarda ve AD’nin algıladığı bilgiye göre değişiklik gösterebilmekle beraber bu tez konusunun kapsamı dışındadır.

4.4. Düğüm Akış Şemaları ve Algoritmalar

Geliştirilen röle mekanizması hem AD tarafında hem de KD tarafında esnek algoritmalar ile desteklenmektedir. Mekanizmanın etkin bir şekilde sonuç verebilmesi için her iki taraftaki algoritmaların bir biri ile uyumlu çalışması çok önemlidir. Bu algoritmaların kolay ve anlaşılır olması için akış diyagramları ile desteklenmiştir. Ayrıca benzetim(simülasyon) aşamasında kodlamaya yardımcı olması için algoritmanın kaba kodları detaylı olarak yazılmıştır.

4.4.1. Koordinatör Düzüm Akış Şeması ve Algoritmaları



Şekil 4.10. KD düğüm Ana Akış Şeması

KD düğüm ilk çalışmaya başladığı zaman Şekil 4.10’da görüldüğü gibi başlangıç atamaları ve fonksiyonlarını çalıştırmaktadır. Daha sonra uyku durumuna(LPL-Low Power Listen) girmektedir. Uyku durumunda ortamda bir paket hareketliliği gözlemlenirse KD bütün kanallarını dinlemeye başlamaktadır. Bütün KD düğümler her kanalı dinleyecek şekilde ayarlanmıştır. Bu kanalları dinlerken KD paket bekleme sayacını(C_{CN}) tutmaktadır. Savaş paket bekleme süresi eşik değerini(T_{th}) aşınca KD kendini LPL duruma almaktadır. Eğer gelen bir paket varsa öncelik olarak paket türü tespit edilmektedir. KD’ler kontrol paketi, röle paketi ve veri paketi olmak üzere üç tür paketi dikkate almaktadır. Paket türü kontrol paket ise Kontrol Paketi ile Kanal Tahsis Algoritmasını(KPKT) çalıştırmaktadır. Bu algoritma ile KD düğümlere kontrol paketi ile kanal tahsisi yapmaktadır. Bu algoritma, AD’lerin doğrudan KD ye bağlanma durumlarında çalışmaktadır. Algoritma detaylı olarak Bölüm 4.4.1.1’de anlatılmıştır. Paket Röle Paketi ise KD Röle Paketi ile Kanal Tahsis Algoritmasını(RPKT) çalıştırmaktadır. Bu algoritma ile KD röle düğüm ile gelen ağa katılma isteklerini yönetmektedir. Bu ağa katılma şekli doğrudan ağa katılmayan KD kapsama alanı dışında olan AD’lerin diğer düğümler aracılığıyla ağa katılma şeklindedir. Röle istek paketlerini ağa katılmak isteyen düğüm adına o düğüme röle görevi yapabilecek ağa katılmış komşu düğümü üretmektedir. Bu düğüm kendine röle isteği geldiği zaman bu durumu bağlı olduğu KD’ye bildirmektedir. Düğümlerin kullandığı algoritma Bölüm

4.4.2’de detaylı olarak açıklanmaktadır. Veri paketi geldiği zaman KD paketi ya doğrudan ya da diğer KD’ler yolu ile sink(merkezi birim) iletmektedir. KD’nin algoritmasının kaba kodu aşağıda verilmiştir.

1-Başla

2- Başlangıç algoritmalarını çalıştır

3-Bütün kanalları dinle?

4-Paket var mı?

Evet: Kontrol Paketi mi?

Evet: Paketi detaylı incele KPKT algoritmasını çalıştır

3. adıma git

Hayır: Röle paketi mi?

Evet: Röle Paket türü röle isteği mi?

Evet: RPKT algoritmasını çalıştır & 3. adıma git

Hayır: Paketi sil 3. adıma git

Hayır: Veri Paketi mi?

Evet: Veri paketini gönder & 3. adıma git

Hayır: Paketi sil & 3. adıma git

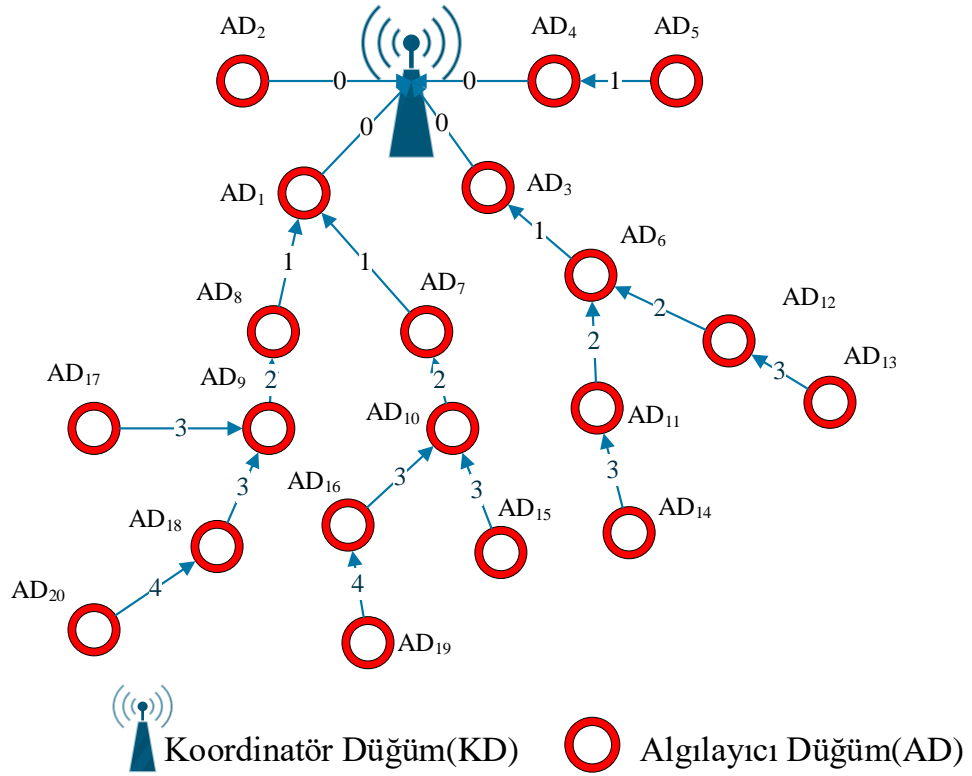
Hayır: Uyku Modu

5-Bitir.

4.4.1.1. Koordinatör Düğümün Kanal Tahsis Algoritmaları

KD düğümlerin radyosunun RX(alıcı) modülü tüm kanalları, kanalı dinleyecek şekilde statik olarak ayarlanmaktadır. Yine aynı şekilde KAK kanallarının 1-7 arasındaki zamanlama paketleri göndermek için kullanılan kanallardan birisi statik olarak KD’nin TX(gönderici) modülüne atanmaktadır. KD bu kanal yolu ile AD’lere zamanlama paketleri göndermektedir. Bütün AD’lere ilk olarak KAK(Kontrol Amaçlı Kanal) kanallarından 8. kanalı statik olarak kontrol haberleşmesi için radyonun TX modülüne atanır. AD’lerin RX modülüne KAK kanallarından 1-7 arası statik olarak atanmıştır. Bu kanallar KD’den gelecek zamanlama paketlerini almak için kullanılmaktadır. KAK kanallarının geri kalanı düğümler ağa bağlandıkça o düğümlerin kontrol kanallarına KD düğüm tarafından atanmaktadır. Ayrıca AD ağa bağlandığı zaman VAK kanallarından bir tanesi KD tarafından veri haberleşmesi için atanmaktadır. Kanal atamaları Bölüm 2’de anlatıldığı gibi Nordic NRF905 ve NRF9E5 baz alınarak yapılması, bu çalışmanın fiziksel olarak uygulanabilirliğini destekleyeceği düşünülmektedir.

Tüm dinamik kanal atamaları KD düğüm tarafından yapılmaktadır. KD'nin düğüm kanal atamalarında melez bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu çalışmada çift radyolu bir düğüm kullanılmıştır. Radyonun birisi kontrol haberleşmesi için kullanılırken diğeri veri haberleşmesi için kullanılmaktadır. Bir düğüm ağa katıldığı zaman o düğüme iki kanal atanmaktadır. Kontrol haberleşmesi için KAK kanallarından bir tanesi ve veri haberleşmesi için VAK kanallardan bir tanesi atanmaktadır. KD düğüm bütün kanal yönetimini KTT(Kanal Tahsis Tablosu) kullanarak yapmaktadır.



Şekil 4.11. 20 düğümlü örnek bir ağ dizilimi

KD düğümün kanal atamasının detaylı olarak anlaşılması için 20 düğümlü örnek bir ağ yapısı verilmiştir. Bu ağ yapısı için örnek bir KTT tablosu Çizelge 4.5’de gösterildiği gibidir. Bu tablodaki değerler Şekil 4.11’de senaryosuna göre oluşturulmuştur.

Çizelge 4.5. Şekil 4.11’deki senaryoya göre örnek bir kanal tahsis tablosu

Düğüm No(ID)	Kontrol Kanalı	Veri Kanalı	Seviyesi (atlama sayısı)	Vekil Düğüm	Ata Düğüm	Son Görülme
AD ₁	1	1	0	KD ₁	KD ₁	1.0
AD ₂	2	2	0	KD ₁	KD ₁	1.0
AD ₃	3	3	0	KD ₁	KD ₁	1.0
AD ₄	4	4	0	KD ₁	KD ₁	1.0
AD ₅	4	4	1	AD ₄	AD ₄	1.1
AD ₆	3	3	1	AD ₃	AD ₃	1.1
AD ₇	1	1	1	AD ₁	AD ₁	1.1
AD ₈	1	1	1	AD ₁	AD ₁	1.1
AD ₉	1	1	2	AD ₁	AD ₈	1.2
AD ₁₀	1	1	2	AD ₁	AD ₇	1.2
AD ₁₁	3	3	2	AD ₃	AD ₆	1.2
AD ₁₂	3	3	2	AD ₃	AD ₆	1.2
AD ₁₃	3	3	3	AD ₃	AD ₁₂	1.3
AD ₁₄	3	3	3	AD ₃	AD ₁₁	1.3
AD ₁₅	1	1	3	AD ₁	AD ₁₀	1.3
AD ₁₆	1	1	3	AD ₁	AD ₁₀	1.3
AD ₁₇	1	1	3	AD ₁	AD ₉	1.3
AD ₁₈	1	1	3	AD ₁	AD ₉	1.3
AD ₁₉	1	1	4	AD ₁	AD ₁₆	1.4
AD ₂₀	1	1	4	AD ₁	AD ₁₈	1.4

KTT’de düğümlerin düğüm ID’si düğümlerin ayırt edilmesi için kullanılmaktadır. Kontrol kanalı kısmında KAK kanallarından atanan kanal bilgisini tutmaktadır. Yine aynı şekilde veri kanalı kısmında düğüme atanan VAK kanal bilgisi tutulmaktadır. Seviye sütununda düğüm kaç atlama ile KD’ye ulaştığı bilgisi tutulmaktadır. Vekil düğümü sütununda düğümün hiyerarşik olarak KD’ye doğrudan bağlı röle düğümün bilgisi tutulmaktadır. Bu düğüme bağlı olan bütün düğümler bu ata düğümün kanallarını kullanmaktadır. Ata sütununda düğüm adına KD’ye röle isteği gönderen düğümün bilgisi tutulmaktadır. Son görülme sütununa düğümlerden gelen en son kontrol paketinin geliş zamanı kaydedilmektedir. Bu kısımdaki veriler düğümün ağdan kopması, aktif ya da pasif olup olmadığına KD tarafından karar verilirken kullanılmaktadır.

KD düğüm kanal atamalarını gelen paket türüne göre Kontrol Paketi ile Kanal Tahsis algoritması ve Röle Paketi ile Kanal Tahsis algoritması ile iki farklı şekilde yapmaktadır.

Kontrol Paketi ile Kanal Tahsis Algoritması(KPKT):Bu algoritma kontrol paketlerinin doğrudan KD düğüme geldiği durumda çalışmaktadır. Algoritmanın adımları aşağıdaki kaba kod ile ifade edilerek detaylandırılmıştır.

2- Kontrol Paketi gelene kadar bekle.

3-Paket Bilgilerini Al

4-Düğüm Tabloda Var mı?

Evet: Düğüm Bilgilerini Güncelle

6. Adıma Git

Hayır: Boş Kanal Var Mı?

Evet: Sıradaki boş kanalı Düğüme ata(FDMA)

Adım 5 git

Hayır: En Düşük Kullanıcılı Kanalı Düğüme Ata(TDMA)

Kanalın Kullanıcı Sayısını Artır.

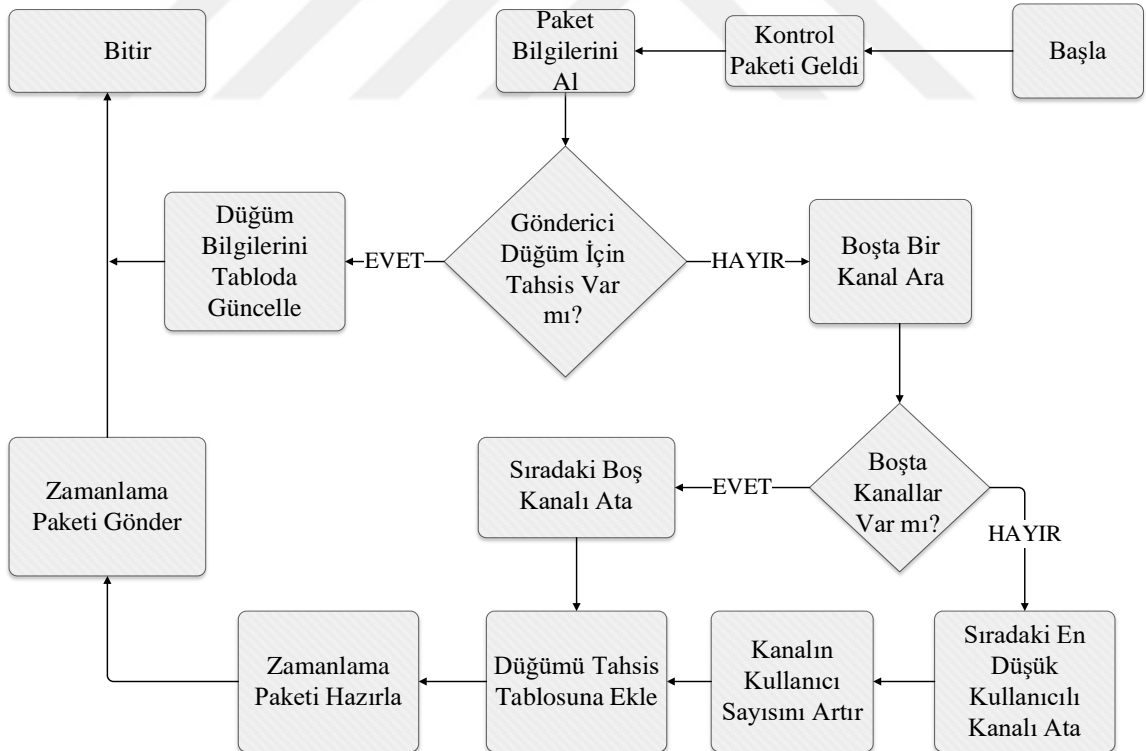
Adım 5 git

5- Düğümü Kanal Tahsis Tablosuna Ekle

6-Zamanlama paketi hazırla

7-Zamanlama paketini gönder

8-Bitir.



Şekil 4.12. KD'nin KPKT algoritmasının akış şeması

Şekil 4.12'de KD'nin KPKT algoritmasının akış şeması gösterilmektedir. Bu yaklaşım hem KAK kanalları için hem de VAK kanalları için kullanılmaktadır. Burada görüldüğü gibi kanal

tahsis ilk başladığında FDMA metodu çalışmaktadır. Daha sonra düğüm sayısı artıkça bütün kanallar tahsis edilirse kanallar zaman dilimine bölünmektedir. Zaman dilimleme metotları önceki konularda formüller ile detaylı olarak anlatılmıştır.

KD düğüme ağa katılma talepleri iki paket aracılığıyla iletilmektedir. Kontrol paketi ile iletilen istekler KD düğümün kapsama alanındaki düğümlerin ağa katılma istekleridir. KD KAK(9-48) ve VAK(1-40) kanallarını 40 düğüme kadar her düğüme farklı kanal tahsis etmektedir. Daha fazla istek geldiği zaman en uygun ilk kanaldan itibaren ikinci ve daha fazla kez kanallar tahsis edilir. Zamanlama paketleri ile kanalın kullanıcı sayısını ve düğümlerin kanal kullanım sırasını bildirir. Zamanlama paketini alan düğümler kendini bu kanallara göre ayarlarlar. AD'ler bu kanalları kullanırken zamanlama paketleri ile gelen kullanıcı sayısı ve kullanım sırasını dikkate alarak zaman dilimi hesaplaması yapmaktadır. Düğümler çok kullanıcılı bu kanalları TDMA metodu ile kullanmaya başlamaktadır.

Röle Paketi ile Kanal Tahsis Algoritması(RPKT): KD düğümün kapsama alanı dışındaki düğümler, ağa doğrudan bağlanamamaktadır. Bu AD'lerin yaydığı kontrol paketleri ancak komşu düğümlerine ulaşabilmektedir. Bu durumda düğümler ağa doğrudan katılma periyodu süresince ağa katılmazlarsa kontrol paketlerindeki "0" olarak varsayılan röle istek bitini "1" olarak set etmektedir. Bu konu Bölüm 4.4.2'de detaylı anlatılacaktır. Bu kontrol paketlerini alan komşu düğümler KD düğüme röle istek paketi ile düğüm adına ağa katılma talebinde bulunmaktadır. KD'ye bu şekilde röle istek paketi geldiğinde kanal ataması için RPKT algoritması çalışmaktadır. Algoritmanın kaba kodu aşağıda verilmiştir.

1-Başla

2- Röle İstek Paketi geldi.

3-Paket Bilgilerini Al?

4-Ata Düğüm Tabloda Var mı?

Evet: Ata Düğümün Kanallarını İlgili Düğüme Tahsis Et(TDMA)
Kanalların Kullanıcı Sayısını "1" Artır.

Hayır: Geçersiz Talep?

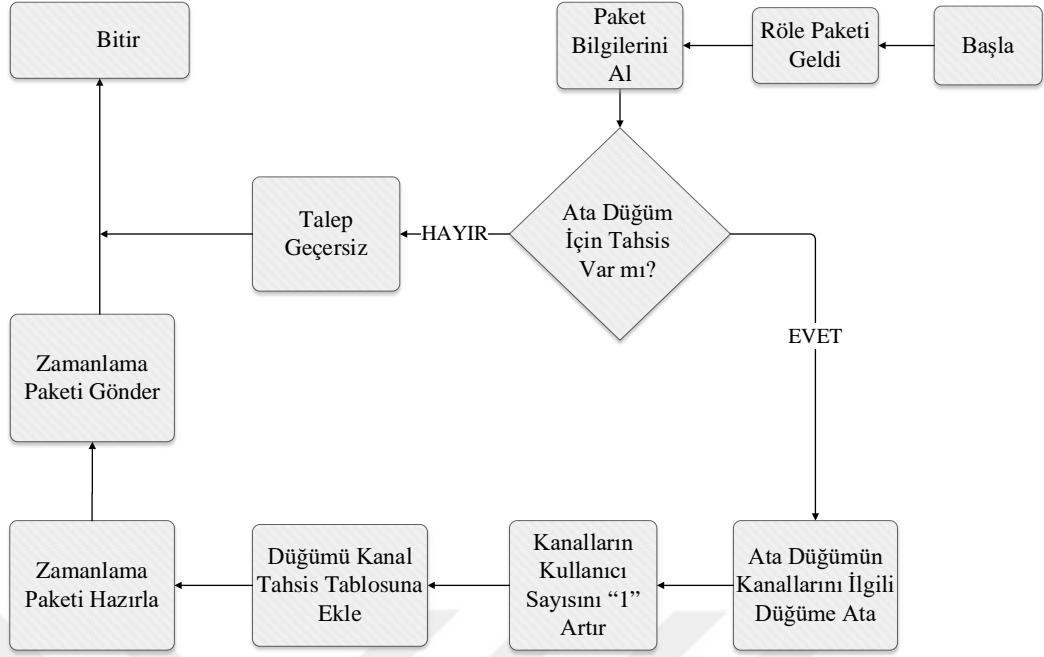
Adım 6 git

5- Düğümü Kanal Tahsis Tablosuna Ekle

6-Zamanlama paketi hazırla

7-Zamanlama paketini gönder

8-Bitir.



Şekil 4.13. Röle Paketi ile Kanal Tahsis Algoritması

KD düğüme bir röle istek paketi ulaştığında KD düğüm RPKT algoritmasını çalıştırmaktadır. Algoritmanın akış şeması Şekil 4.13'te gösterilmiştir. İlk olarak KD röle paketini doğrudan ileten düğüm(ata) için KTT tablosunda tahsis olup olmadığına bakmaktadır. Eğer tahsis yoksa talep dikkate alınmamaktadır. Eğer röle paketini KD'ye ileten ata düğüm KTT tablosunda ise KD düğüm röle talebine sahip düğüme röle paketini ileten düğümün kanallarını atamaktadır. Kanalların kullanıcı sayısı artırılıp zamanlama paketi ile ata düğüme bildirilir. Zamanlama paketleri ilk olarak hiyerarşide ata düğüme iletilir. Her ata düğüm kendine bağlı düğümlere zamanlama paketini iletmektedir. Zamanlama paketini alan düğüm kendi zaman dilimini hesaplayarak veri iletim aşamasına geçmektedir. Röle paketi ile kanal atamalarında sadece TDMA metodu çalışmaktadır. Her alt düğüm kendi ata düğümünün kanallarını kendi zaman dilimlerinde kullanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen röle mekanizmasının en önemli kısmı AD'lerin ağa katılım mekanizmalarıdır. AD'ler KD düğümüne doğrudan ulaşamadığı zaman diğer düğümler üzerinden çok atlamalı bir yapı ile iletişim yapmak zorundadır. Böyle bir durumda AD'ler görev mekanizmasının hem kendi verisini iletme işlevine hem de komşu düğümlere röle olma işlevine sahip olması gerekmektedir. Önceki konularda bahsedilen çok atlamalı yapılarıdaki olumsuz ağ karakteristiklerinin en aza indirilmesi, geliştirilen bu mekanizmanın en temel amaçlarıdır. Bu bağlamda AD'lerin algoritması bu amaçlar gözetilerek tasarlanmıştır.

Geliştirilen AD düğüm algoritmasının akış şeması Şekil 4.14'te gösterilmiştir. AD'ler ilk uyandığı zaman ortamda paket hareketliliği kontrolü yapar. Eğer hareketlik yoksa uyku modunda devam eder. Eğer bir hareketlilik var ise KAK kanallarından 7. kanalı çekişmeli olarak dinlemeye başlamaktadır. Bu aşamada düğüm bekleme süresi için sayaç(C_{sch}) başlatır. Sayaç eşik değere(T_{th}) ulaşmaya kadar kanal meşguliyeti devam ederse düğüm kendini uyku moduna alır. Kanal meşgul değil ise ağa katılmak için kontrol paketi(P_{ctrl}) hazırlayıp göndermektedir. Daha sonra AD, bu bekleme süresi için de sayaç(C_{sch}) başlatıp kendisine statik olarak RX modülüne atanan KAK₁₋₇ kanallarını, zamanlama paketleri(P_{sch}) almak için dinlemeye başlamaktadır. Bu ilk ağa katılma doğrudan KD'ye bağlanma isteğidir. Eğer bu P_{ctrl} bir KD'ye ulaşırsa KD bu düğümü doğrudan ağa katıp o düğümüne gerekli kanal atamalarını bildirmek için P_{sch} göndermektedir.

Eğer AD, C_{sch} eşik zaman(T_{th}) değerine ulaşana kadar herhangi bir P_{sch} paketi almazsa AD kapsama alanında aktif bir KD olmadığına karar vermektedir. Daha sonra AD röle olarak bağlanmak için varsayılan olarak "0" olan P_{ctrl} röle istek bitini "1" olarak set etmektedir. AD düğüm artık röle olarak ağa bağlanmak için tekrar çekişme tabanlı kanaldan P_{ctr} paketlerini göndermeye başlamaktadır. Eğer ağa katılmak isteyen AD'nin kapsama alanında ağa katılmış bir AD var ise bu röle istek biti set edilmiş P_{ctrl} 'yi aldığı zaman röle için müsaitse ilgili AD'ye röle paketinin kabul türü($P_{rly-ack}$) ile düğümüne röle olabileceğini bildirmektedir. Bu $P_{rly-ack}$ paketi düğümüne ulaştığı zaman düğüm artık röle olarak ağa katılabileceğini kabul eder ve tekrar bu durumu bildirmek için $P_{rly-ack}$ paketi hazırlayıp gönderir. Röle olacak düğüm, $P_{rly-ack}$ paketini aldığı zaman KD düğümüne $P_{rly-req}$ hazırlayıp gönderir. Eğer röle olacak düğüm doğrudan KD'ye bağlı ise bu paket KD'ye doğrudan iletilir. Düğüm de röle olarak bağlı ise paket kendi ata düğümüne iletilir. Bu şekilde her düğüm kendi atasına gönderilerek $P_{rly-req}$ paketin çok atlamalı bir şekilde KD düğümüne ulaşması sağlanmaktadır. $P_{rly-req}$ paketi KD'ye ulaştığı zaman KD, RPKT algoritmasını çalıştırmaktadır. RPKT algoritması Bölüm 4.4.1'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. KD düğüm P_{sch} zamanlama paketi hazırlayıp düğümüne gerekli kanal tahsislerini bildirmektedir. Düğüm ağa katıldıktan sonra herhangi bir P_{sch} zamanlama paketinde kendine tahsis bulamazsa düğüm, bütün ayarlarını silip yeniden ağa katılmaya çalışmaktadır. Düğüm röle düğüm ise alt düğümlere $P_{rly-rls}$

gönderir. Bu paketi alan alt düğümler ayarları sıfırlayarak kullandığı kanalları bırakır. Algoritmanın daha anlaşılır olması için aşağıda kaba kod verilmiştir.

1-Başla

2-Uyku durumuna geç

3-Hareketlik var mı?

Evet: 4. Adıma git

Hayır: 2. Adıma git

4- KAK 7. Kanalı dinle

5-Kanal meşgul mü?

Evet: $C_{sch}+=1$ ve $C_{sch} > T_{th}$ mi?

Evet:2. Adıma git

Hayır:4. Adıma git

Hayır: Kontrol paketi hazırla gönder ve 6. Adıma git

6-KAK₁₋₇ arası kanalları dinle

7-Paket Var mı?

Evet: P_{sch} paketi mi?

Bana kanal tahsis edilmiş mi?

Evet: Kanalları ayarla ve 8. Adıma git

Hayır: $P_{rly-ack}$ paketimi?

Evet: Ağa röle olarak katılmayı kabul et ve $P_{rly-ack}$ gönder ve 3.Adıma git

Hayır: Paketi sil ve 3. adıma git

Hayır: $C_{sch}+=1$ ve $C_{sch} > T_{th}$ mi?

Evet: Kontrol Paketi b röle $istek=1$ ayarla ve 2. Adıma git

Hayır: 5. Adıma git

8- Ağa bağlı mıyım?

Evet: Kontrol Paket periyodu gelmiş mi?

Evet: $P_{ctrl} // P_{rly}$ gönder 8. adıma git

Hayır: Veri paket periyodu gelmiş mi?

Evet: : P_{data} hazırla gönder 6. adıma git

Hayır: KAK₁₋₇ Kanallarını dinle ve paketleri al ve 9.adıma git

Hayır: Ayarları sil 2. adıma git

9-Paket var mı?

Evet: P_{sch} mi?

Bana tahsis var mı?

Evet: Ayarları güncelle & $C_{sch} = 0$ & 8. Adıma git

Hayır: P_{data} mi?

Evet: Paketi veri kuyruğuna ekle & 8. Adıma git

Hayır: P_{rly} mi?

Evet: $P_{rly-req}$ mi?

Evet: Paketi ilgili kuyruğa ekle

Hayır: $P_{rly-ack}$ mi?

Evet: $P_{rly-req}$ hazırla

Hayır: $P_{rly-rls}$ mi?

Evet: Ben röle düğüm müyüm?

Ayarları sil

Evet: $P_{rly-rls}$ gönder & 2. Adıma git

Hayır: 2. adıma git

Hayır: Paket sil & 8. adıma git

Hayır: P_{ctrl} & b röle istek=1 mi?

Evet: $P_{rly-ack}$ hazırla & 8. adıma git

Hayır: Paket sil & 8. adıma git

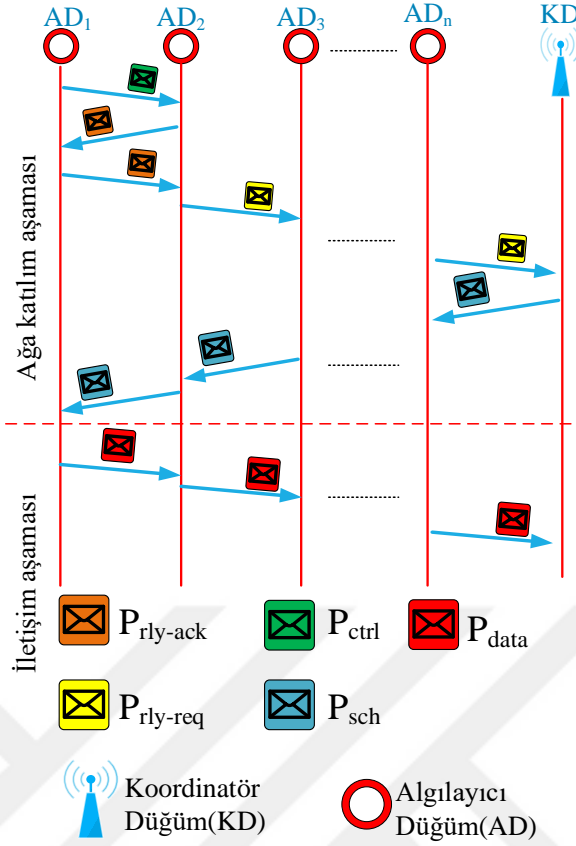
Hayır: $C_{sch} + 1$ & $C_{sch} > T_{th}$ mi?

Evet: Ayarları sil 2. adıma git

Hayır: 8. Adıma git

10-Bitir

4.4.3. Üç Yollu El Sıkışma



Şekil 4.15. Uç düğümün röle olarak ağa katılmasının üç yollu el sıkışmalı paket senaryosu

Her hangi uç düğümün röle olarak üç yollu el sıkışmalı ağa katılmasının paket senaryosu Şekil 4.15'te verilmiştir. Düğüm ilk uyandığı zaman kontrol paketleri gönderir. Eğer belirli bir süre doğrudan KD'ye bağlanamazsa, düğüm röle istek durumunu aktif etmektedir. Bu şekilde tekrar kontrol paketi göndermeye devam eder. Bu kontrol paketlerini alan komşu düğümler o düğüme röle kabul ($P_{rly-ack}$) paketi gönderir. Düğüm bu paketleri gönderen en az atlama mesafesine sahip düğümü röle düğüm kabul ettiğini tekrar röle kabul paketi göndererek bildirir. Bu röle kabul paketini alan düğüm ağa katılmak isteyen düğüm adına KD'ye röle istek ($P_{rly-ack}$) paketi göndererek röle talebinde bulunur. KD düğümü ağa kattığını belirtmek için zamanlama paketi (P_{sch}) gönderir. Bu paketi alan düğüm ağa katılır ve veri paketlerini göndermeye başlar. Çok atlamalı bir yapıda her düğüm bir ata düğüme bağlıdır. Her düğüm iletmesi gereken paketleri kendi atası ya da çocuk düğüme iletmekle görevlendirilmiştir. Bu şekilde AD'lerin uç yollu röle mekanizması sağlanmış olmaktadır.

4.4.4. Öncelik Temelli Röle Kabul Mekanizması

Birden çok ağa bağlanmış komşu düğüme sahip olan uç düğümler ağa birden çok yol ile bağlanabilir. Bu yolların atlama sayıları farklı olabilir. Düğümün en kısa yoldan ağa bağlanması

için Gecikmede en iyi verimin alınması için, en az atlama sayısına sahip olan komşu düğüme bağlanması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında bir düğüm röle olarak ağa bağlanmak istediği zaman komşu düğümlere röle isteği göndermektedir. Bu isteği alan uygun olan komşu düğümlerin hepsi o düğüme $P_{rly-ack}$ paketi göndermektedir. AD bu paketlerdeki atlama bilgisine bakarak en kısa atlamaya sahip olan AD'yi röle düğüm kabul eder ve sadece o AD'ye $P_{rly-ack}$ gönderir. Bu paketi alan AD o düğümü röle tablosuna ekler ve onun adına KD'den ağa katılma talebinde bulunmaktadır. Bu şekilde en kısa yoldan KD'ye bağlanma sağlanmış olmaktadır.



5. RÖLE MEKANİZMASININ BENZETİMİNİN YAPILMASI

Tasarlanmak istenen bir KAA projesinin gerçek uygulamalarının yapılarak üstünlüklerinin test edilmesi zaman ve maliyet kaybına sebep olmaktadır. Ayrıca bazen KAA projesinin arazi şartları (volkanik araziler, savaş alanları vb. sebeplerden dolayı) uygulama yapmaya müsait olmaz. Bundan dolayı bu tür projelerin ve çalışmaların ilk olarak benzetiminin yapılması gerekli eksiklerin benzetimi ile giderilmesi daha uygun olmaktadır.

5.1. Benzetim Ortamının Genel Yapısı

Riverbed(Opnet) [118] Modeler, bütün ağ projelerinin benzetiminin yapılabileceği bir ağ benzetim yazılımıdır. Oluşturulan ağ projelerin davranışının izlenmesi, performans analizleri, üstünlüklerinin test edilmesi gibi birçok işlemi yapabilme imkânı sunmaktadır. Riverbed Modeler ticari bir yazılımıdır. Model davranışını tasarlarken C dilini temel alan yazılıma özel ProtoC dili kullanmaktadır.

Riverbed Modeler, pekiştirilen bir ağ modelinin hem davranışını hem de performansını analiz etmek için ayrık olay temelli benzetimler yapmanıza imkân sağlamaktadır. Gelişmiş bir grafik ara yüzü sağlamaktadır. Model oluşturmada hiyerarşik bir yapı kullanmaktadır. Ağ modeli oluşturma, düğüm modeli oluşturma, süreç modeli oluşturma olmak üzere üç temel model oluşturma katmanı vardır. Kendi modelinizi oluşturacağınız gibi, hazır modeller ile çalışma yapabilme imkânı da sunmaktadır. Örnek olarak kolay bir şekilde bir Zigbee ağı oluşturabilirsiniz [119].

Riverbed Modeler'de kendi modelinizi tasarlayabilmeniz için editörler mevcuttur. Model tanımlama, üzerinde çalışılabilecek bir sistemin ya da uygulamanın en önemli aşamasıdır. Riverbed Modeler çoğu modeli model kütüphanelerinde barındırmaktadır. Bundan dolayı önceden geliştirilmiş bu hazır modellerden bir ağ oluşturma çok basit olmaktadır. Bütün modeller Riverbed Modeler tarafından sağlanan ve ilk oluşturulan bloklara ve temel kavramlara dayandırılmaktadır.

Riverbed Modeler Proje Editör'deki ağ elamanları, Düğüm Editör'de özelleştirilmiş elemanlara dayanır. Düğüm Editör'deki nesnelere davranış ve işlevini Süreç Editör'de tanımlanır. Geri kalan editörler de çeşitli veri modelleri tanımlamak için kullanılmaktadır.

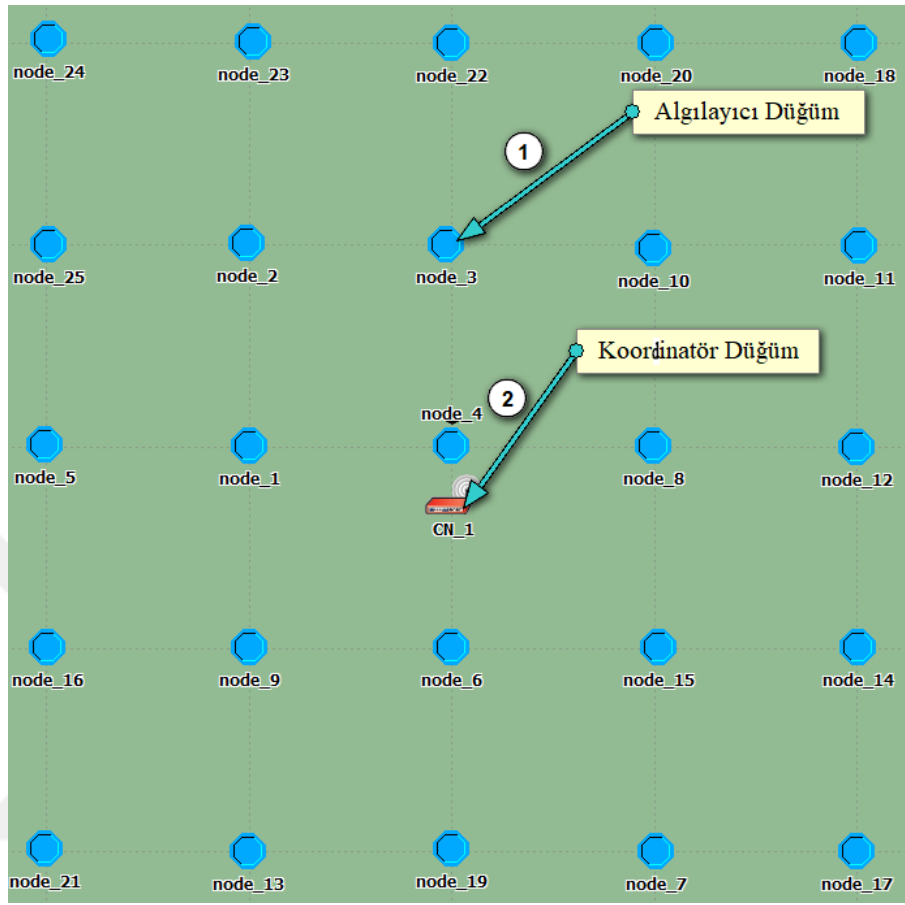
- **Proje Editör:** Ağ modellerinin geliştirildiği editördür. Ağ modelleri düğüm model ve alt ağlardan oluşur. Bu editör aynı zamanda temel benzetim ve analiz etme yeteneklerini de içerir.

- **Düğüm Editör:** Düğüm modellerinin geliştirildiği editördür. Düğüm modeli ağ modelde bir nesnedir. Düğüm modeller süreç modellerini içermektedir.
- **Süreç Editör:** Süreç modellerin geliştirildiği editördür. Süreç modelleri modülün davranışını kontrol edebilir ve parametre modüllerine referans olabilir.
- **Harici Sistem Editörü:** Harici sistem tanımlamaları geliştirilir. Harici sistem tanımlamaları, ortak benzetimler için gereklidir.
- **Bağlantı Model editörü:** Bağlantı modellerinin oluşturulduğu, geliştirildiği ve düzenlendiği yerdir.
- **Paket Format Editörü:** Paket format modelleri geliştirilir. Paket formatları pakette hangi bilgiler olacağı ve yapısının ne olduğunu belirtir.
- **ICI Editör:** Ara yüz kontrol bilgilerinin oluşturulduğu, düzenlendiği ve gösterildiği yerdir. ICI süreçler arasında kontrol bilgisinin iletilmesi için kullanılır.
- **PDF Editör:** Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF, Probability Density Function) göstermek, düzenlemek ve oluşturmak için kullanılır. Belirli olayları kontrol etmek için kullanılır. Örneğin kaynak modülde paket üretim sıklığı gibi.

Riverbed Modeller ağ benzetimleri için kapsamlı bir ortam sunmaktadır. Çok küçük ağlardan çok büyük ağlara kadar destek sağlamaktadır [120].

5.2. Yeni Mekanizmanın Benzetim Ortamında Oluşturulması

5.2.1. Proje Modeli



Şekil 5.1. 25-düğümlü senaryonun ızgara dizilimindeki proje model editörde yapılması

OPNET Proje Editör'ünün proje modelinde kendi tasarladığımız düğüm modellerimiz, sürükle bırak yöntemi ile proje alanına eklenmiştir. Tasarlanan bu röle mekanizmasının amacına uygun olarak proje alanında farklı topolojilerde ve düğüm sayılarında senaryolar oluşturulmuştur. Bu şekilde tasarlanan yeni röle mekanizmasının farklı topoloji ve farklı sayıda düğümlere göre gösterdiği performans analizlerini yapma imkânı vermiştir.

Şekil 5.1'te gösterildiği gibi proje ortamına 1 adet KD(CN, Coordinator Node) düğüm ve 25 adet AD eklenmiştir. Eklenen bu ağ elemanları diğer editörlerde tasarlanmak istenen yeni mekanizmanın amacına uygun olarak tasarlanmıştır. Diğer senaryolarda istenilen sayıda düğümler proje ortamına eklenmiştir.

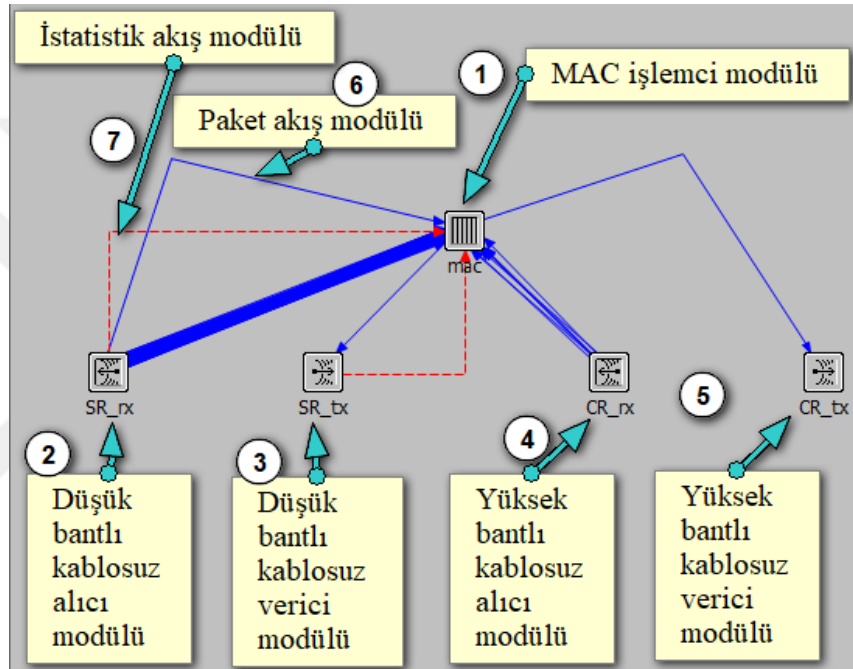
5.2.2. Düğüm Modeli

Düğüm Editör'de yapılmak istenen proje türüne göre kablolu veya kablosuz olarak düğüm modelleri oluşturulabilmektedir. Düğüm modelde KD ve AD düğüm modelleri kablosuz iletişim

yapacak şekilde tasarlanmıştır. Düğüm Editör’de düğüm modelleri tasarlarırken önceki konularda bahsedilen Nordic NRF905 ve NRF9E5 temel alınmıştır. Nordic çift radyolu yapıyı desteklemektedir. Bu çalışmada çift radyo oluşturulmuştur. Aynı zamanda çok kanallı bir yapı oluşturulmuştur.

5.2.2.1. Koordinatör Düğüm Modeli

Bu tez çalışmasında Riverbed Modeler ortamında tasarlanan KD düğüm modeli Şekil 5.2’de gösterildiği gibidir.

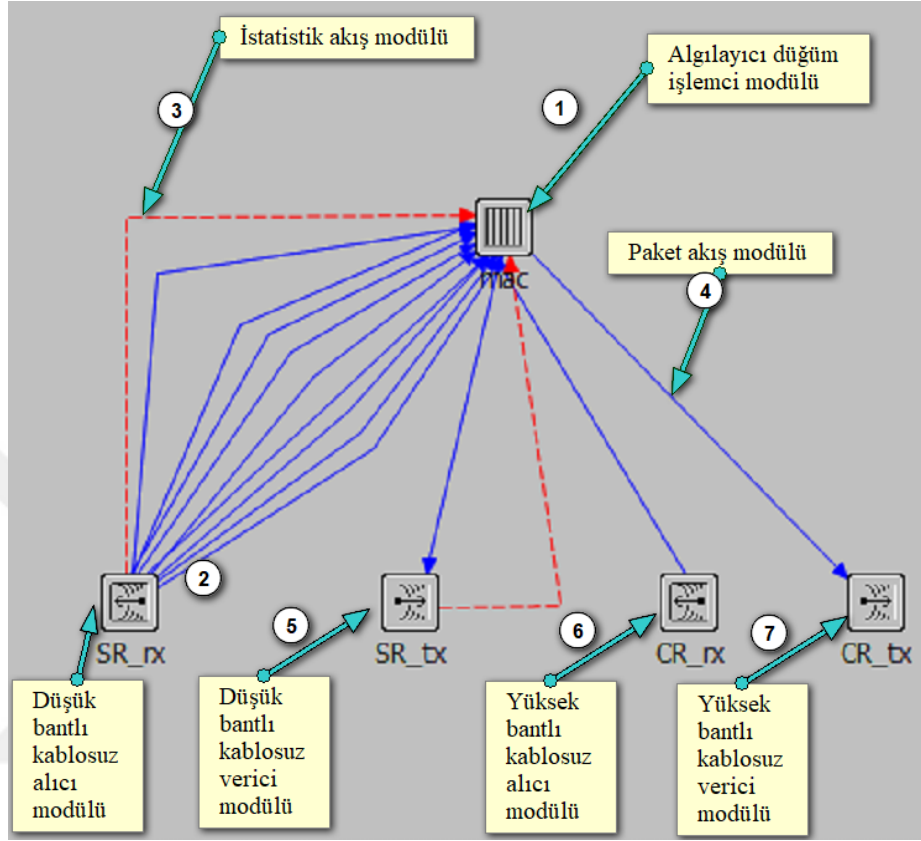


Şekil 5.2. Düğüm Editör’de KD düğümünün modelinin yapılıması

Düğüm Editör’de Şekil 5.2’de görüldüğü gibi KD düğüm oluşturulurken ilk olarak düğüm davranışını kontrol eden ve *mac* adı verilen bir işlemci modülü eklenmiştir. Bu modül çevre birimlerinin kontrolünü ve yönetimini yapmaktadır. Bu işlemcinin çalıştıracığı komutlar Süreç editörde kodlanmıştır. Daha sonra kablosuz haberleşmeyi desteklemesi için SR_rx adı verilen bir alıcı modülü ve SR_tx adı verilen bir verici modülü eklenmiştir. Bu radyolara düşük bant genişlikli KAK kanalları ayarlanmaktadır. Diğer radyo bileşenleri olan CR_rx alıcısı ve CR_tx vericisi eklemiştir. Bu radyolar KD’lerin kendi aralarında veri alış-verişi için kullanılmaktadır. Bu radyolara YVAK kanalları ayarlanmaktadır. Bölüm 4’te anlatılan yeni mekanizmanın amacına uygun olarak KD düğüm için 218 (40-KAK, 48-VAK, 130-YVAK) kanalı dinleyecek şekilde SR_rx modülü ayarlanmaktadır.

5.2.2.2. Algılayıcı Döğüm Modeli

Bu tez çalışmasında Riverbed Modeler ortamında tasarlanan AD modeli Şekil 5.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.3. Döğüm Editör'de AD'nin modelinin yapılması

Yeni tasarlanan röle mekanizmasına göre döğümler iki radyoya sahiptir. Bir radyo normal veri alış verişi için kullanılırken, diğer radyo yüksek veri iletim ihtiyaçları durumunda devreye girmektedir. İlk olarak döğümün nasıl çalışacağını ve diğer döğüm elemanlarını içerisine yazılan komutlarla kontrol eden ve *mac* adı verilen bir işlemci eklenmiştir. Bu işlemcinin çalıştıracağı komutlar Süreç Editör'de kodlanmıştır. Daha sonra kablosuz haberleşmeyi desteklemesi için SR_rx adı verilen bir alıcı modülü ve SR_tx adı verilen bir verici modülü eklenmiştir. Daha diğer radyo bileşenleri olan CR_rx alıcısı ve CR_tx vericisi eklemiştir. AD'nin alıcı (SR_tx) kanallarına KAK kanallarından 1-7 arası kanallar ayarlanmıştır.

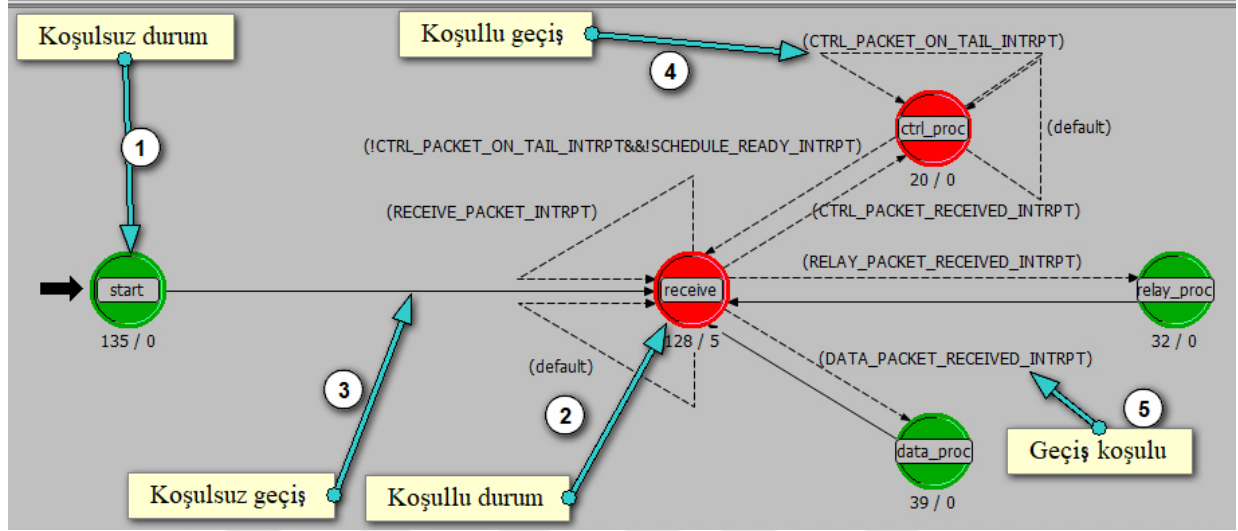
5.2.3. Süreç Modeli

Döğümlerin süreç modelleri Süreç Editör'de modellenmektedir. Süreç editörde içerisine ProtoC ile komutlar yazılan durumlar (state) ve durumlar arası geçişi sağlayan şartlı veya şartsız geçişler

ile tasarlanmak istenen algoritmanın sonlu durum makineleri tasarlanmaktadır. Durumlar hem girişine hem de çıkışına komut yazılmasına imkân sağlamaktadır.

Bizim çalışmamızda görevleri farklı olduğundan dolayı KD ve AD süreç modeli olmak üzere iki farklı süreç modeli tasarlanmıştır.

5.2.3.1. Koordinatör Düğüm Süreç Modeli



Şekil 5.4. Süreç Editör'de KD düğümünün süreç modelinin yapılması

KD süreç modeli Şekil 5.4'te görüldüğü üzere *start*, *receive*, *ctrl_proc*, *relay_proc* ve *data_proc* olmak üzere 5 durumdan oluşmaktadır. KD çalıştığı zaman ilk olarak *start* durumunu işlemektedir. *Start* durumunda KD başlangıç ayarları yapmakta ve *start* fonksiyonlarını çalıştırmaktadır. *Start* durumundan sonra düğüm herhangi bir şart ya da kesme beklemeden *receive* durumuna geçmektedir.

Receive durumunda radyolara gelen paket varsa bu paketlerin türü belirlenmektedir. *RECEIVE_PACKET_INTRPT* kesmesi her paket geldiğinde çalışmaktadır. Bu kesme çalıştığında *receive* durumu kendi üzerinde dönmektedir. Paketler alınıp paket türü belirlendikten sonra *receive* durumunda diğer durumlara paket türüne göre geçiş yapılmaktadır.

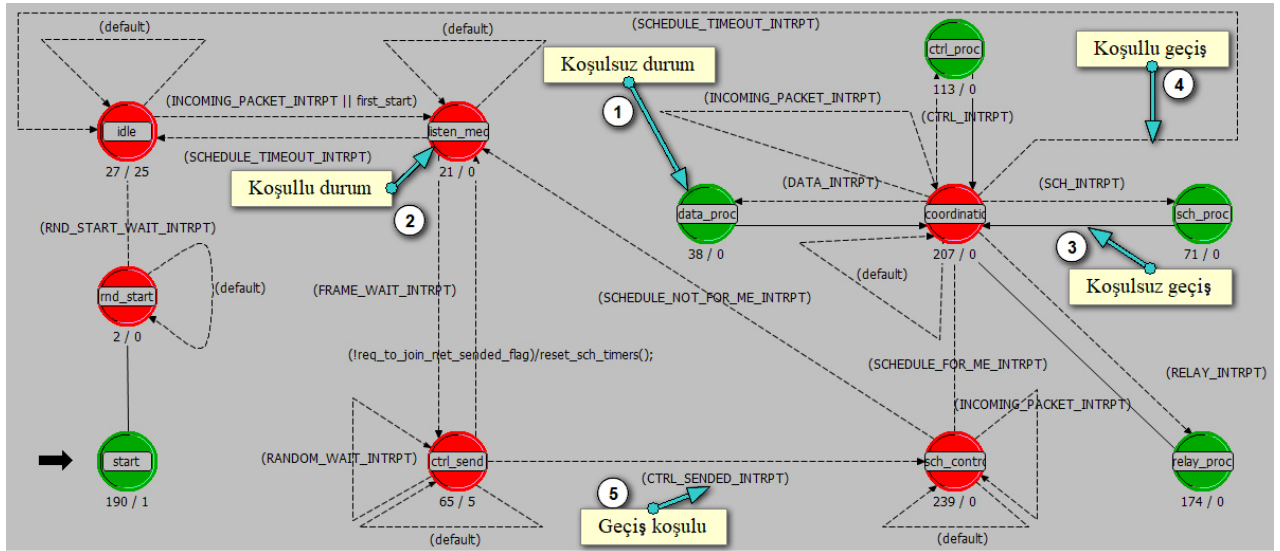
Paket türü kontrol paketi ise *CTRL_PACKET_RECEIVED_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme geldiği zaman süreç *ctrl_proc* durumuna geçmektedir. Burada paket bilgileri alınıp Bölüm 4'te anlatılan KPKT fonksiyonunu çalıştırmaktadır. KPKT fonksiyonu kontrol paketleri ile ağa katılma işlevini görmektedir. Ayrıca kanal tahsis ve zamanlama paketleri gönderme işlevlerini yapmaktadır.

Receive durumunda çalışırken paket türü röle paket ise *RELAY_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme ile *relay_proc* durumuna geçiş yapılmaktadır. *Relay_proc* durumunda

röle paketleri işlenmektedir. KD düğüm röle paketlerinden sadece istek türünü dikkate almaktadır. Diğer röle paketlerini dikkate almamaktadır. Diğer röle paket türleri düğümler arası röle talebi ve üç yöllü el sıkışmada kullanılmaktadır. Eğer röle paket türü istek ise Bölüm 4.4.1.1'de anlatılan RPKT fonksiyonu çalışmaktadır. Bu fonksiyon röle talebinde bulunan düğümü ağa katıp gerekli kanal tahsislerini yapmaktadır. Ayrıca zamanlama paketi gönderilmektedir.

5.2.3.2. Algılayıcı Düğüm Süreç Modeli

Şekil 5.5'te düğümlere ait süreç modelin Süreç Editör'de oluşturulmuş biçimi gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Süreç Editör'de AD düğümünün süreç modelinin yapılmışı

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi AD düğüm süreç modeli *start* durumu ile başlamaktadır. *start* durumunda gerekli başlangıç atamaları ve fonksiyonları çalıştırılmaktadır. *Start* durumundan herhangi bir şarta bakmaksızın *rnd_start* durumuna geçmektedir. *rnd_start* durumu ile çekişmeli kanalın meşguliyet durumunu azaltıp ilk ağa katılımlarda çarpışma olasılıklarını en aşağı çekmek hedeflenmiştir. *rnd_start* durumunda düğüm rasgele bir süre bekleyip RND_START_WAIT_INTRPT kesmesini çalıştırmaktadır. Bu kesme ile düğüm *idle* durumuna geçmektedir. *idle* durumunda düğüm ortam dinlemesi yapmaktadır. Ortamda paket hareketliliği var ise *INCOMING_PACKET_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme çalıştığı zaman düğüm *listen_med* durumuna geçmektedir. *listen_med* durumunda düğüm TX modülüne set edilen KAK kanallarının çekişmeli olan 8. Kanalını kontrol etmektedir. Eğer belirli bir sürede kanal müsait olmazsa *SCHEDULE_TIMEOUT_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme ile tekrardan *listen_med* durumuna dönmektedir. Eğer kanal meşgul değilse düğüm rasgele bir süre beklemekte ve *FRAME_WAIT_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme çalıştığı zaman düğüm ilk kontrol

paketi göndereceği *ctrl_proc* durumuna geçiş yapmaktadır. Düğüm burada tekrardan KAK kanallarının çekişmeli olan 8. kanalını kontrol etmekte, müsait ise bu kanaldan kontrol paketini göndermektedir. Düğüm başarılı bir şekilde kontrol paketini gönderdiği zaman *CTRL_SENDED_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme ile düğüm *sch_control* durumuna geçmektedir. Bu işlemi yaparken bir zaman sayacı başlatmaktadır. Sayaç eşik zaman değerine ulaşıncaya kadar düğüm ilk olarak bir zamanlama paketini beklemektedir.

Düğüm iki farklı şekilde ağa katılmaktadır. İlk durumda düğüm doğrudan KD düğümüne bağlanma isteği yapmaktadır. Bunun için ilk gönderilen kontrol paketlerindeki röle istek biti “0” yani pasiftir. Bu paketi komşu düğümler aldığı zaman dikkate almamaktadır. Eğer eşik zaman değerine ulaşıncaya kadar bir zamanlama paketi gelir ve düğümüne bir tahsis var ise düğüm ağa katılır. Daha sonra *SCHEDULE_FOR_ME_INTRPT* kesmesi çalışmakta ve düğüm kendini *coordinator* durumuna getirmektedir.

İkinci durumda düğüm eşik zaman değeri süresince bir zamanlama paketi almazsa artık kapsama alanında aktif bir KD olmadığına karar verip röle olarak bağlanmak için kontrol paketindeki röle istek bitini “1” yapmaktadır. Bu şekilde bir kontrol paketi yayınlanırsa bu paketi komşu düğümler dikkate almaktadır. Zamanlama sayacının eşik zaman değerine ulaşana kadar bir zamanlama paketi gelemezse *SCHEDULE_NOT_FOR_ME_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Düğüm tekrardan kontrol paketi göndermek için kendini *listen_med* durumuna getirmektedir. Tekrardan çekişmeli kanal müsait olduğunda röle istek biti “1” olarak ayarlanmış kontrol paketlerini yaymaya başlamaktadır. Sürecin bu aşamasında üç yollu el sıkışmalı bir davranış sergilenmektedir. Ağa katılmış olan bu komşu düğümler gelen bu kontrol paketlerine karşılık röle kabul paketleri iletmektedir. Röle isteğine sahip olan düğüm bu paketleri alıp KD’ye en kısa atlama sayısı mesafesine sahip olan düğümü röle olarak kabul edip o düğümüne röle kabul paketi göndermektedir. Röle aday düğüm, bu röle paketini alıp kendi bağlı olduğu KD’ye röle isteğinde bulunmaktadır. KD düğümü kabul edip gerekli ayarlamaları yaptıktan sonra zamanlama paket göndermektedir. Zamanlama paketi geldiği zaman röle aday düğüm röle olarak ağa bağlanmak isteyen düğümüne bu zamanlama paketini iletmektedir. Düğüm paketi alıp gerekli kanal atamalarını yaptıktan sonra ağa katılmaktadır. Sonra *SCHEDULE_FOR_ME_INTRPT* kesmesi çalışmakta ve düğüm *coordinator* durumuna geçmektedir. Bu şekilde düğüm röle olarak ağa bağlanmaktadır.

Coordinator durumunda artık düğüm ağa doğrudan veya röle olarak bağlanmıştır. Bu durumda artık veri paketlerini ve kontrol paketlerini kendi zaman diliminde KD düğümüne doğrudan veya röle olarak iletmektedir. Zaman dilimi hesapları Bölüm 4’te detaylı olarak anlatılmaktadır.

Coordinator durumunda gelen paketler kontrol edilmekte ve paket iletim periyotları kontrol edilmektedir. Burada düğüm ilk olarak ağda olup olmadığını kontrol etmektedir. Düğüm

ağda ise ve kontrol paket periyodu gelmiş ise kontrol paketi veya röle paketi göndermek için *CTRL_INRPT* kesmesi çalıştırmaktadır. Bu kesme ile düğüm *ctrl_proc* durumuna geçmektedir. Bu aşamada düğüm kendi hazırladığı kontrol ve röle paketlerinin yanı sıra çocuk(röle olduğu) düğümlerinden gelen kontrol ve röle paketlerini de kendi ebeveynine(ata düğüm) göndermektedir. Ayrıca röle isteklerine cevap türünde röle paketlerini de bu *ctrl_proc* durumunda kendi kontrol paket periyodunda göndermektedir. Paket kalmayınca düğüm tekrar *coordinator* durumuna geçmektedir.

Düğüm ağda ve veri paketi periyodu gelmiş ise düğüm veri göndermek için *DATA_INRPT* kesmesini çalıştırmaktadır. Bu kesme ile düğüm *data_proc* durumuna geçmektedir. Bu durumda düğüm kendi verilerini ve röle olduğu düğümlerin verilerini kendi ata düğüme iletmektedir. Her düğüm kendi ata düğüme paketlerini aktararak KD düğüme ulaşması sağlanmaktadır. Düğüm veri paketleri bitince tekrardan *coordinator* durumuna geçmektedir.

Düğümler ağa katıldığı zaman zamanlama, kontrol ve röle paketlerini kontrol etmektedir. Düğüme bir zamanlama paketi geldiği zaman *SCH_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme ile düğüm *sch_proc* durumuna geçmektedir. Bu durumda zamanlama paketi detaylı olarak incelenmektedir. Düğüm zamanlama paketlerini KD düğümden gelen bilgiler ile kendini güncellemektedir. Kullandığı kanalların kullanıcı sayısı güncellenir ise düğüm zaman dilimi boyutu azalacağında bu bilgileri gelen zamanlama paketleri yolu ile öğrenmektedir. Eğer zamanlama paketlerinde kendi ayrılan düğüm tahsisleri KD tarafından iptal edilirse düğüm *SCHEDULE_TIMEOUT_INTRPT* kesmesi çalışmakta düğüm bütün kanal ayarlarını sıfırlamaktadır.

SCHEDULE_TIMEOUT_INTRPT kesmesi çalıştığı zaman düğüm *idle* durumuna geçmekte ve yeniden ağa katılma teşebbüsüne başlamaktadır. Ayarlarını başlangıç durumuna getiren düğüm eğer bir röle düğüm ise, bütün çocuk düğümlerine röle bırakma paketi göndermektedir. Bu şekilde diğer düğümlere bilgi vermektedir. Ağdan kopan çocuk düğümler başka ata düğüm aramaya başlamaktadır. Zamanlama paketi işlemi bittiği zaman düğüm tekrardan *coordinator* durumuna geçmektedir.

Düğüm bir kontrol paketi aldığı zaman ilk olarak paketin röle istek biti kontrol edilmektedir. Röle istek biti "0" ve gönderici düğüm çocuk düğümlerden biri ise kontrol paketi kendi ata düğüme kontrol paket zaman diliminde göndermek üzere kuyruğa eklenmektedir. Eğer röle istek biti "1" ve gönderici düğüm çocuk düğümlerden birisi değil ise bunun bir röle isteği olduğuna karar verilmektedir. Kontrol paketine röle bilgi paketi ile cevap verilmektedir. Diğer kontrol paketleri dikkate alınmamaktadır.

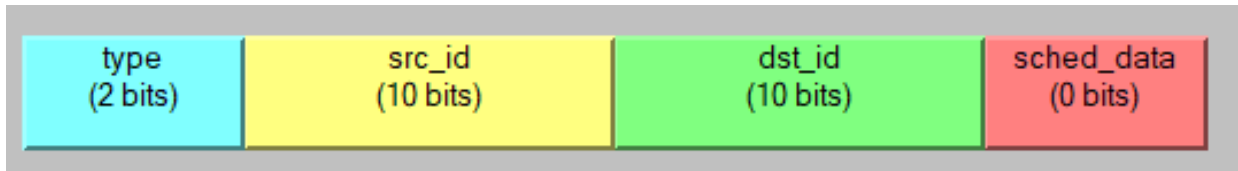
Düğüme röle paketi geldiği zaman *RELAY_INTRPT* kesmesi ile düğüm *relay_proc* durumuna geçmektedir. Bu durumda röle paketlerinin türü kontrol edilmektedir. Röle türü röle bilgi paketi ise gönderici düğüm için KD'den kanal tahsis talebi üzere ata düğüme röle istek paketi gönderilmektedir. Her düğüm bu paketi kendi ata düğümüne ileterek paketin KD'ye ulaşması sağlanmaktadır. Yani düğüme bir diğer röle paket türü olan röle istek paketi geldiği zaman düğüm bu paketi kendi ata düğümüne iletmektedir. Röle türü röle bırakma ise düğüm bütün kanalları bırakmaktadır. *SCHEDULE_TIMEOUT_INTRPT* kesmesi çalışmaktadır. Bu kesme ile düğüm kendini *idle* durumuna getirmektedir. Düğüm tekrar ağa bağlanmak için girişimlerde bulunmaya devam etmektedir.

5.2.4. Paket Yapıları

Paketler düğümler arası haberleşme ve veri alışverişini sağlamaktadır. Bu çalışmada Bölüm 4.3'te anlatıldığı üzere zamanlama, kontrol, röle ve veri paketleri olmak üzere 4 tür paket yapısı vardır. Paketlerin amaca yönelik olarak alanları, boyutları paket türüne göre değişmektedir. Riverbed Modeller'de paket türleri Paket Editör'de tasarlanmaktadır.

5.2.4.1. Zamanlama Paket Yapısının Oluşturulması

Zamanlama paketleri KD düğüm tarafında üretilmektedir. Zamanlama paketleri KD düğümün AD düğümlere kanal tahsislerini bildirmek için kullandığı paketlerdir. Zamanlama paketlerinde düğümlere tahsis edilen kanal bilgileri, eğer düğüm ağa röle olarak bağlı ise ata(röle) düğüm ve çocuk düğüm bilgileri bulunmaktadır. Zamanlama paketi ilk olarak KD'ye doğrudan bağlı olan düğümlere iletilmektedir. Bu düğümler röle düğüm ise rölesi olduğu düğümlere zamanlama paketlerini iletmektedir. Böylece zamanlama paketleri röle düğümler vasıtasıyla uç düğümlere iletilmektedir.



Şekil 5.6. Paket Editör'de zamanlama paket modelinin yapılıması

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi zamanlama paketlerinde 2-*type*, 10-*src_id*, 10-*dst_id* ve değişken boyutta *ched_data* olmak üzere 4 alan bulunmaktadır. Type alanında paketin hangi paket türü olduğu bilgisi tutulmaktadır. "00" bilgisi bu paketin zamanlama paketi olduğu anlamına gelmektedir. *src_id* alanında gönderici düğüm bilgisi tutulmaktadır. *dst_id* alanında paketin

gönderileceği hedef düğüm kimliği saklanmaktadır. KD düğüm normal olarak zamanlama paketlerini belirli bir periyotta bütün düğümlere göndermektedir. Ancak bir düğümü ilk ağa kattığı zaman ve ağdan düşürdüğü zaman sadece o düğüme özel zamanlama paketleri oluşturmaktadır. Her ağa katılan düğüm için anında zamanlama paketi gönderilmektedir.

sched_data alanında düğümlere tahsis edilen kanal bilgileri, seviye ve ebeveyn düğüm bilgisi bulunmaktadır. *sched_data* KD'nin KTT tablosundaki bilgileri bulunduğundan ağa katılan AD arttıkça bu bölümün boyutu da artmaktadır. Periyodik olarak gönderilen zamanlama paketlerinde bütün ağa katılmış düğümlerin bilgileri bulunmaktadır. Düğüme özel gönderilen zamanlama paketlerindeki *sched_data* alanında sadece o düğümün bilgileri bulunmaktadır.

5.2.4.2. Kontrol Paket Yapısının Oluşturulması

Düğümlerin ağa katılma istekleri, kalp atışı, ilk röle arayışı gibi görevleri bu paketler aracılığıyla yapmaktadır. Düğümler ilk uyandığı zamana KD, düğüm aramak için etrafa kontrol paketi yayarlar(broadcast). Kontrol paketi doğrudan KD düğüme ulaşırsa KD, düğümü ağa katmaktadır. Eğer belirli bir zaman diliminde düğüm kontrol paketi gönderip ağa katılamazsa düğüm kontrol paketindeki röle istek bitini "1" yapıp tekrardan kontrol paketi göndermeye başlar. Röle istek biti "1" olan paketleri komşu düğümler dikkate almaktadır.

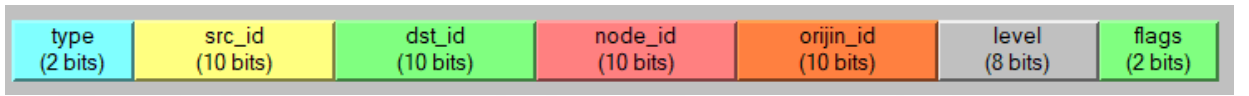


Şekil 5.7. Paket Editör'de kontrol paket modelinin yapılması

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi kontrol paketleri 2-bit *type*, 10-bit *src_id*, 10-bit *dst_id* ve 8-bit *ctrl* bilgi alanı olmak üzere 4 alandan oluşmaktadır. *type* alanında paket türü bilgisi tutulmaktadır. Bu alanda "01" bilgisi kontrol paketi olduğunu göstermektedir. *src_id* alanında gönderici düğüm bilgisi tutulmaktadır. *dst_id* alanında paketin gönderileceği hedef düğüm ID'si saklanmaktadır. Ctrl alanında 1. bit gönderen düğümün aktif ya da pasif olduğu bilgisini tutmaktadır. 2. bit doğrudan KD bağlı olup olmadığını, 3. bit herhangi bir komşu AD olup olmadığını, 4. bit yüksek boyutlarda veri transferi isteği olup olmadığını, 5. bit röle isteği olup olmadığını, 6. bit tahsis edilen kanalları bırakma bilgisini ve 7. bit ağı bırakma ya da devam bilgisini tutmaktadır. 8. bit rezerve edilmiştir. Düğüm ağa bağlanma durumuna göre bu bitleri ayarlamaktadır. Düğüm ağa katıldıktan sonra periyodik olarak kontrol paketi göndermeye devam etmektedir.

5.2.4.3. Rôle Paket Yapısının Oluşturulması

Rôle paketi düğümler, düğüm rôle olarak ağa bağlanması durumunda kullanılan pakettir. Düğüm doğrudan ağa bağlanamadığı durumda kontrol paketlerinin rôle istek bitini “1” yaptıktan sonra gönderdikleri paketleri komşu ağa katılmış düğümler aldığı zaman o düğüme rôle olabileceği bilgisini rôle paketi ile göndermektedir. Düğümler arasında rôle işlevi üç yollu el sıkışma ile gerçekleşmektedir. Bu işlev rôle paketleri ile yapılmaktadır. Düğümler rôle olarak bağlandığı kanalları bırakması gerektiği durumda rôle paketleri ile rôle düğüme bildirmektedir. Rôle düğümler ağa katılmak isteyen düğümler için KD’den rôle paketleri talebinde bulunmaktadır.



Şekil 5.8. Paket Editör’de rôle paket modelinin yapılıması

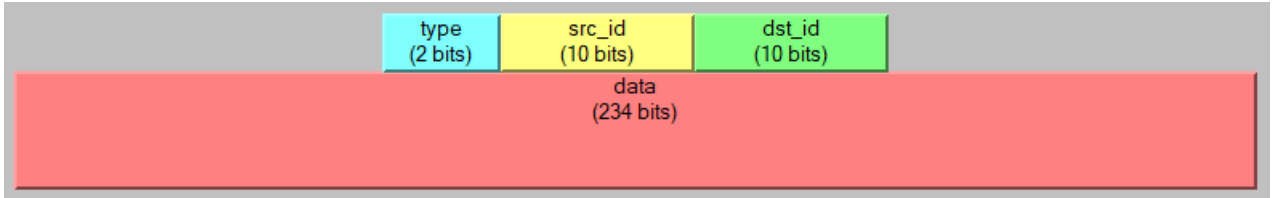
Şekil 5.8’de gösterildiği gibi rôle paketleri 2-bit *type*, 10-bit *src_id*, 10-bit *dst_id*, 10-bit *node_id*, 10-bit *orijin_id*, 8-bit *level*, 2-bit *flags* alanı olmak üzere toplam yedi alandan oluşmaktadır.

type alanında paket türü bilgisi saklanmaktadır. “10” bit bilgisi rôle paketi olduğunu ifade etmektedir. *src_id* kısmında gönderici düğüm kimliği bulunmaktadır. *dst_id* kısmında alıcı düğüm kimliği bulunmaktadır. *node_id* kısmında rôle talebinde bulunan düğüm kimlik bilgisi saklanmaktadır. *orijin_id* kısmında düğüme rôle düğüm olacak düğümün kimliği eklenmektedir. *level* alanında rôle olacak düğümün KD’ye kaç atlama ile ulaştığı bilgisi bulunmaktadır. Ağa katılmak isteyen düğüm paketteki seviye bilgisine bir ekleyerek KD’ye kaç atlama ile ulaşacağını hesaplar. Bu şekilde en kısa atlama ile KD’ye bağlanmaktadır.

flags kısmında rôle paketin hangi işlevi yapacağı bilgisi saklanmaktadır. Rôle paketlerinin 4 farklı işlevi vardır. Bu işlevler *flags* alanında iki bit ile belirlenmektedir. *flags* bilgisi “00” ise düğüm rôle kanallarını bırakıyor demektir. *flags* bilgisi “01” ise gönderen düğüm rôle düğüm olmayı kabul ediyor demektir. Aynı zamanda alan düğüm bu kabule aynı paket yapısı ile cevap vermektedir. Eğer rôle düğüm isteğini kabul etmezse pakete *flags* “10” bilgisini eklemektedir. *flags* “11” bilgisinin eklenildiği rôle paket türünde ise artık rôle olacak düğüm KD düğüme ağa katılmak isteyen düğüm adına rôle isteği göndermektedir.

5.2.4.4. Veri Paket Yapısının Oluşturulması

Veri paketleri algılayıcı düğümlerin dış dünyadan elde ettikleri fiziksel verileri işleyip kablosuz ortamda iletilebilecek şekilde dijital verilere dönüştürülmüş halidir. Düğüm algıladığı verileri bu formatta KD'ye iletmektedir.



Şekil 5.9. Paket Editör’de veri paket modelinin yapılması

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi veri paketleri 2-bit *type*, 10-bit *src_id*, 10-bit *dst_id* ve 8-bit *data* bilgi alanı olmak üzere 4 alandan oluşmaktadır. *type* alanında paket türü bilgisi tutulmaktadır. Bu alanda “11” bilgisi veri paketi olduğunu göstermektedir. *src_id* alanında gönderici düğüm bilgisi tutulmaktadır. *dst_id* alanında paketin gönderileceği hedef düğüm ID’si saklanmaktadır. *Data* alanında iletilmek isten veri bulunmaktadır. Veriler genellikle analog olarak elde dış dünya olaylarının dijital sinyale dönüştürülmüş halidir. Bu veriler düğümler üzerinden KD’ye iletilmektedir. Bundan sonraki veri iletim süreçleri bu tez çalışması kapsamı dışındadır.

6. BAŞARIM ÖLÇÜTLERİ

Bu tez çalışmasının başarıml ölçütleri değerlendirilirken, ağa katılım hızı, ağa katılan düğüm sayısı, maksimum uçtan uca gecikme, çarpışma sayısı ve enerji olmak üzere 5 temel ağ parametresi dikkate alınarak yeni röle mekanizmasının başıml analizleri yapılacaktır.

6.1. Ağa Katılım Hızı

Düğümmlerin ağa katılım hızları ağın çabuk organize olması açısından önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen röle mekanizmasının düğümmlerin ağa hızlı bağlamasında ki performansı benzetim ortamında test edilmiştir. Farklı düğüm sayıları ve topolojilerde mekanizmanın, senaryolardaki tüm düğümmlerin ağa katılım hızı süresindeki performansı irdelenmiştir.

6.2. Ağa Katılan Düğüm Sayısı

Ağ ortamında ki bütün düğümmlerin ağa katılması ağ performansı açısından önemlidir. Bu bakımdan geliştirilen röle mekanizmasının bütün düğümmlerin ağa katılım performansında göstereceği iyi sonuçlar ağdan toplanacak veri bütünlüğü açısından önemlidir. Ayrıca bir düğüm ağdan koptuğu zaman hemen ağa tekrardan bağlanması ağ güvenilirliği açısından önemlidir. Geliştirilen yeni röle mekanizmasının farklı topolojilerde ve farklı düğüm sayılarında AD'lerin ağa katılım gösterme performansları değerlendirilmiştir.

6.3. Maksimum Uçtan Uca Gecikme

Uçtan uca gecikme çok atlamalı KAA'larda ağ performansı önemli ölçüde etkileyen faktörler arasındadır. Ağdaki AD sayısı artkça atlama sayısı ve uçtan uca gecikme de artmaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen röle mekanizmasının düğüm sayısının artışına ve topoloji farklılıklarına göre göstereceği performans, benzetim ortamında test edilerek sonuçlar tartışılmıştır.

6.4. Çarpışma Sayısı

Çok atlamalı KAA'larda KD'ye yakın olan düğümmlerin veri trafiği diğer düğümmlere göre daha fazladır. Bu durumda çarpışma ve tıkanıklık ihtimalini artırmaktadır. Ayrıca ortak kullanılan kanallarda eş zamanlı erişimden kaynaklı çarpışma problemleri doğmaktadır. Veri kayıplarını azaltmak ve güvenilir veriler toplamak için çarpışma sayısını en aza indirmek bir protokolün öncelikli hedefleri arasında olması gerektiği düşünülmektedir. Bu bağlamda bu tez çalışmasında çekişme tabanlı kanallardaki çarpışma sayıları analiz edilecektir.

6.5. Enerji Tasarrufu

KAA tasarımında en başta gelen zorluklarından birisi enerji sorunudur. Bunun en temel sebebi AD'lerin sınırlı kaynaklara sahip olmasıdır. Özellikler fiziksel koşulların elverişsiz olduğu KAA uygulamalarında batarya değişimi gibi kaynak takviyesinin zor ya da imkânsız olduğundan enerjiyi verimli kullanma kaçınılmaz olmaktadır. Enerji tasarrufu konusu KAA protokol mimarisinde her katmanda çalışılan bir konudur. OEK katmanı protokollerinin enerji tasarrufu konusunda çok iyi performans göstermesi ağ ömrü açısından önemli bir yere sahiptir.

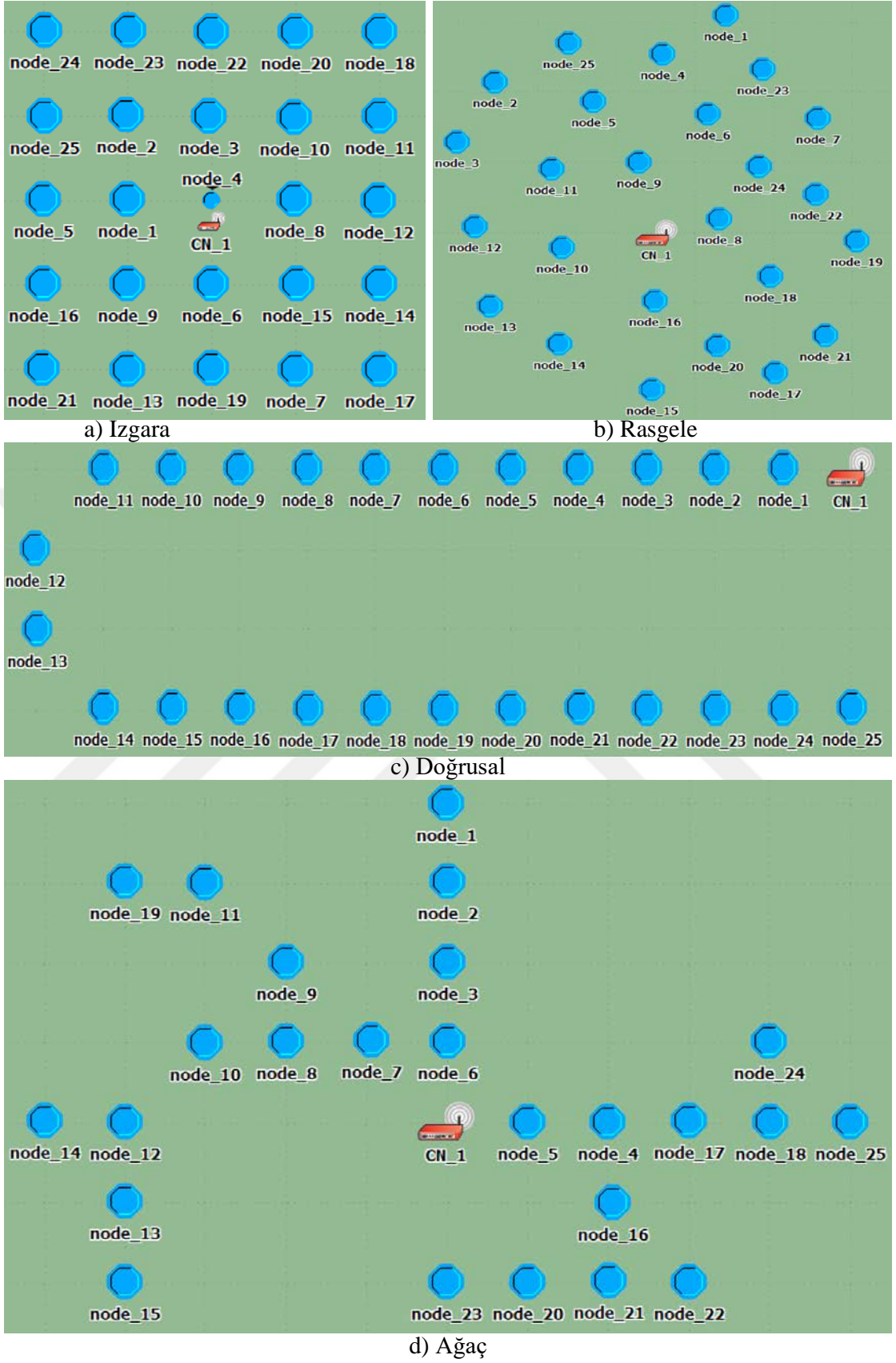
Enerji tasarrufu konusu bu tez çalışması kapsamında olmamakla birlikte düğümlerin paket alış-verişi ve uyku durumlarında enerji harcama değerlerinin ölçülmesi gerekli olduğu görülmüştür. Geliştirilen röle mekanizmasının enerji tüketim konusunda ne düzeyde başarı göstereceğini farklı topolojilerde senaryolar oluşturarak irdelenecektir.

7. BENZETİM ANALİZLERİ

Riverbed Modeller ortamında yeni mekanizmanın benzetim sonuçları farklı senaryolar ile düğümlerin sayısına bağlı olarak ağa katılma durumları, uçtan uca paket gecikmesi, iletilen paket sayıları vb. durumlara göre irdelenmiştir. Her senaryoda farklı benzetim parametreleri değerleri kullanılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında amaçlanan çoklu topoloji desteği için ızgara, ağaç, doğrusal, rasgele gibi ağ ortamında farklı düğüm dizilimlerinde senaryolar yapılmıştır. Böylelikle düğümlerin farklı dizilim ve sayısına bağlı olarak ağa bağlanma ve ağdaki sürekliliği ile ilgili durumları izleme olanağı sağlanmış olmaktadır. Bu senaryolardan elde edilen sonuçlar analiz edilerek açıklanmıştır. Farklı senaryoların özellikleri Çizelge 7.1’te gösterilmektedir.

Çizelge 7.1. Düğüm sayılarına göre farklı dizilimlere sahip senaryoları özellikleri

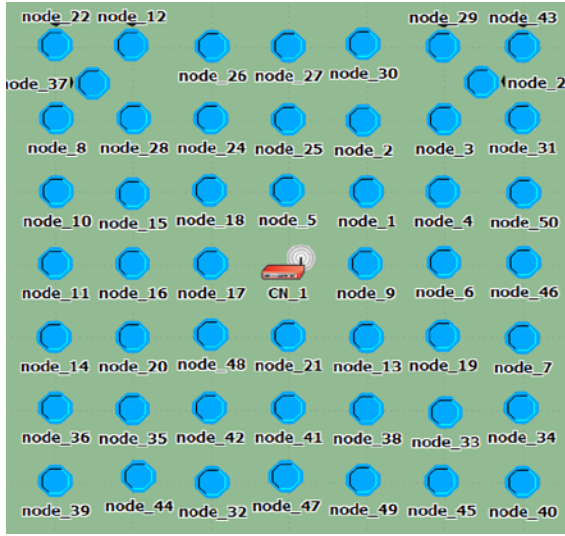
Senaryo	Düğümler Arası Mesafe	Düğümlerin Kapsama Alanı	Koordinatör Düğüm Sayısı	Ağ Alanı	Benzetim Süresi	
25 Düğüm	Izgara	100m	145m	1	500x500m ²	300sn
	Rastgele	Değişken	145m	1	600x600m ²	300sn
	Doğrusal	100m	145m	1	2500m	300sn
	Ağaç	100m	145m	1	500x1000m ²	300sn
50 Düğüm	Izgara	100m	145m	1	700x700m ²	300sn
	Rastgele	Değişken	145m	1	700x1000m ²	300sn
	Doğrusal	100m	145m	1	5000m	300sn
	Ağaç	100m	145m	1	1200x2000m ²	300sn
100 Düğüm	Izgara	100m	145m	1	1000x1000m ²	300sn
	Rastgele	Değişken	145m	1	900x1200m ²	300sn
	Doğrusal	100m	145m	1	10000m	300sn
	Ağaç	100m	145m	1	1600x2200m ²	300sn
200 Düğüm	Izgara	100m	145m	1	1700x1700m ²	300sn
	Rastgele	Değişken	145m	1	1100x1300m ²	300sn
	Doğrusal	100m	145m	1	20000m	300sn
	Ağaç	100m	145m	1	2400mx2800m ²	300sn



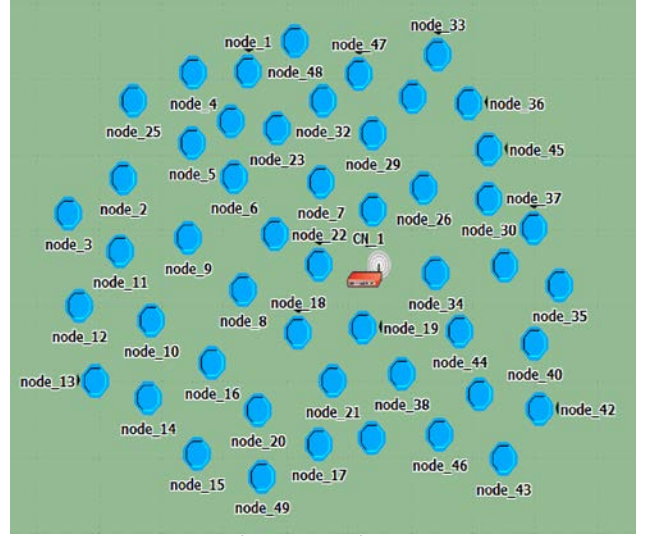
Şekil 7.1. 25-düğümden oluşan ağın farklı topolojideki düğüm dizilimleri

Şekil 7.1’de görüldüğü gibi 25-düğümde oluşan bir ağın a) ızgara b) rastgele c) doğrusal d) ağaç topoloji olmak üzere 4 farklı dizimdeki senaryo yapıları oluşturulmuştur. Rastgele topoloji hariç diğer topolojilerde düğümler arası mesafe 100m olarak belirlenmiştir. Düğümlerin kapsama alanı 145m olarak ayarlanmıştır. Böylelikle düğümlerin birden çok röle düğüme sahip olma olanağı sağlanmış olmaktadır. Doğrusal topolojide tek atlamalı bir iletişim modeli tercih edilmiştir. Düğümler ancak bir atlama mesafesindeki komşu düğümleri ile iletişim kurmaktadır. Bütün senaryolarda benzetim süresi 300 saniye olarak belirlenmiştir.

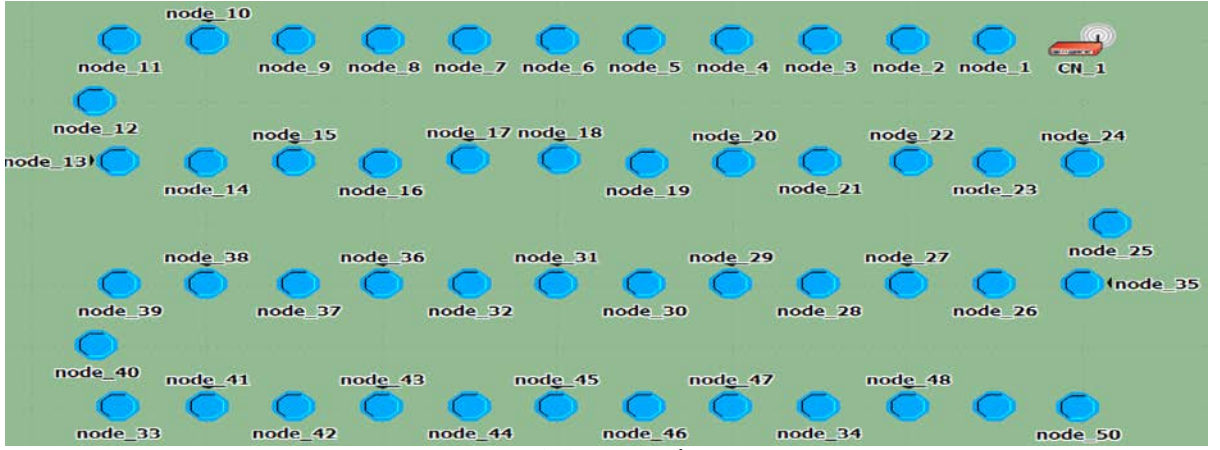




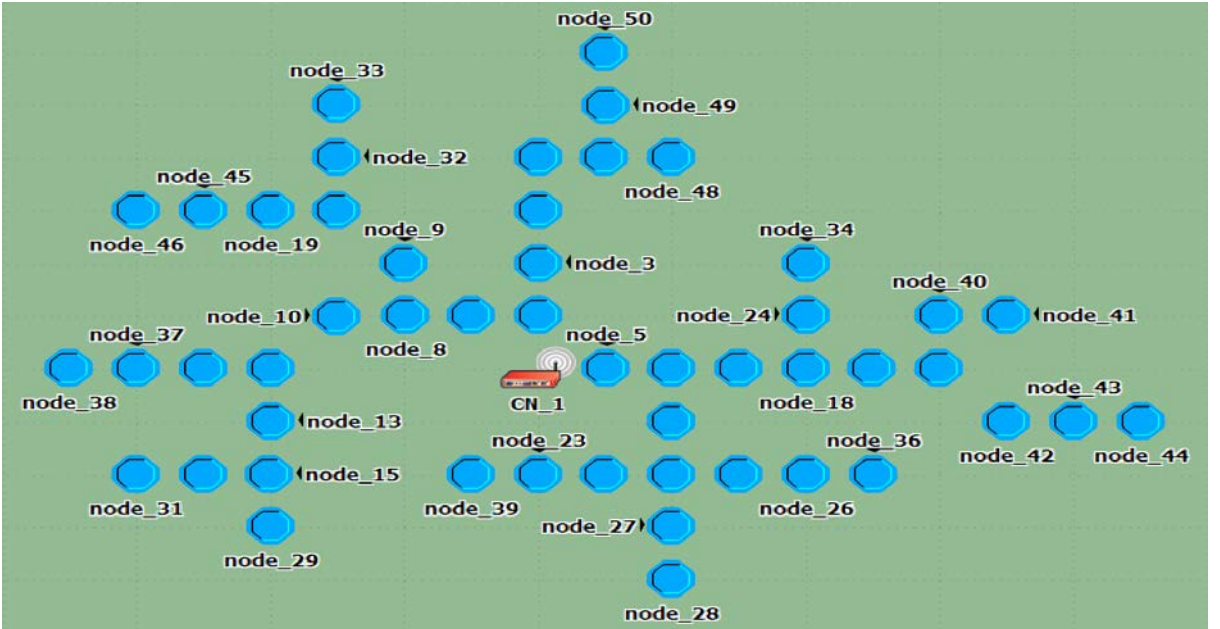
a) Izgara



b) Rasgele



c) Doğrusal



d) Ağaç

Şekil 7.2. 50- düğümden oluşan ağın farklı topolojideki düğüm dizilimleri

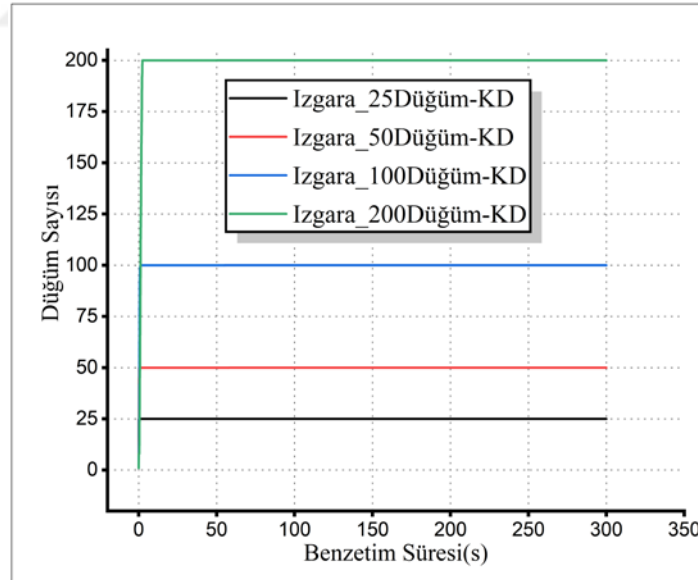
Şekil 7.2’de görüldüğü gibi 50-düğümünden oluşan bir ağın a) ızgara b) rastgele c) doğrusal d) ağaç topoloji olmak üzere dört farklı dizimdeki senaryo yapıları oluşturulmuştur. Bu şekilde önerilen yeni röle mekanizmasının 50 düğüm sayısında farklı topolojilere göre göstereceği performansı analiz etme imkânı oluşmuştur.

100 ve 200 düğümlü ağ senaryoları için 25 ve 50 düğümü senaryoları oluştururken izlenen metotlar tercih edilmiştir. Örnek olması açısından 25 ve 50 düğümlü ağın tüm senaryoları Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

7.1. Düğümlerin Ağa Katılma Durumu Sonuçları

Çok atlamalı KAA düğümlerin ağa katılmasında düğüm sayısı artışına bağlı olarak gecikme olmaktadır. Bu tür ağlarda ağın performansı için düğümlerin ağa katılım mekanizmalarının çok verimli çalışması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı ağa röle olarak bağlanma mekanizmalarının çok hızlı ve minimum hata ile çalışması gerekmektedir. Bu çalışmada ağdaki düğüm yoğunluğuna bağlı olarak düğümlerin ağa katılım durumları test edilmiştir. Ayrıca farklı dizilimlere göre mekanizmanın performansı test edilmiştir.

7.1.1. Izgara Topoloji İçin Ağa Katılım Durumları

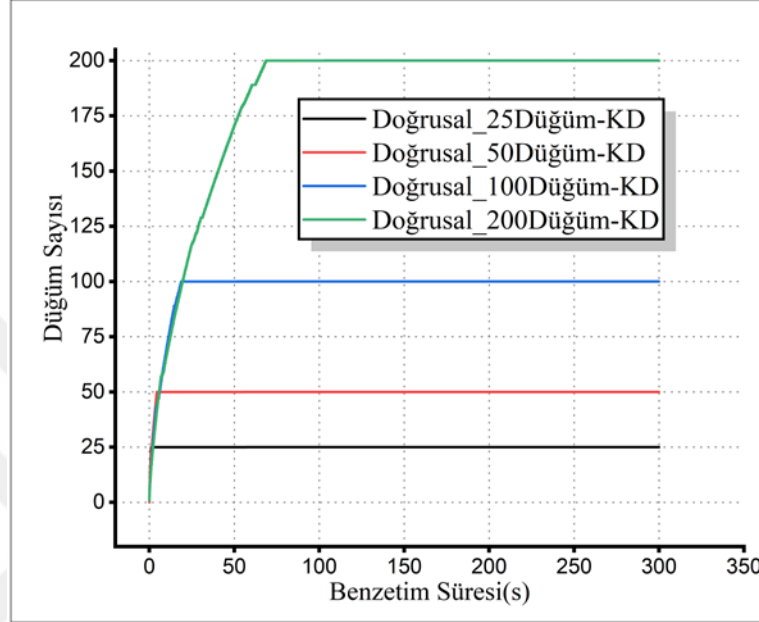


Şekil 7.3. Izgara topoloji için düğüm sayılarına bağlı olarak ağa katılım durumları

Şekil 7.3’te düğümler ızgara topolojide dizilmiş farklı düğüm sayılarında düğümlerin ağa katılma durumları gösterilmektedir. Düğüm sayısı arttıkça ağa katılımda bir gecikme olacağı aşikârdır. 25 düğümlü senaryoda 0.09 saniyede ve 50 düğümlü senaryoda bütün düğümler 0.26 saniyede ağa katılmıştır. 100 düğümlü senaryoda düğümler 1 saniye gibi kısa sürede ağa dâhil olmuşlardır. 200

düğümlü senaryoda düğümler 2.40 saniye içerisinde ağı katılmıştır. Bütün senaryolarda ağı katılan düğümlerin hiç biri ağadan kopmamıştır. Grafikte görüldüğü üzere önerilen röle mekanizmasının ızgara topolojisinde bütün düğüm sayılarında çok iyi bir performans göstermiştir.

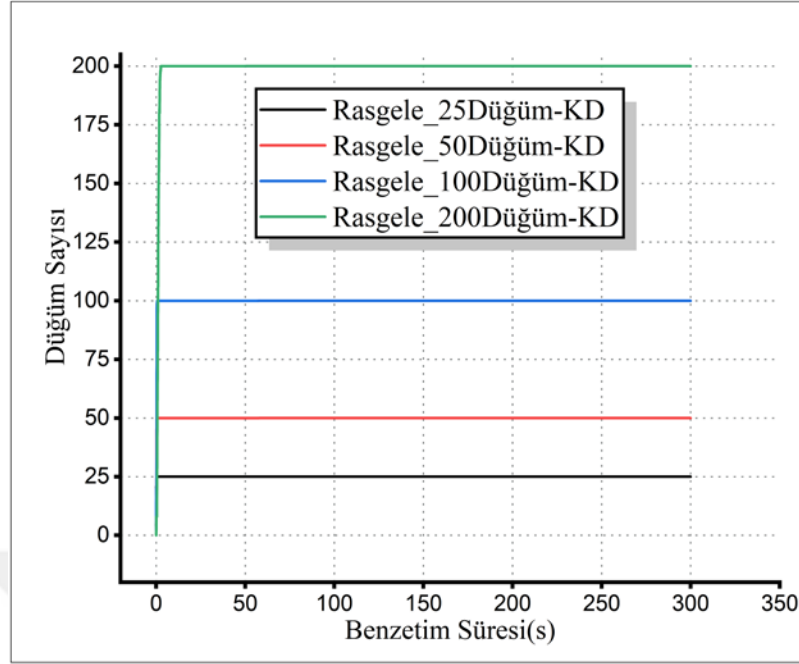
7.1.2. Doğrusal Topoloji İçin Ağ Katılım Durumları



Şekil 7.4. Doğrusal topoloji için düğüm sayılarına bağlı olarak ağı katılım durumları

Şekil 7.4'te düğümler doğrusal topolojiye dizilmiş farklı düğüm sayılarında düğümlerin ağı katılma durumları gösterilmektedir. Doğrusal topoloji KAA'ların özel bir topolojisidir. Düğümlerin birbiri ardına bir sıra halinde dizilmesi ile oluşur. Ağı her düğüm katılması demek atlama sayısının da artması demektir. Ağda düğüm sayısı artışına bağlı olarak atlama sayısı artmakta ve bu yüzden ağı katılımlar gecikmektedir. Benzetim için belirlenen süre 300 saniyedir. Bu süre boyunca 25 (1.1) saniye), 50 (4.4) saniye), 100 (18.6) saniye) ve 200 (67) saniye) düğümlü senaryoda bütün düğümler ağı katılmıştır. Sonuçlara bakıldığında diğer topolojilere göre daha geç olsa da doğrusal topolojide de bütün düğümlerin ağı katıldığı görülebilmektedir. Tek bir KD kullanılarak bu sonuçların elde edilmesi, röle mekanizmasının doğrusal topolojide de ağı katılmayan düğüm kalmayacak şekilde çalıştığı göstermektedir. Doğrusal topolojiye özgü çalışmalar yapılarak ağı katılımlarda diğer topolojilere yakın performanslar elde edilebileceği düşünülmektedir.

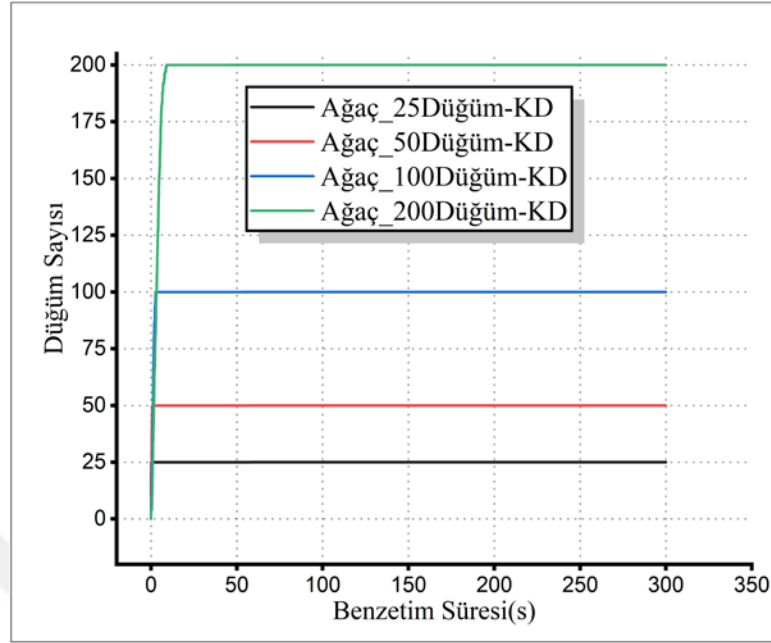
7.1.3. Rasgele Topoloji İçin Ağa Katılım Durumları



Şekil 7.5. Rasgele topoloji için düğüm sayılarına bağlı olarak ağa katılım durumları

Şekil 7.5'te düğümler rastgele topolojine dizilmiş olan KAA ağının farklı düğüm sayılarında düğümlerin ağa katılma durumları görülmektedir. Rasgele topoloji düğüm sayısına bağlı olarak ağa katılma süresini çok az etkilemiştir. Düğümlerin tamamının ağa katılma süresi 25 düğümlü senaryo için 0.22 saniye, 50 düğümlü senaryo için 0.26 saniye, 100 düğümlü senaryo için 0.55 saniye, 200 düğümlü senaryo için 2.56 saniye olarak görülmüştür. Bütün rastgele senaryolarda ağa katılan düğümlerin hiç biri benzetim süresi boyunca ağdan kopmamıştır. Tüm bu sonuçlara bakıldığı zaman önerilen röle mekanizmasının rastgele topolojisinde çok iyi bir performans gösterdiğini söylemek mümkün olmaktadır.

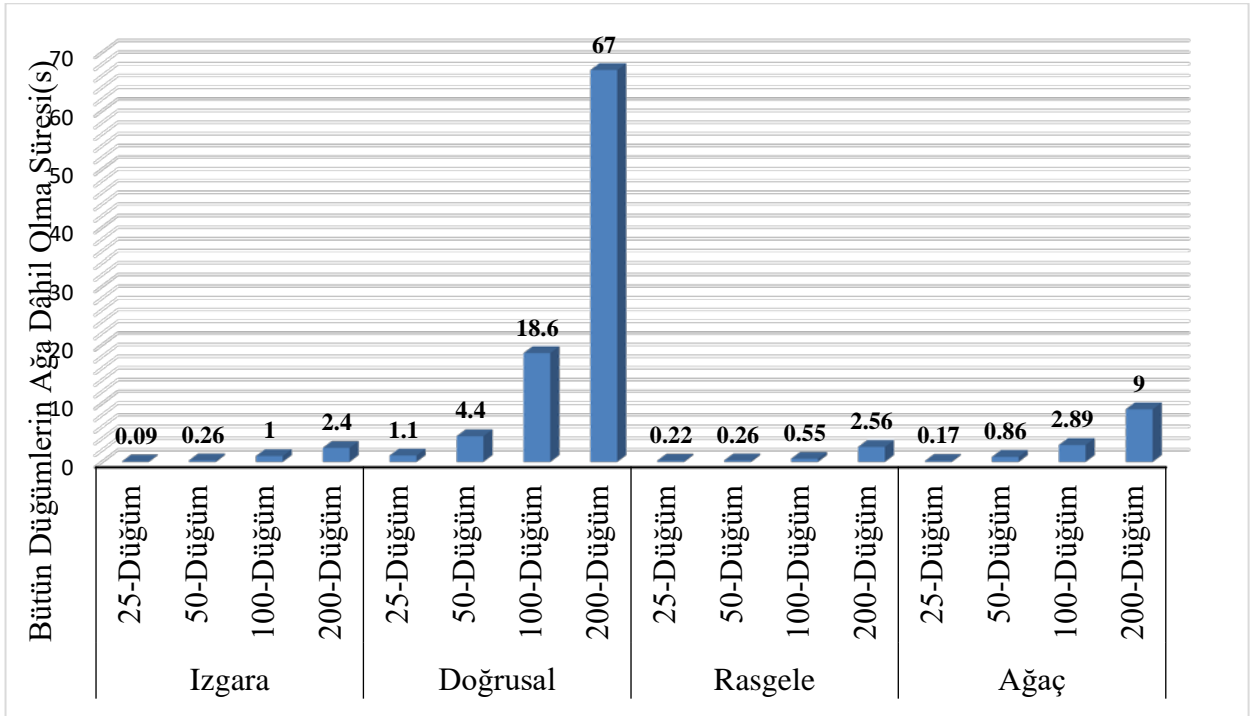
7.1.4. Ağaç Topoloji İçin Ağa Katılım Durumları



Şekil 7.6. Ağaç topoloji için düğüm sayısına bağlı olarak ağa katılım durumları

Şekil 7.6'da ağaç yapısında dizilmiş farklı düğüm sayılarında senaryolar gösterilmektedir. Bu senaryolarda düğümlerin tamamının ağa katılma süresi 25 düğümlü senaryo için 0.17 saniye, 50 düğümlü senaryo için 0.86 saniye, 100 düğümlü senaryo için 2.89 saniye, 200 düğümlü senaryo için 9 saniye olarak görülmüştür. Bu sonuçlara göre ağaç topoloji dizilimindeki ağ rasgele ve ızgara topolojilerine göre biraz daha gecikmeli ağa katılma gözlemlenmektedir. Ancak doğrusal topolojiye göre daha iyi bir performans göstermektedir. Böylelikle geliştirilen bu yeni röle mekanizması, ağaç diziliminde ki bir ağda tek bir KD düğüm kullanılarak ağa katılmayan düğüm kalmayacak şekilde çalıştığını göstermiştir. Bu sonuçlar röle mekanizmasının ağaç topolojisinde de kullanılabileceğini göstermektedir.

7.1.5. Tüm Benzetim Senaryolarında Ağa Katılım Durum Analizi



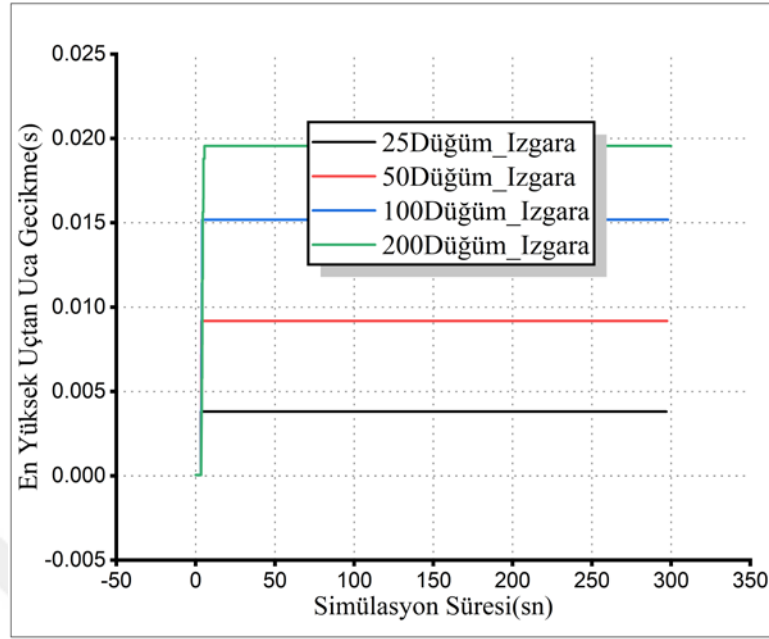
Şekil 7.7. Tüm senaryoların ağa katılım performans analizi

Bütün senaryolarda ağa katılım durumları Şekil 7.7’de gösterilmektedir. Sonuçlar benzetim süresi içerisinde bütün senaryolarda ağa katılmayan düğümün kalmadığını göstermektedir. Buradaki süreler düğümlerin tamamının ağa dâhil olduğu sürelerdir. Tüm düğümlerin ağa katılma hızında en iyi performansı 0.09 saniye süre ile ızgara topolojisine sahip 25-düğümlü senaryo göstermiştir. En kötü ağa katılım performansı doğrusal topoloji dizilimindeki 200-düğümlü senaryoda görülmektedir. Önerilen röle mekanizmasının amaçlarından bir tanesi bütün topolojilerde ağa katılmayan düğüm kalmayacak şekilde çalışmasıdır. Şekil 7.7’de bu amacın sağlandığı görülmektedir. Doğrusal topolojide gecikmeleri diğer topoloji seviyelerine inmesi için bu topolojiye özgü çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmektedir.

7.2. Ağdaki Gecikme Durum Sonuçları

KAA ağlarda uçtan uca paket gecikmesi ağın performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle gerçek zamanlı KAA uygulamaları için gecikme daha önem kazanmaktadır. Önerilen bu çalışmada düğüm sayısına ve ağ topolojisine bağlı olarak uçtan uca gecikme performansı analiz edilmiştir.

7.2.1. Izgara Topoloji İçin En Yüksek Uçtan Uca Gecikme

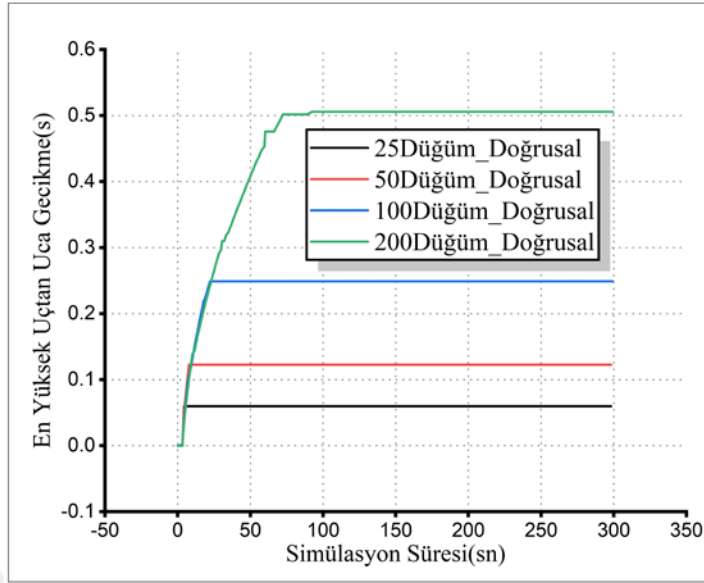


Şekil 7.8. Izgara topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi

Şekil 7.8’de görüldüğü gibi ızgara topolojisine sahip bir ağda 25-düğümlü senaryo için 0.004 saniye, 50-düğümlü senaryo için 0.009 saniye, 100-düğümlü senaryo için 0.015 saniye ve 200-düğümlü senaryo için 0.020 saniyedir. Bütün senaryolar için tek bir KD kullanılarak bu sonuçlar elde edilmiştir. KD düğüm artırıldığında düğümlerin atlama mesafesi azalacağından burada elde edilen gecikme değerlerinin çok az seviyelere ineceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar önerilen mekanizmanın ızgara topolojisinde uçtan gecikmede iyi bir performans sağladığını göstermektedir.

Çok atlamalı KAA uygulamalarında düğüm sayısı artıkça atlama sayısı da artmaktadır. Bu durum paket gecikmesini doğrudan etkilemektedir. Gecikmeye duyarlı gerçek zamanlı KAA uygulamaları için geliştirilen mekanizmaların uçtan uca paket gecikme performanslarının iyi olması gerekmektedir.

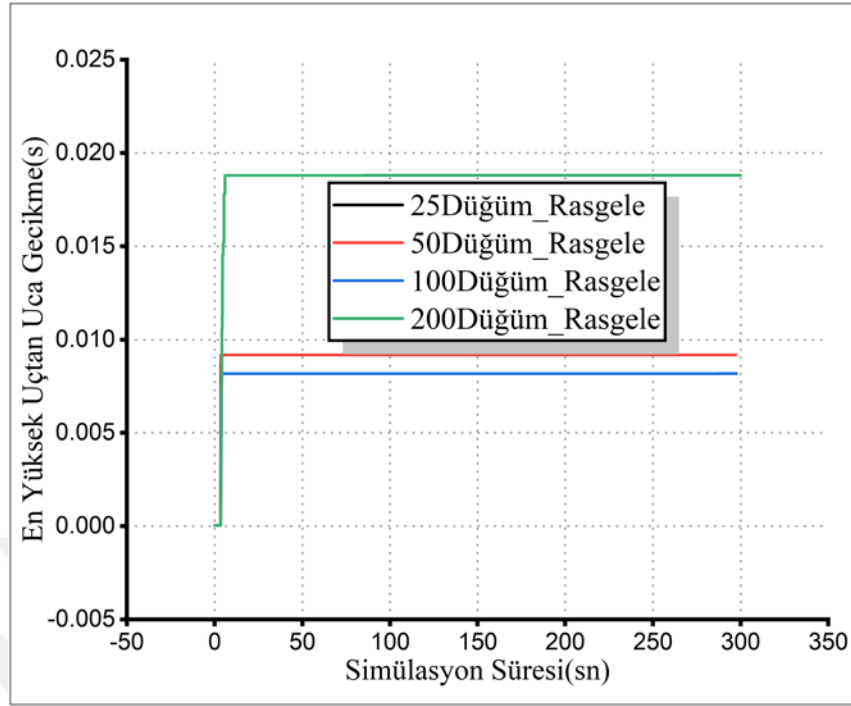
7.2.2. Doğrusal Topoloji İçin Uçtan Uca Gecikme



Şekil 7.9. Doğrusal topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi

Doğrusal topoloji KAA'lar çok özel bir topolojidir. İyi performans almak için sadece doğrusal topolojiye özgü algoritmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bütün topolojilerde çalışabilen bir mekanizma önerilmiştir. Şekil 7.9'da doğrusal topolojiye sahip 25, 50, 100, 200 düğümlü senaryolara ait maksimum uçtan uca gecikme sonuçları gösterilmektedir. 25, 50, 100, 200 düğümlü senaryolarda maksimum gecikme belirli süreden sonra sabit bir değerde devam etmektedir. En yüksek gecikmeler sırasıyla 0.06, 0.12, 0.25 ve 0.51 saniyedir. Mesafeler dikkate alındığında sonuçlar doğrusal topolojide de geliştirilen yeni mekanizmanın iyi performans elde ettiğini göstermektedir. Bizim önerdiğimiz mekanizma her topolojide çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Doğrusal topolojinin diğer topolojilere yakın performans göstermesi için bu topolojiye özgü iyileştirmeler yapılarak daha iyi performans elde edileceği düşünülmektedir.

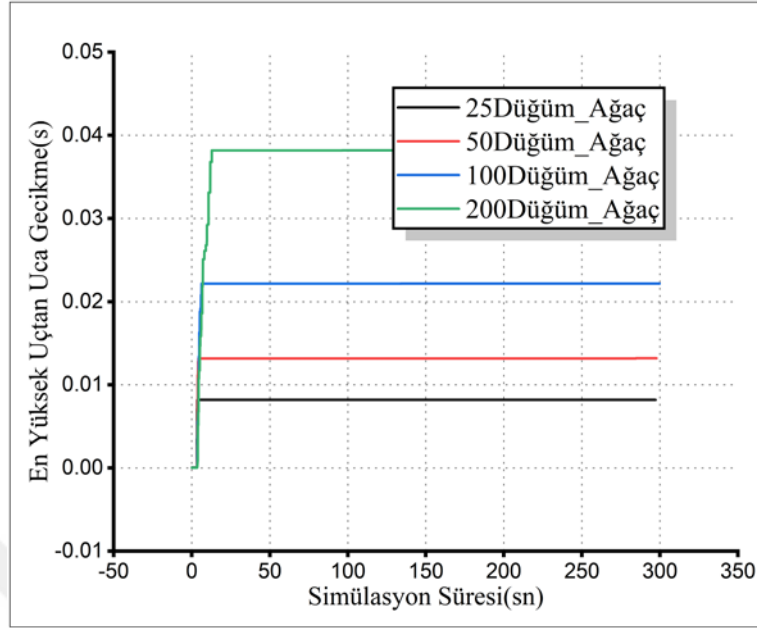
7.2.3. Rasgele Topoloji İçin Uçtan Uca Gecikme



Şekil 7.10. Rasgele topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi

Rasgele topolojide düğümler konumu önceden planlanmadan ağ ortamına rasgele dağıtılır. Şekil 7.10'da görüldüğü üzere farklı düğüm sayılarına sahip rasgele topolojisindeki 25-düğümlü senaryo için maksimum uçtan uca paket gecikmesi 0.009 saniye, 50-düğümlü senaryo için 0.009 saniye, 100-düğümlü senaryo için 0.008 saniye ve 200-düğümlü senaryo için 0.019 saniyedir. Rasgele topolojide de tek bir KD kullanılarak bu sonuçlar elde edilmiştir. Ağ ortamında KD düğüm artırıldığında düğümlerin atlama mesafesi doğru orantılı olarak azalacağından rasgele topolojili senaryoda elde edilen gecikme değerlerinin daha az seviyelere ineceği öngörülmektedir. Elde edilen sonuçlar önerilen mekanizmanın rasgele topolojisinde uçtan uca gecikmede iyi bir performans sağladığını göstermektedir.

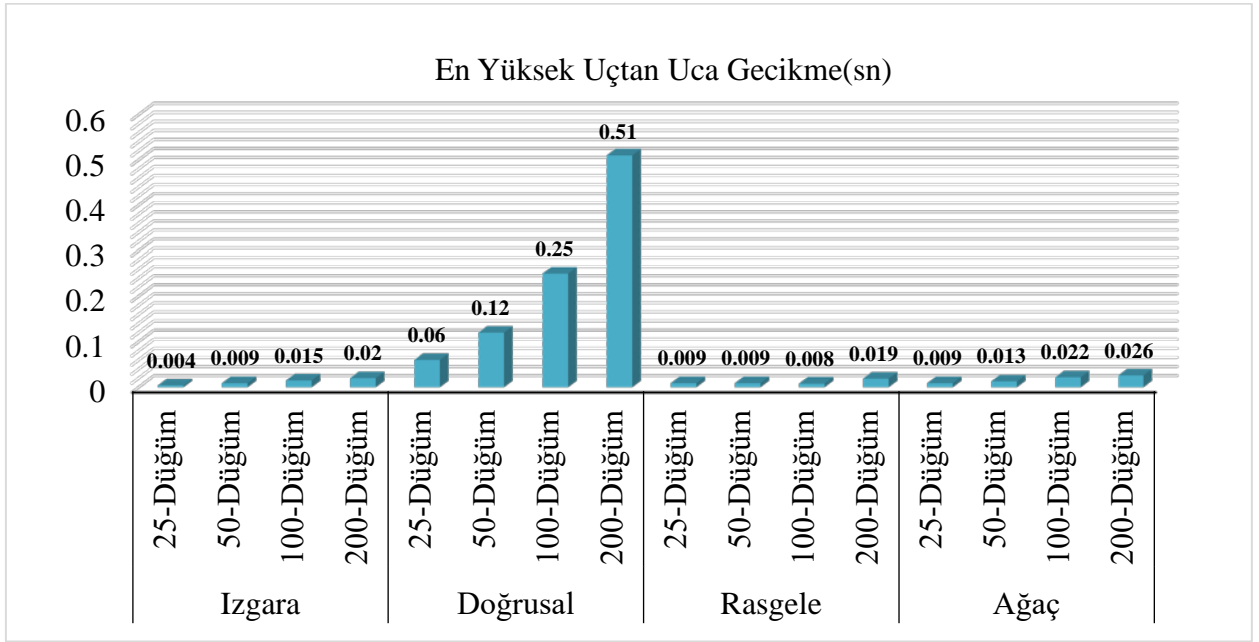
7.2.4. Ağaç Topoloji İçin Uçtan Uca Gecikme



Şekil 7.11. Ağaç topoloji için maksimum uçtan uca paket gecikmesi

Ağaç topolojisinde AD'ler hiyerarşik bir yapıda KD'den itibaren dallanarak ağ ortamına yayılmaktadır. KD kök düğüm olarak en tepede yer almaktadır. Şekil 7.11'de ağaç topolojisine sahip bir ağda maksimum uçtan uca paket gecikmesi 25-düğümlü senaryo için 0.009 saniye, 50-düğümlü senaryo için 0.013 saniye, 100-düğümlü senaryo için 0.022 saniye ve 200-düğümlü senaryo için 0.026 saniye olarak gösterilmektedir. Ağaç topolojisine sahip bütün senaryolarda tek bir KD kullanılarak bu sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar önerilen röle mekanizmasının ağaç topolojisinde de iyi bir performans gösterdiğini desteklemektedir.

7.2.5. Tüm Benzetim Senaryolarının Uçtan Uca Gecikme Analizi



Şekil 7.12. Tüm senaryoların uçtan uca paket gecikmesinin mukayese edilmesi

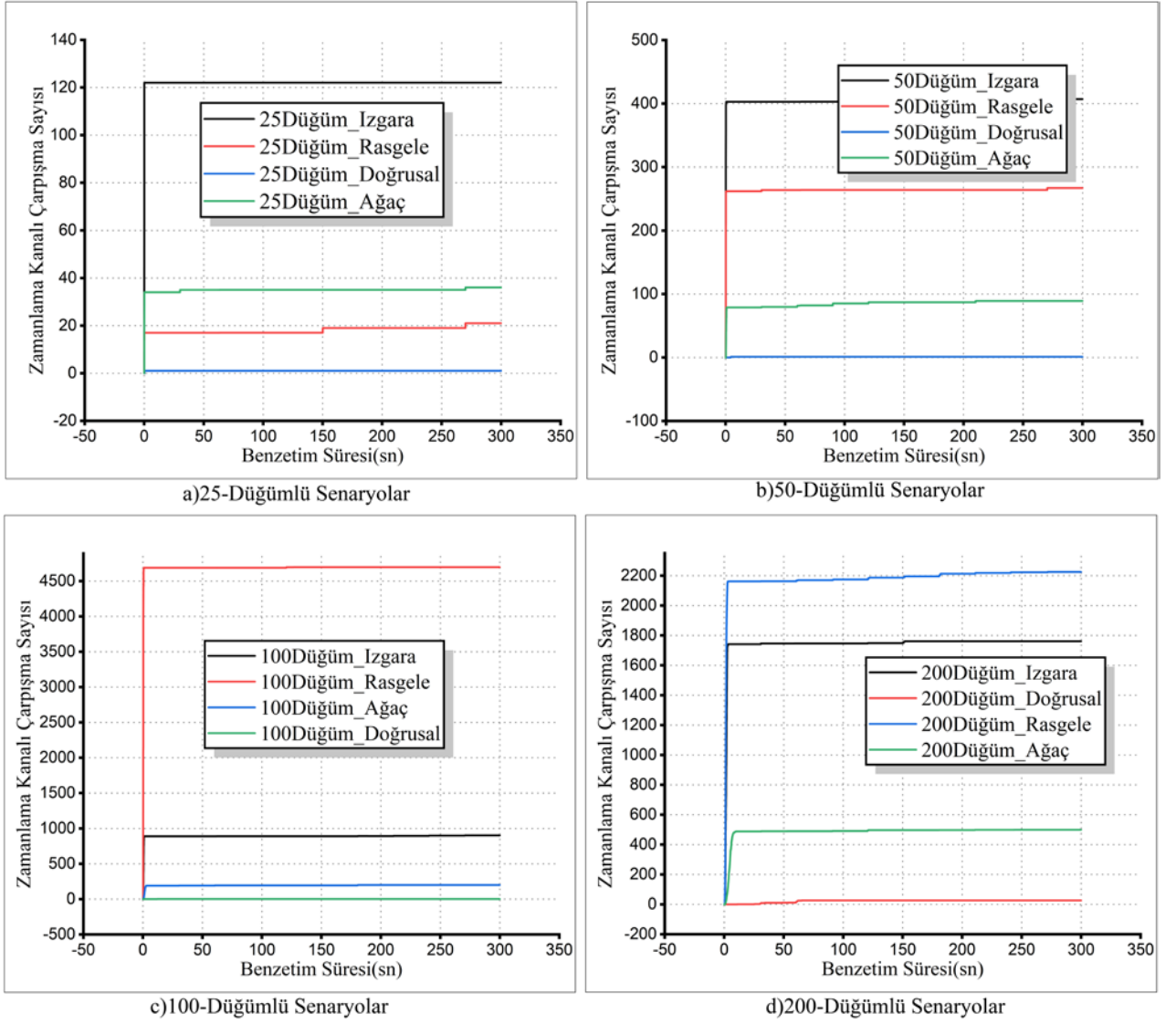
Bütün senaryoların gecikme durum karşılaştırmaları Şekil 7.12’de gösterilmektedir. Uçtan uca gecikmede en iyi performansı 0.004 saniye gecikme ile ızgara topolojisinde dizilmiş 25-düğümlü senaryo göstermektedir. En kötü performansı 0.51 saniye ile doğrusal topolojiye sahip 200-düğümlü senaryo göstermektedir. Bu durumun, ağdaki atlama sayısı ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Bütün sonuçlar dikkate alındığında önerilen mekanizmanın en iyi performans gösterdiği topoloji ızgara topoloji olarak göze çarpmaktadır. Bu topolojiyi sırası ile rasgele ve ağaç topolojileri izlemektedir. Doğrusal topoloji KAA’lar için çok özel bir topoloji olduğundan geliştirilen mekanizmaların doğrusal dizilime uygun olarak tasarlanması önerilmektedir.

7.3. Çarpışma Durum Analizi

Bu çalışma kapsamında iki kanalın çarpışma durumlarına bakılmaktadır. Birincisi; KD düğüm tarafından zamanlama paketlerinin gönderildiği kanal, ikincisi; düğümlerin ilk ağa katılım aşamasında çekişme tabanlı kullandığı kontrol kanalıdır. Ağa katılan düğümler kendi kanalını kullanacağından çarpışma sayıları dikkate alınmamaktadır.

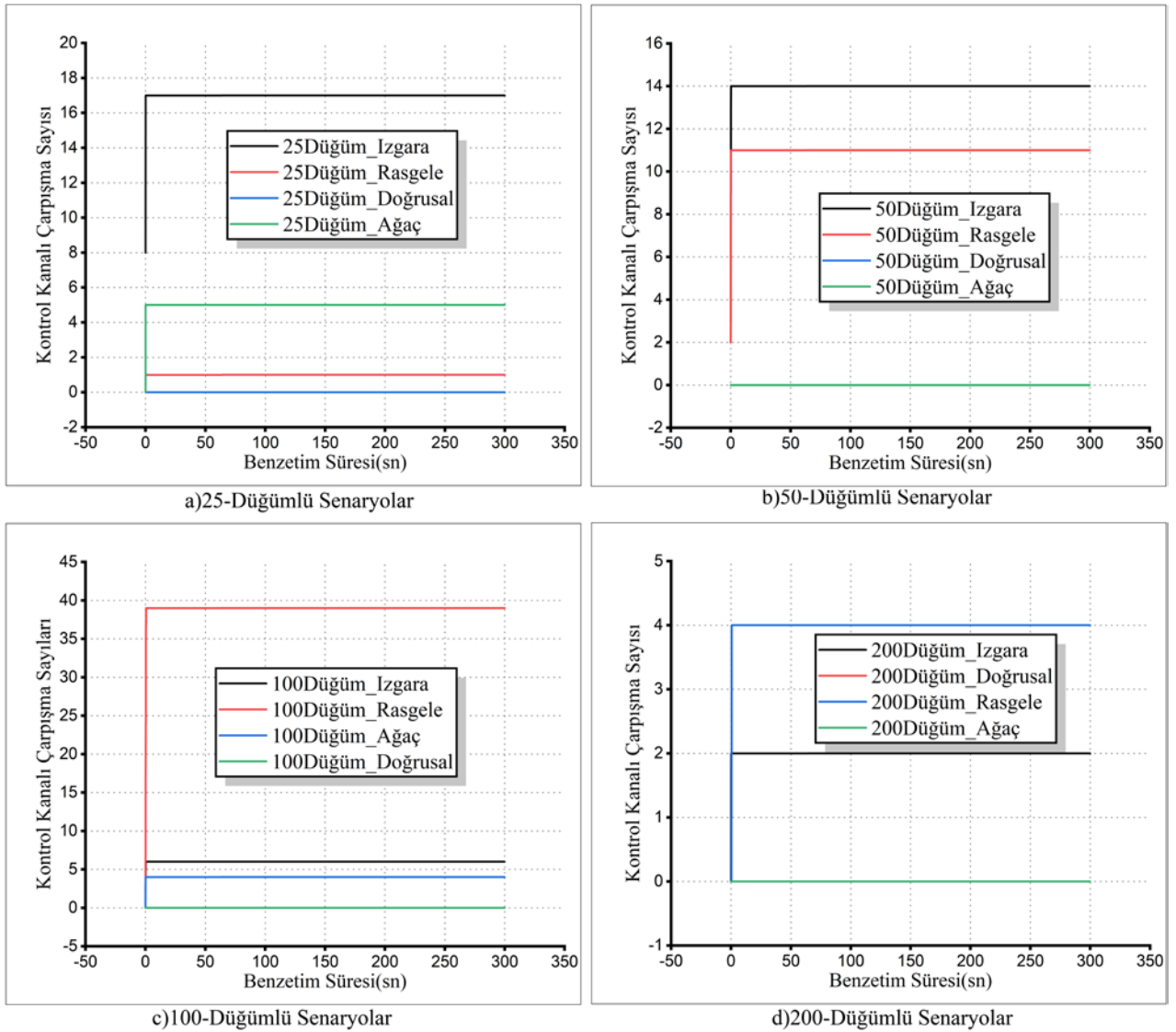
Zamanlama kanallarının trafiği düğümler ilk ağa katılırken çok daha yoğun olmaktadır. Bu çalışma kapsamında önerilen röle mekanizmasının karakteristiği gereği düğümler ilk uyandığında, çok ısrarcı bir şekilde ağa katılmak istemektedir. Bu da kontrol, röle ve zamanlama paketlerinin çok sık kullanılmasına ve kanalların trafiğinin artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 7.13. Zamanlama kanalının çarpışma durumu

Şekil 7.13’de benzetim boyunca zamanlama kanalında oluşan çarpışma sayıları gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında bütün senaryolarda çarpışmalar ağa ilk katılım aşamasında gerçekleştiği görülebilmektedir. Bu durum zamanlama paketlerinin ağa katılım aşamasında kullanılma sıklığıyla doğru orantılı olduğu söylenebilmektedir. Şekil 7.13 a), b), c) ve d)’de görüldüğü üzere en düşük çarpışmanın doğrusal topolojide olduğunu görmekteyiz. Bu durumun sebebi bir düğümün kapsama alanında komşu düğümlerin az olmasıdır. Grafiklerdeki rasgele ve ızgara topolojilerindeki değerlerin çok yüksek olmasının sebebi, bir çarpışma meydana geldiği zaman benzetim ortamının yapısı gereği aynı çarpışmayı birçok düğüm algılamaktadır. Bu grafikleri yorumlarken, toplam çarpışma sayısını, toplam düğüm sayısının ve aynı çarpışmayı algılayabilecek muhtemel düğüm sayısının çarpımına bölünmesi ile doğru değerlerin üretileceği önerilmektedir. Örnek olarak 100 düğümlü rasgele senaryoda 100 düğümde 4600 çarpışma

meydana geldiği görülmektedir. Burada ortalama düğüm başına ortalama çarpışma değeri $4600 \div 100 \times 3 \sim 15$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.14. Çekişmeli kontrol kanalının çarpışma durumu

Düğümler ilk uyandığı zaman ağa katılmak için çekişme tabanlı kontrol kanalından kontrol paketleri göndermektedir. Ağa katılan düğüm bu kanalı bırakmaktadır. Düğümler ağa katıldıkça bu kanalın trafiği azalmaktadır. Şekil 7.14 a), b) c) ve d)'de görüldüğü gibi doğrusal topoloji haricinde bütün senaryolarda ilk girişlerde çarpışmalar olduğu görülmektedir. Bu kanalda oluşan çarpışmalar sadece düğümün ağa geç katılmasını ve enerji tüketimini olumsuz yönde etkilemektedir.

7.4. Enerji Durum Analizi

Benzetim için referans alınan Nordic platformunun enerji tüketim miktarları Çizelge 7.2’de verilmiştir. Bu çalışmada AD’lerin uyku modu, LPL ve paket alış-verişi durumunda harcadığı enerjiler toplanarak harcadığı toplam enerji miktarı hesaplanmaktadır. Güç harcamasına neden olabilecek diğer parametrelerin kayda değer harcama yapmadığı varsayılmıştır.

Çizelge 7.2. Nordic platformunun enerji tüketim miktarları

	Bant Genişliği(KHz)	Veri İletim Oranı(bps)	Enerji Tüketim Türü	Enerji(W)
Radyo-1	100	595E3	P_{Tx}	0.0330
			P_{Rx}	0.0366
Radyo-2	200	1194E3	P_{Tx}	0.0900
			P_{Rx}	0.0384
			P_{Sp}	0.0003
			P_{LPL}	375E-7

P_{Tx} : Verici gücü(W)

P_{Rx} : Alıcı gücü (W)

P_{Sp} : Uyku durumunda harcanan enerji (W)

P_{LPL} : Düşük seviye dinleme gücü (W)

E_T : Tüm düğümler tarafından harcanan toplam enerji(W)

$N_{Rpkt.}$: Tüm düğümler tarafından alınan toplam paket sayısı

N_{Tpkt} : Tüm düğümler tarafından gönderilen toplam paket sayısı

P_{PRP} : Bir paket alınırken harcanan enerji(W)

P_{PTP} : Bir paket gönderilirken harcanan enerji(W)

C_N : Toplam düğüm sayısı

R_{ch} : Kanal veri oranı(bps)

L_{pkt} : Paket boyutu(bit)

W : Watt

$$P_{PRP} = \frac{L_{pkt}}{R_{ch}} \times P_{Rx} \quad (7.1)$$

Bir düğümün bir paketi alması için radyolarda kullanması gereken enerji miktarı Formül 7.1’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

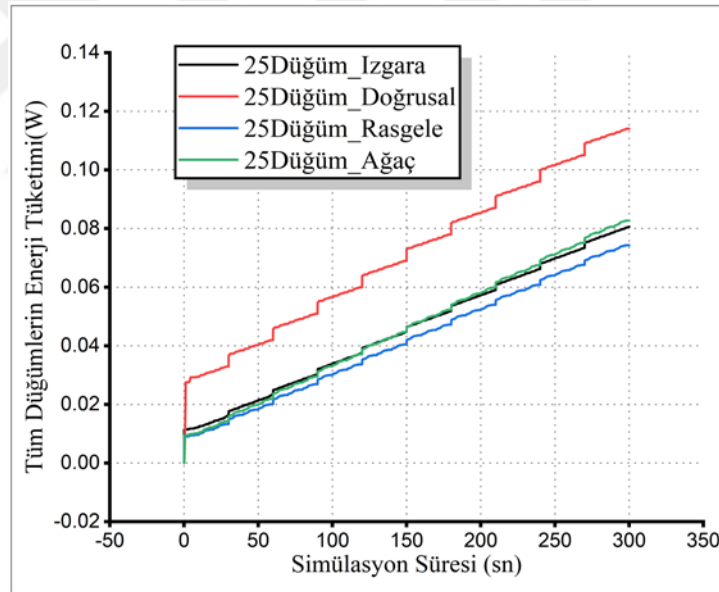
$$P_{PTP} = \frac{L_{cp}}{R_{ch}} \times P_{Tx} \quad (7.2)$$

Bir paketi iletmek için gerekli olan enerji miktarı Formül 7.2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$E_T = C_N \times \{ \{P_{PRP} \times N_{Rpkt} \} + \{P_{PTP} \times N_{Tpkt} \} + P_{Sp} + P_{LPL} \} \quad (7.3)$$

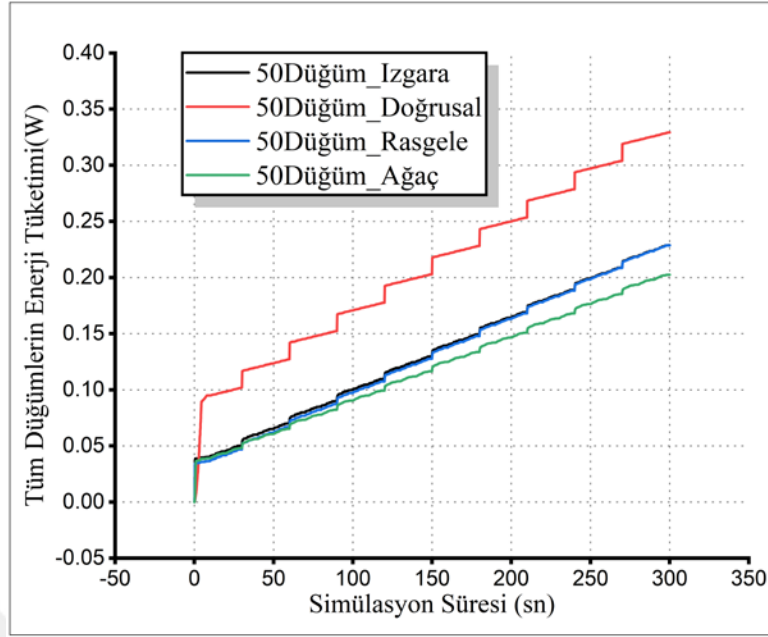
Ağdaki tüm düğümlerin harcadığı toplam enerji miktarı (E_T) Formül 7.3'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında benzetimi yapılan KAA için düğüm sayıları 25, 50, 100 ve 200 olarak belirlenmiştir. Topoloji olarak ızgara, doğrusal, rasgele ve ağaç olarak belirlenmiştir. Bütün senaryolarda ağda bulunan bütün düğümlerin harcadığı toplam enerji miktarı grafiklerde gösterilmektedir. Bütün grafiklerde benzetim süresinin ilk saniyelerinde enerji tüketimlerinde hızlı bir artış olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi ise ağa katılım aşamalarında düğüm hareketliliğinin daha fazla olmasıdır. Düğümler ilk uyandıkları zaman ağa katılma isteği sebebiyle kontrol ve röle paketlerini sık kullanmaktadır. KD, ağa kattığı her düğüm için zamanlama paketi oluşturmaktadır.



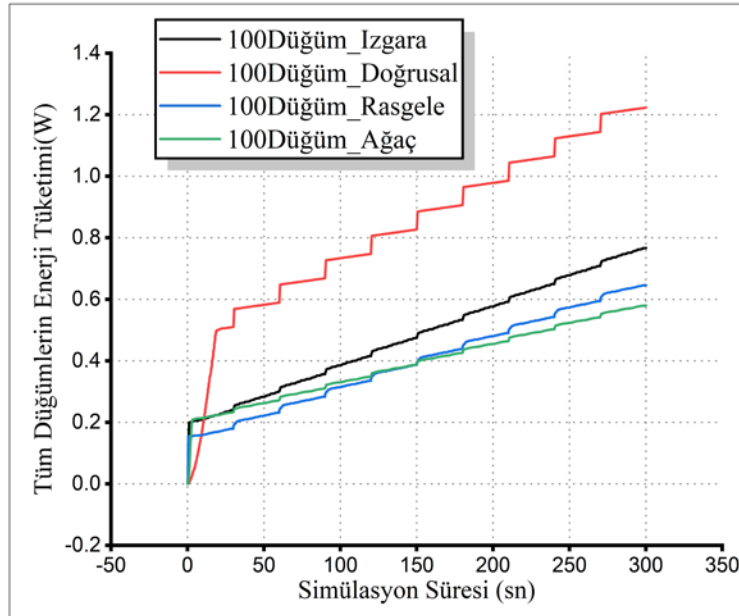
Şekil 7.15. 25-düğümlü senaryolara ait enerji tüketimleri

25 düğüm sayısına sahip farklı topolojilerdeki toplam düğüm enerji harcamaları Şekil 7.15'te gösterilmektedir. 25 düğümün toplam enerji tüketimi; ızgara, doğrusal, rasgele ve ağaç topolojilerine göre sırasıyla yaklaşık olarak 0.080, 0.110, 0.072, ve 0.081W olarak gözükmektedir. Buna göre en çok enerji tüketen topoloji doğrusal topolojidir. Diğerlerine göre belirgin bir şekilde daha fazla enerji tüketmiştir. Ağa katılım aşamasında paket trafiği fazla ve ayrıca kaynaktan hedefe giden paketlerin atlama sayısı da diğerlerine göre çok fazladır.



Şekil 7.16. 50-düğümlü senaryolara ait enerji tüketimleri

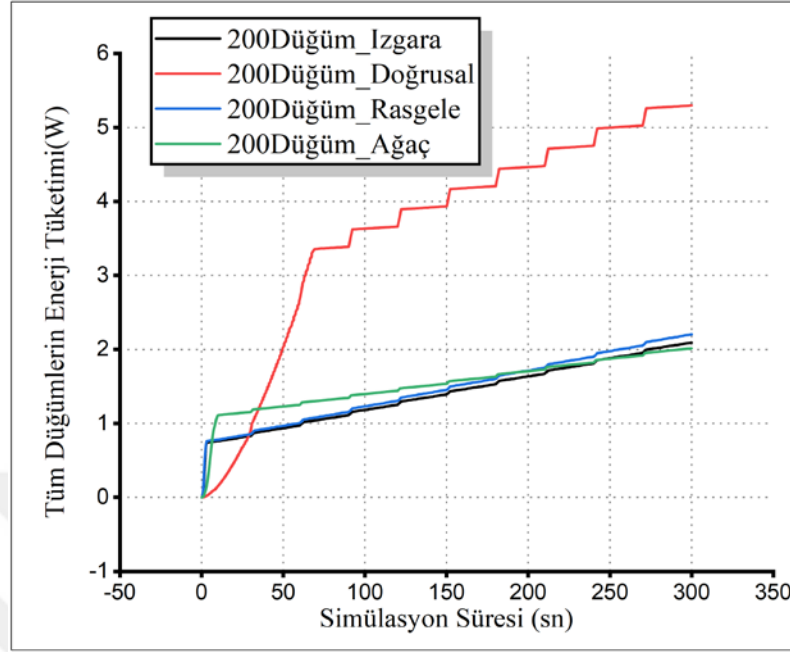
Düğüm sayısı 50 olarak belirlenmiş senaryolardaki bütün düğümler tarafından tüketilen enerji miktarı Şekil 7.16'da gösterilmiştir. Bu senaryolarda ızgara, doğrusal, rasgele ve ağaç dizilimlerindeki toplam 50 düğümün harcadığı enerjiler sırasıyla yaklaşık olarak 0.270, 0.330, 0.270, ve 0.20 W olarak görülmektedir. En çok enerji tüketen topoloji 20-düğüm senaryolarında olduğu gibi doğrusal topoloji olmuştur.



Şekil 7.17. 100-düğümlü senaryolara ait enerji tüketimleri

100-düğüm sayısına sahip senaryolardaki bütün düğümler tarafından tüketilen enerji miktarı Şekil 7.17'de gösterilmiştir. Bu senaryolarda düğümlerin toplam harcadıkları enerji miktarları sırasıyla

yaklaşık olarak 0.770, 0.1.210, 0.630, ve 0.590 W olarak gösterilmektedir. Ençok enerji tüketen topoloji 25 ve 50 düğümlük senarolarda olduğu gibi doğrusal topolojide gözükmektedir.



Şekil 7.18. 200-düğümlü senarolara ait enerji tüketimleri

Düğüm sayısı 200 olan farklı dizilim modellerine ait enerji tüketim miktarı Şekil 7.18’de gösterildiği gibidir. Grafikte görüldüğü gibi bu senaryolarda ızgara, doğrusal, rasgele ve ağaç dizilimlerindeki toplam 200 düğümün harcadığı toplam enerji miktarı sırasıyla yaklaşık olarak 2.005, 5.400, 2.010, ve 2W olduğu görülmektedir. Ençok enerji tüketen topoloji doğrusal topolojidir. Bu durum ağa katılım aşamasının uzaması olarak gösterilebilir.

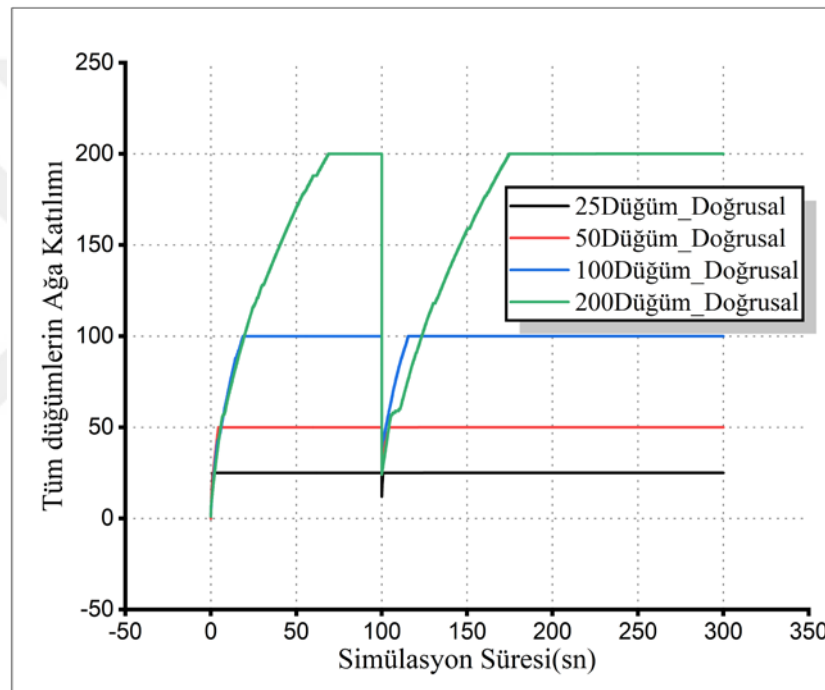
Bu çalışmada KAA’larda aynı koşullar altında ve aynı sayıda düğüm sayısına sahip farklı senaryolardaki topolojilerin enerji tüketim miktarları incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki düğüm sayısı aynı olsa bile topoloji değiştiği zaman düğümlerin enerji tüketim miktarları da değişmektedir. Bu çalışmada paket bazlı enerji tüketiminde sadece zamanlama, kontrol ve röle paketleri dikkate alınmaktadır. Düğümlerin ağa ilk katılma esnasında enerji tüketim miktarının fazla olması, bu aşamada zamanlama, kontrol ve röle paketlerinin daha sık kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Enerji tüketimindeki artış özellikle doğrusal senaryolarda belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır. Bu duruma sebep olan birincil etken; ağdaki maksimum atlama sayısı, ikincil olarak da ağ kurulum aşamasında kullanılan paket sayısıdır. Bundan dolayı ağ kurulum aşamasında daha az paket kullanılarak enerji verimliliğinin sağlanabileceği aşikârdır.

Sonuç olarak bu çalışma, topolojilerin farklı seviyede enerji harcadığı konusunu benzetim sonuçları ile desteklemektedir. Benzetim sonuçları bu farklılıklara sebep olan etmenler arasında toplam paket sayısı ve atlama sayısının önemli bir yeri olduğunu göstermektedir.

7.5. Ağdan Kopan Düğümün Ağa Katılma Analizi

Bir düğüm ağdan koptuğu zaman kısa sürede tekrar bağlanması ağın performansı açısından önemlidir. Bu çalışmada 25, 50, 100 ve 200 düğümlü doğrusal senaryoda ağdan kopma testi yapılmıştır. Ağda bulunan bir düğüm 100. saniyede dış müdahale ile ağdan düşürülmüştür. Geliştirilen algoritma gereği düşen düğüme röle olarak bağlı olan düğümlerde ağdan düşmektedir.



Şekil 7.19. Ağdan kopan düğümlerin tekrardan ağa bağlanması

Şekil 7.19'da doğrusal topolojiye sahip 25, 50, 100 ve 200 düğümlü senaryolara ait ağdan kopma testi sonuçları gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere bir düğüm ağdan koptuğunda ona bağlı olan tüm diğer düğümler de ağdan kopmakta ve tekrardan hızlıca ağa bağlanmaktadır. Ağdan kopma testi, ağa bağlanmanın diğer topolojilere göre daha geç olduğu doğrusal topolojide uygulanmıştır. Diğer topolojilerde daha iyi sonuçlar göstereceği muhakkaktır. Sonuçlar, röle mekanizmasının ağdan düşen bir düğümün ağa tekrar bağlanmada iyi performans gösterdiğini desteklemektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tüm yapılan senaryolar göstermiştir ki önerilen bu röle mekanizması, düğümlerin ağa katılım durumlarında her topolojide %100 performans göstermiştir. Uçtan uca gecikmeler atlama sayısına bağlı olarak bir artış gösterdiği bir gerçektir. Sonuçlar göstermiştir ki rastgele, ızgara, ağaç topolojilerinde önerilen bu röle mekanizması, uçtan uca gecikme performansı bakımından iyi bir performans göstermiştir. Ancak doğrusal topolojinin performansı, gecikme bakımından belirli bir atlama sayısından sonra düşmektedir. Bundan dolayı bu röle mekanizması sınırlı sayıda düğümden oluşan doğrusal topolojiye sahip ağ uygulamaları için önerilmektedir.

Önerilen bu röle mekanizması gecikme duyarlı ağ uygulamaları için kullanımını durumunda en iyi performansın alınması için çoklu KD düğüm kullanılması ve atlama sayısı çok olmayacak şekilde topolojinin seçilmesi gerektiği düşünülmektedir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen yeni röle mekanizmasının özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- CSMA – FDMA – TDMA gibi çoklu ortam erişim metotlarının iyi yönlerini birlikte kullanılarak melez bir yaklaşım benimsenmiş çok atlamalı KAA uygulamaları için esnek bir röle mekanizması tasarlanmıştır.
- Zamanlama paketleri için ayrı kanal ve kontrol paketleri için ayrı kanal kullanılarak bir kanalda oluşabilecek paket trafiğinin azaltılması hedeflenmiştir. “KONTROL” paketlerinin boyutu sabit ve düşük tutularak ve buna ek olarak “ZAMANLAMA” paketlerinin boyutları ağdaki düğüm sayısına bağlı olarak artacak şekilde ayarlanarak ağ veri trafiğini azaltmaya yönelik katkılar sağlanmıştır.
- Ağa katılmayan düğüm kalmayacak şekilde çalışan esnek bir ağa katılım algoritması önerilen mekanizmaya kazandırılmıştır. Doğrudan KD düğümün kapsama alanında olan düğümler ağa doğrudan katılırken KD düğüme ulaşamayan düğümler ağa katılmak için hızlı bir şekilde ortamda röle düğüm arayışı başlatmaktadır. Bu sayede ağda çok atlamalı bir yapı kısa sürede oluşmaktadır.
- Çok kanallı bir ağ yapısı tercih edilerek çarpışma ve sıkışıklık oranlarının en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Kanal tahsislerinde melez bir yaklaşım ve kanal dağıtım için merkezi bir sistem kullanılmıştır. Bütün kanal tahsislerini KD düğüm yapmaktadır. KD düğüm bütün kanalları sıra ile atamakta ve bütün kanallar tahsis edildikten sonra eğer ihtiyaç olursa daha önce tahsis edilen kanalları zaman paylaşımı olarak düğümlere tahsis etmektedir.

- Önerilen röle mekanizması için iki radyolu bir yapı tercih edilmiştir. Zamanlama, kontrol ve röle paketleri için düşük frekansa sahip radyo kullanılırken veri paketleri için yüksek frekansa sahip radyo kullanılarak ağa genel yayın desteği sağlanmıştır. Bu şekilde ağın veri trafiği olumsuz etkilenmezken kontrol ve röle trafiği de güvenilir bir şekilde yönetilebilmektedir.
- Üç yöllü el sıkışma ile düğümlerin ağa katılması sağlanmış, bu sayede gizli terminal problemi ve kötü niyetli girişimlerden kaynaklı olumsuzların önüne geçilmeye çalışılmıştır. Ayrıca çoklu KD kullanımı durumunda düğümler ilk ağa katılırken birden çok KD'ye ağa katılma talepleri oluşmakta, bundan dolayı KD düğümler gereksiz meşgul edilmektedir. Üç yöllü el sıkışma yöntemi sayesinde düğümler sadece bir KD düğüme ağa katılma talebi iletmektedir. Bu sayede ağdaki paket trafiğini azaltmaya katkı sağlanmış olmaktadır.
- Düğümler röle tabinde bulunurken öncelik temelli bir yöntem kullanmaktadır. Bu yöntemde röle talebine olumlu cevap veren düğümler arasından KD düğüme en kısa atlama ile ulaşan düğüme öncelik vermektedir. Böylelikle düğümün daha kısa yoldan KD'ye bağlanması hedeflenmiş ve bu sayede uçtan uca paket gecikmesinin azaltılması amaçlanmıştır.
- Düğümlerin TDMA metodunu kullanmaya başladıklarında KD düğüm tarafında kendisine zaman paylaşımlı olarak kullanacağı kanalın kullanıcı sayısı ve kendisinin kanal kullanım sırası, zaman paketleri ile bildirilmektedir. Düğüm kendi zaman dilimini hesaplarken bu değerleri kullanmaktadır.
- Kontrol paketlerinin düşük boyutu(32-bit) olduğundan daha küçük bant genişliği değerine sahip frekans kanalları kullanarak büyük ölçekli ağlar için hattın verimli kullanılması sağlanmış olacağı öngörülmektedir.
- Sonuç olarak bu tez çalışmasında yeni bir röle mekanizması pekiştirilmiş ve çeşitli senaryo uygulamaları için benzetimleri yapılarak, belirlenen başarımlı ölçütlerine göre performans analizleri yapılmıştır.
- Geliştirilen röle mekanizmasının rasgele, ağaç, ızgara topolojilerinde uçtan uca gecikme ve ağa katılım konusunda beklenen performansın sağlandığı görülmüş olup, doğrusal

topolojide uçtan uca gecikme ve ağa katılım hızı konusunda ise geliştirmeye açık olduğu kanısına varılmıştır.

- İlerleyen çalışmalarda geliştirilen mekanizmanın doğrusal topolojide de beklenen performansı göstermesi için gerekli iyileştirmelerin yapılması hedeflenmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E, 2002. Wireless Sensor Networks: A Survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422.
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D, 2008. Wireless Sensor Network Survey. *Computer Networks*, 52(12):2292–2330.
- [3] Mazumder B, Venugopalan V, Hallstrom JO, 2010. A Channelization Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks using Frequency Division Multiplexing. İçinde: *Proc. 48th Annu. Southeast Reg. Conf. ACM. Oxford, Mississippi*, s:1–6.
- [4] Gruenwald L, Yang H, Sadik MS, Shukla R, 2010. Using data mining to handle missing data in multi-hop sensor network applications. İçinde: *Proc. Ninth ACM Int. Work. Data Eng. Wirel. Mob. Access - MobiDE '10. ACM Press, New York, New York, USA*, s:9.
- [5] Lakhlef H, Bourgeois J, Harous S, Myoupo JF, 2015. Collision-Free Routing Protocol in Multi-hop Wireless Sensor Networks. İçinde: *2015 IEEE Int. Conf. Comput. Inf. Technol. Ubiquitous Comput. Commun. Dependable, Auton. Secur. Comput. Pervasive Intell. Comput. IEEE, Liverpool, UK*, s:92–99.
- [6] Abdallah M, 2009. Cooperative beamforming for multi-hop relaying in wireless sensor networks. İçinde: *Proc. 2009 Int. Conf. Wirel. Commun. Mob. Comput. Connect. World Wirelessly - IWCMC '09. ACM Press, New York, New York, USA*, s:660.
- [7] Chakrabarti A, Sabharwal A, Aazhang B, 2004. Multi-hop communication is order-optimal for homogeneous sensor networks. İçinde: *Inf. Process. Sens. Networks, 2004. IPSN 2004. Third Int. Symp. Berkeley, California, USA*, s:178–185.
- [8] Arı D, Çıbuk M, Ağgün F, 2017. Effect of relay-priority mechanism on multi-hop wireless sensor networks. *Bitlis Eren Univ J Sci Technol*, 7(2):145–153.
- [9] Yetgin H, Cheung KTK, El-Hajjar M, Hanzo L, 2015. Network-Lifetime Maximization of Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 3:2191–2226.
- [10] Yüksel ME, 2014. Enerji verimli kablosuz algılayıcı ağ tasarımı ve gerçekleştirilmesi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

- [11] Rodenas-Herraiz D, Garcia-Sanchez A-J, Garcia-Sanchez F, Garcia-Haro J, 2014. On the improvement of wireless mesh sensor network performance under hidden terminal problems. *Futur Gener Comput Syst*, 45:95–113.
- [12] Hou YT, Shi Y, Sherali HD, Midkiff SF, 2005. On energy provisioning and relay node placement for wireless sensor networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 4(5):2579–2590.
- [13] Nguyen K, Ji Y, 2011. Impact of contention on performance of flows in multi-hop MAC protocol for sensor networks Categories and Subject Descriptors. İçinde: *SoICT '11 Proc. Second Symp. Inf. Commun. Technol. Hanoi, Vietnam*, s:42–46.
- [14] Buratti C, Verdone R, 2016. L-CSMA: A mac protocol for multihop linear wireless (sensor) networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 65(1):251–265.
- [15] Zhou Y, Liu J, Zheng L, Zhai C, Chen H, 2011. Link-utility-based cooperative mac protocol for wireless multi-hop networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 10(3):995–1005.
- [16] Furuta T, Sasaki M, Ishizaki F, Ukai T, Miyazawa H, Koo W, 2010. New formulation for scheduling problem in multi-hop wireless sensor networks. İçinde: *Proc. 6th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. ZZZ - IWCMC '10*. ACM Press, New York, New York, USA, s:73.
- [17] Lin J, Weitnauer MA, 2018. Range Extension Cooperative MAC To Attack Energy Hole İn Duty-Cycled Multi-Hop Wsns. *Wireless Networks*, 24(5):1419–1437.
- [18] KIRI Y, SUGANO M, MURATA M, 2007. On characteristics of multi-hop communication in large-scale clustered sensor networks. *IEICE Trans Commun*, E90–B(2):228–238.
- [19] Chughtai O, Badruddin N, Awang A, 2016. A novel congestion alleviation procedure in multi-hop wireless sensor networks. İçinde: *2016 6th Int. Conf. Intell. Adv. Syst. IEEE*, s:1–6.
- [20] Hu H, Hu X, Xiao J, 2017. CDMA-based MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks. İçinde: *2nd IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Eng. CDMA-based*. Singapore, Singapore, s:266–271.
- [21] O'Connell E, O'Flynn B, Boyle D, 2013. Clocks, latency and energy efficiency in duty cycled, multi-hop Wireless Sensor Networks. İçinde: *5th IEEE Int. Work. Adv. Sensors*

- Interfaces IWASI. IEEE, s:199–204.
- [22] Murdiyat P, Chung KS, Chan KS, 2016. A multi-channel MAC for multi-hop wireless sensor networks minimizing hidden node collision. İçinde: 2016 22nd Asia-Pacific Conf. Commun. IEEE, s:535–540.
- [23] Sun Y, Du S, Gurewitz O, Johnson DB, 2008. Dw-mac. İçinde: Proc. 9th ACM Int. Symp. Mob. ad hoc Netw. Comput. - MobiHoc '08. ACM Press, New York, New York, USA, s:53.
- [24] Nguyen K, Ji Y, 2010. AM-MAC. İçinde: Proc. 6th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. ZZZ - IWCMC '10. ACM Press, New York, New York, USA, s:432.
- [25] Caneva D De, 2010. A synchronous and deterministic mac protocol for wireless communications on linear topologies. Int'l J Commun Netw Syst Sci, 03(12):925–933.
- [26] Zhong Shen, Hai Jiang, Zhongjiang Yan, 2014. Fast data collection in linear duty-cycled wireless sensor networks. IEEE Trans Veh Technol, 63(4):1951–1957.
- [27] Ma C, Liang W, Zheng M, 2017. Delay Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks: A Subtree-and-Mergence-based Approach. Mob Networks Appl, :1–13.
- [28] Yudo YAS, Shigei N, Miyajima H, 2015. Effective initial route construction for mobile relay on wireless sensor network. Artif Life Robot, 20(1):49–55.
- [29] Djenouri D, Bagaa M, 2017. Energy-aware constrained relay node deployment for sustainable wireless sensor networks. IEEE Trans Sustain Comput, 2(1):30–42.
- [30] Djenouri D, Bagaa M, Chelli A, Balasingham I, 2016. Energy Harvesting Aware Minimum Spanning Tree for Survivable WSN with Minimum Relay Node Addition. İçinde: 2016 IEEE Globecom Work. (GC Wkshps). IEEE, Washington, DC, USA, s:1–6.
- [31] Souissi M, Meddeb A, 2017. Modelling of clustering with relay nodes in wireless sensor networks. İçinde: 2017 IEEE 7th Annu. Comput. Commun. Work. Conf. IEEE, Las Vegas, NV, USA, s:1–6.
- [32] Luo J, Hu J, Wu D, Li R, 2015. Opportunistic routing algorithm for relay node selection in

- wireless sensor networks. *IEEE Trans Ind Informatics*, 11(1):112–121.
- [33] de Freitas EP, Heimfarth T, Netto IF, Lino CE, Pereira CE, Ferreira AM, Wagner FR, Larsson T, 2010. UAV relay network to support WSN connectivity. İçinde: *Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. IEEE, Moscow, Russia*, s:309–314.
- [34] Hussain MA, Khan P, Kwak kyung Sup, 2009. WSN Research Activities for Military Application. İçinde: *Adv. Commun. Technol. 2009. ICACT 2009. 11th Int. Conf. Phoenix Park, South Korea*, s:271–274.
- [35] Khan P, Hussain M KK, 2009. Medical applications of wireless body area networks. *Int J Digit Content Technol its Appl*, 3(3):185–193.
- [36] Alemdar H, Ersoy C, 2010. Wireless sensor networks for healthcare: a survey. *Comput Networks*, 54(15):2688–2710.
- [37] K. Khedo K, Perseedoss R, Mungur A, 2010. A wireless sensor network air pollution monitoring system. *Int J Wirel Mob Networks*, 2(2):31–45.
- [38] Mao X, Miao X, He Y, Li X-Y, Liu Y, 2012. CitySee: Urban CO₂ monitoring with sensors. İçinde: *2012 Proc. IEEE INFOCOM. IEEE, Orlando, FL, USA*, s:1611–1619.
- [39] Suryadevara NK, Mukhopadhyay SC, Kelly SDT, Gill SPS, 2015. WSN-Based Smart Sensors and Actuator for Power Management in Intelligent Buildings. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, 20(2):564–571.
- [40] Gilbert JM, Balouchi F, 2008. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks. *Int J Autom Comput*, 5(4):334–347.
- [41] Vullers R, Schaijk R, Visser H, Penders J, Hoof C, 2010. Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks. *IEEE Solid-State Circuits Mag*, 2(2):29–38.
- [42] CEYHAN E, SAĞIROĞLU Ş, 2013. Kablosuz algılayıcı ağlardagüvenlik sorunlari vealinabilecek önlemler. *Gazi Üniversitesi Politek Derg*, 16(4):155–163.
- [43] Rawat P, Singh KD, Chaouchi H, Bonnin JM, 2014. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *J Supercomput*, 68(1):1–48.
- [44] Asorey-Cacheda R, Garcia-Sanchez A-J, Garcia-Sanchez F, Garcia-Haro J, 2017. A survey

- on non-linear optimization problems in wireless sensor networks. *J Netw Comput Appl*, 82(January):1–20.
- [45] Li M, Li Z, Vasilakos A V., 2013. A Survey on Topology Control in Wireless Sensor Networks: Taxonomy, Comparative Study, and Open Issues. *Proc IEEE*, 101(12):2538–2557.
- [46] Ma Y, Richards M, Ghanem M, Guo Y, Hassard J, 2008. Air pollution monitoring and mining based on sensor grid in London. *Sensors*, 8(6):3601–3623.
- [47] Hong L, Hong F, Guo Z, Yang X, 2008. A TDMA-Based MAC Protocol in Underwater Sensor Networks. İçinde: 2008 4th Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. IEEE, s:1–4.
- [48] Chen Y-S, Lin Y-W, 2013. Mobicast Routing Protocol for Underwater Sensor Networks. *IEEE Sens J*, 13(2):737–749.
- [49] Hengstler S, Prashanth D, Fong S, Aghajan H, 2007. MeshEye: a hybrid-resolution smart camera mote for applications in distributed intelligent surveillance. İçinde: Proc. 6th Int. Conf. Inf. Process. Sens. networks - IPSN '07. ACM Press, New York, New York, USA, s:360.
- [50] Li Z, Wang N, Franzen A, Taher P, Godsey C, Zhang H, Li X, 2014. Practical deployment of an in-field soil property wireless sensor network. *Comput Stand Interfaces*, 36(2):278–287.
- [51] Hasenfratz D, Saukh O, Walser C, Hueglin C, Fierz M, Arn T, Beutel J, Thiele L, 2015. Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor nodes. *Pervasive Mob Comput*, 16(PB):268–285.
- [52] Bhatt R, Datta R, 2012. Redeployment strategies for Wireless Sensor Networks under random node failures and budget constraints. İçinde: 2012 2nd IEEE Int. Conf. Parallel, Distrib. Grid Comput. IEEE, Solan, India, s:767–772.
- [53] Curry RM, Smith JC, 2016. A survey of optimization algorithms for wireless sensor network lifetime maximization. *Comput Ind Eng*, 101(Kasım):145–166.
- [54] Senel F, Younis M, 2011. Relay node placement in structurally damaged wireless sensor

- networks via triangular steiner tree approximation. *Comput Commun*, 34(16):1932–1941.
- [55] Chang Y-C, Sheu J-P, 2009. An energy conservation MAC protocol in wireless sensor networks. *Wirel Pers Commun*, 48(2):261–276.
- [56] Chen Q, Wang K, Ying K, Miao C, Dai G, 2015. An energy efficient mac protocol for linear wsns. *Chinese J Electron*, 24(4):725–728.
- [57] Anchora L, Capone A, Mighali V, Patrono L, Simone F, 2014. A novel mac scheduler to minimize the energy consumption in a wireless sensor network. *Ad Hoc Networks*, 16(Aralık):88–104.
- [58] IEEE 802.15.4 Çalışma Grubu. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [59] ZigBee Alliance. <http://www.zigbee.org/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [60] The Internet Engineering Task Force (IETF). <https://www.ietf.org/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [61] 6LoWPAN. <https://tools.ietf.org/wg/6lowpan/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [62] WirelessHART. <https://fieldcommgroup.org/technologies/hart> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [63] ISA100.11a. <https://isa100wci.org/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [64] The International Society of Automation. <https://www.isa.org/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [65] Ericsson. <https://www.ericsson.com/en> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [66] IBM. <https://www.ibm.com/us-en/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [67] Intel. <https://www.intel.com.tr/content/www/tr/tr/homepage.html> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [68] Nokia. https://www.nokia.com/tr_tr (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [69] Toshiba. <http://www.toshiba.com.tr/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [70] Bisdikian C, 2001. An overview of the Bluetooth wireless technology. *IEEE Commun Mag*,

39(12):86–94.

- [71] Z-Wave Standardı. <http://www.z-wave.com/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [72] Z-Wave Alliance. <http://www.z-wavealliance.com/technology/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [73] Fouladi B, Ghanoun S, 2013. Security Evaluation of the Z-Wave Wireless Protocol. Black hat, 24(2013):1–2.
- [74] ANT technology. <http://www.thisisant.com/technology> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [75] Wavenis Technology. <https://www.elstermetering.com/en/wavenis> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [76] Coronis. <http://www.coronis.com/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [77] Lipošcak Z, Bošković M, 2013. Survey of smart metering communication technologies. IEEE EuroCon 2013, (July):1391–1400.
- [78] Dash7 Alliance. <http://www.dash7.org> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [79] EnOcean. <http://www.enocean.com/en/enocean-wireless-standard/> (Erişim Tarihi:19.05.2018).
- [80] EnOcean Alliance. <https://www.enocean-alliance.org/> (Erişim Tarihi:20.05.2018).
- [81] Mamun Q, 2012. A qualitative comparison of different logical topologies for wireless sensor networks. Sensors, 12(11):14887–14913.
- [82] Shrestha A, Xing L, 2007. A Performance Comparison of Different Topologies for Wireless Sensor Networks. İçinde: 2007 IEEE Conf. Technol. Homel. Secur. IEEE, s:280–285.
- [83] Soylu T, 2012. Kablosuz Algılayıcı Ağların Uygulama Alanları Ve Bir Algılayıcı Düğüm Tasarımı. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya.
- [84] Jawhar I, Mohamed N, Agrawal DP, 2011. Linear wireless sensor networks: classification and applications. J Netw Comput Appl, 34(5):1671–1682.
- [85] Sokullu R, Demir E, 2015. A comparative study of mac protocols for linear wsns. Procedia

Comput Sci, 52(1):492–499.

- [86] Keshtgary M, Deljoo A, 2012. An efficient wireless sensor network for precision agriculture. *Can J Multimed Wirel Networks*, 3(1):1–5.
- [87] Huang J-H, Amjad S, Mishra S, 2005. CenWits: A Sensor-Based Loosely Coupled Search and Rescue System Using Witnesses. İçinde: *Proc. 3rd Int. Conf. Embed. networked Sens. Syst. - SenSys '05*. ACM Press, New York, New York, USA, s:180.
- [88] Jung YJ, Lee YK, Lee DG, Lee Y, Nittel S, Beard K, Nam KW, Ryu KH, 2011. Design of sensor data processing steps in an air pollution monitoring system. *Sensors*, 11(12):11235–11250.
- [89] Zhang P, Sadler CM, Lyon SA, Martonosi M, 2004. Hardware design experiences in ZebraNet. İçinde: *Proc. 2nd Int. Conf. Embed. networked Sens. Syst. - SenSys '04*. ACM Press, New York, New York, USA, s:227.
- [90] Werner-Allen G, Lorincz K, Ruiz M, Marcillo O, Johnson J, Lees J, Welsh M, 2006. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Comput*, 10(2):18–25.
- [91] Saad L Ben, Tourancheau B, 2009. Multiple Mobile Sinks Positioning in Wireless Sensor Networks for Buildings. İçinde: *2009 Third Int. Conf. Sens. Technol. Appl. IEEE, Athens/Glyfada, Greece*, s:264–270.
- [92] Ahmad A, Hanzálek Z, 2017. Distributed real time tdma scheduling algorithm for tree topology wsns. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):5926–5933.
- [93] Ji Peng, Lemin Li, Shizhong Xu, 2007. A novel energy efficient and reliable clustering algorithm in wireless sensor networks. İçinde: *IET Conf. Wireless, Mob. Sens. Networks 2007*. IEE, Shanghai, China, s:596 – 599.
- [94] Tao Zheng, Radhakrishnan S, Sarangan V, 2005. PMAC: An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. İçinde: *19th IEEE Int. Parallel Distrib. Process. Symp. IEEE*, s:237a–237a.
- [95] Stuntebeck E, Pompili D, Melodia T, 2006. Underground Wireless Sensor Networks Using Commodity Terrestrial Motes. *Poster Present IEEE SECON 2006*, :1088–1090.

- [96] Heidemann J, Silva F, Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Ganesan D, 2001. Building efficient wireless sensor networks with low-level naming. İçinde: Proc. eighteenth ACM Symp. Oper. Syst. Princ. - SOSP '01. ACM Press, New York, New York, USA, s:146.
- [97] Zhang W, Liu Y, Das SK, De P, 2008. Secure data aggregation in wireless sensor networks: A watermark based authentication supportive approach. *Pervasive Mob Comput*, 4(5):658–680.
- [98] Liu Y, Dong M, Ota K, Liu A, 2016. Active trust: secure and trustable routing in wireless sensor networks. *IEEE Trans Inf Forensics Secur*, 11(9):2013–2027.
- [99] Saleh I, El-Sayed H, Eltoweissy M, 2006. A Fault Tolerance Management Framework for Wireless Sensor Networks. İçinde: 2006 Innov. Inf. Technol. IEEE, s:1–5.
- [100] Azharuddin M, Jana PK, 2015. A Distributed Algorithm For Energy Efficient And Fault Tolerant Routing In Wireless Sensor Networks. *Wireless Networks*, 21(1):251–267.
- [101] Lu J, Valois F, Barthel D, 2007. Low-energy self-organization scheme for wireless ad hoc sensor networks. İçinde: 2007 Fourth Annu. Conf. Wirel. Demand Netw. Syst. Serv. IEEE, s:138–145.
- [102] Bachir A, Dohler M, Watteyne T, Leung KK, 2010. MAC essentials for wireless sensor networks. *IEEE Commun Surv Tutoriels*, 12(2):222–248.
- [103] Huang P, Xiao L, Soltani S, Mutka MW, Xi N, 2013. The evolution of mac protocols in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Commun Surv Tutoriels*, 15(1):101–120.
- [104] Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F, 2006. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Commun Mag*, 44(4):115–121.
- [105] Rowe A, Mangharam R, Rajkumar R, 2006. RT-Link: A Time-Synchronized Link Protocol for Energy- Constrained Multi-hop Wireless Networks. İçinde: 2006 3rd Annu. IEEE Commun. Soc. Sens. Ad Hoc Commun. Networks. IEEE, s:402–411.
- [106] Anonim, 2018. MICAz Düğüm Özellikleri. http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/6020-0060-04-B_MICAz.pdf

(Erişim Tarihi:12.02.2018).

- [107] Polastre J, Szewczyk R, Culler D, 2005. Telos: enabling ultra-low power wireless research. İçinde: Proc. 4th Int. Symp. Inf. Process. Sens. networks. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Boise, ID, USA, s:511.
- [108] CC2420. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf> (Erişim Tarihi:24.05.2018).
- [109] Nordic Semiconductor, 2008. nRF905 Single chip 433/868/915MHz Transceiver. http://www.nordicsemi.com/jpn/content/download/2452/29528/file/Product_Specification_nRF905_v1.5.pdf (Erişim Tarihi:12.02.2018).
- [110] Nordic Semiconductor, 2011. nRF9E5 433/868/915MHz RF Transceiver with Embedded 8051 Compatible Microcontroller and 4 Input, 10 Bit ADC. https://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2441/29424/file/Product_Specification_nRF9E5_v1.6.pdf (Erişim Tarihi:12.02.2018).
- [111] Zhuo S, Wang Z, Song Y-Q, Wang Z, Almeida L, 2016. A traffic adaptive multi-channel mac protocol with dynamic slot allocation for WSNs. IEEE Trans Mob Comput, 15(7):1600–1613.
- [112] Kim Y, Shin H, Cha H, 2008. Y-MAC: An Energy-Efficient Multi-channel MAC Protocol for Dense Wireless Sensor Networks. İçinde: 2008 Int. Conf. Inf. Process. Sens. Networks (ipsn 2008). IEEE, s:53–63.
- [113] Incel OD, van Hoesel L, Jansen P, Havinga P, 2011. MC-LMAC: A multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 9(1):73–94.
- [114] Chen X, Han P, He Q, Tu S, Chen Z, 2006. A Multi-Channel MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. İçinde: Sixth IEEE Int. Conf. Comput. Inf. Technol. IEEE, s:224–224.
- [115] Tang L, Sun Y, Gurewitz O, Johnson DB, 2011. EM-MAC: A dynamic multichannel energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. İçinde: Proc. Twelfth ACM Int. Symp. Mob. Ad Hoc Netw. Comput. - MobiHoc '11. ACM Press, New York, New York, USA, s:1.
- [116] Yang M, Gao M, Foh CH, Cai J, 2011. DC-MAC : A Data-centric Multi-hop MAC protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks. :491–496.

- [117] Chen M, Qiu M, Liao L, Park J, Ma J, 2011. Distributed multi-hop cooperative communication in dense wireless sensor networks. *J Supercomput*, 56(3):353–369.
- [118] Riverbed Modeler. <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html> (Erişim Tarihi:28.05.2018).
- [119] Hammoodi IS, Stewart BG, Kocian A, McMeekin SG, 2009. A Comprehensive Performance Study of OPNET Modeler for ZigBee Wireless Sensor Networks. İçinde: 2009 Third Int. Conf. Next Gener. Mob. Appl. Serv. Technol. IEEE, s:357–362.
- [120] Chang X, 1999. Network Simulations with OPNET. İçinde: Proc. 31st Conf. Winter Simul. Simul. Phoenix, Arizona, USA, s:666–672.



ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Kahramanmaraş'ta doğdum. İlköğretimi Baydemirli Kamışlı İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu Hürriyet Pansiyonlu İlköğretim Okulu'nda ve liseyi Hoca Ahmet Yesevi Lisesi'nde tamamladım. 2009 yılında kazandığım Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun oldum. 2016'da Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladım. Yabancı dilim İngilizce'dir. Evliyim ve halen Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktayım.

