



**EGE ÜNİVERSİTESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÇİZGİSEL TOPOLOJİDEKİ  
YOĞUN TELSİZ DUYARGA AĞLARI İÇİN  
ORTAM ERİŞİM KONTROLÜ PROTOKOLLERİNİN  
ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE GECİKME YÖNÜNDEN  
İNCELENMESİ**

**Eren DEMİR**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Radosveta Sokullu**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu: 609.02.00**

**Sunuş Tarihi: 05.06.2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**ÇİZGİSEL TOPOLOJİDEKİ  
YOĞUN TELSİZ DUYARGA AĞLARI İÇİN  
ORTAM ERİŞİM KONTROLÜ PROTOKOLLERİNİN  
ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE GECİKME YÖNÜNDEN  
İNCELENMESİ**

**Eren DEMİR**

**Tez Danışmanı: Yrd.Doç. Dr. Radosveta SOKULLU**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu: 609.02.00**

**Sunuş Tarihi: 05/06/2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**



Eren DEMİR tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Çizgisel Topolojideki Yoğun Telsiz Duyarga Ağları İçin Ortam Erişim Kontrolü Protokollerinin Enerji Verimliliği ve Gecikme Yönünden İncelenmesi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 05/06/2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı** : .....

.....

**Raportör Üye** : .....

.....

**Üye** : .....

.....



## EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

### ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çizgisel Topolojideki Yoğun Telsiz Duyarga Ağları İçin Ortam Erişim Kontrolü Protokollerinin Enerji Verimliliği ve Gecikme Yönünden İncelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

05 / 06 / 2014

Eren Demir



**ÖZET****ÇİZGİSEL TOPOLOJİDEKİ YOĞUN TELSİZ  
DUYARGA AĞLARI İÇİN ORTAM ERİŞİM KONTROLÜ  
PROTOKOLLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE  
GECİKME YÖNÜNDEN İNCELENMESİ**

DEMİR, Eren

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Radosveta SOKULLU

Haziran 2014, 103 sayfa

Son yıllarda uygulamalarındaki zenginlik her geçen gün giderek artan Telsiz Duyarga Ağlarında (TDA) daha minyatür ve verimli elektronik bileşenlerin geliştirilmesi, bu ağlar için kullanılan karmaşık ve enerji isteği çok olan uygulamalar ile birlikte, enerji verimliliğine, düşük seviyelerdeki gecikmelere ve uzatılmış ağ yaşam süresine olan gereksinimi daha zorlu bir hale getirmiştir. Bu yüzden araştırma grupları tarafından yeni çözümler geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında öncelikle TDA'ların uygulamaları, mimarisi, işleyiş yapısı, iyi bir başarımla yakalamak için göz önünde bulundurulması gereken kriterler ve karşılaşılabilecek sorunlar dile getirildi. Sonra enerji tüketiminde en büyük etkiye sahip, fiziksel katman ve ağ katmanı ile direkt olarak etkileşimde olan ortam erişim kontrolü katmanında bulunan MAC protokollerinin literatür taraması ve sınıflandırması yapıldı. Enerji tüketimi ve gecikme bakımından daha farklı sorunları olan ve TDA'lar için MAC protokolü tasarımı noktasında bir çok araştırmacı tarafından göz ardı edilen çizgisel topolojinin yine literatürdeki bazı çalışmalarına değinildi. Daha sonra TDA'lar için tasarlanmış olan farklı benzetim ortamları araştırıldı ve içlerinden uygun biri seçilerek model yapısı incelendi.

Deneysel çalışma ve sonuçların analizi kısmında, enerji tüketimi ve gecikme bakımından verimli olduğu düşünülen AREA-MAC protokolünün başarımla değerlendirilmesi için seçilmiş olan benzetim ortamında programlanması yapıldı ve farklı topolojiler altında ağda bulunan düğüm sayıları da artırılarak denemeler yapıldı. Bu çalışmalar sonucunda enerji tüketimi ve gecikme verimliliğini daha da arttıracak çözümler geliştirildi ve önerilerde bulunuldu.

**Anahtar Sözcükler:** Telsiz Duyarga Ağları, MAC katmanı protokolleri, Çizgisel Topoloji, Enerji Verimliliği, Gecikme, Omnet++, Castalia.



**ABSTRACT****ENERGY EFFICIENCY AND DELAY STUDY OF MAC PROTOCOLS  
FOR DENSE WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH LINEAR  
TOPOLOGY**

DEMİR, Eren

MSc in Electrical-Electronics Eng.

Supervisor: Asst. Prof. Dr Radosveta SOKULLU

June 2014, 103 pages

In recent years Wireless Sensor Networks (WSNs) applications have witnessed a continuous growth both in terms of numbers and variety. The development of more miniature and more efficient electronic components triggers the abundance of targeted protocol solutions which in turn require further research, development and also more detailed comparison and taxonomy. On the other hand, all the limitations of WSN – the miniaturization of the devices, the new more sophisticated and energy hungry applications, the requirements for energy efficiency, reduced latency and prolonged network life time, become even more stringent.

In this project we first elaborate on WSN applications, their architecture and operational structure. The factors, which have to be considered in order to achieve optimal performance while designing WSNs and the related problems, are defined. Then, a review of the related literature is presented, which focusses especially on MAC protocols because they have the biggest impact on energy consumption through direct interaction with the physical and the network layer. Furthermore, some specific problems in terms of energy consumption and latency, related to WSN with linear topology are defined since until now they have been overlooked or ignored by many researchers working on MAC protocols for WSNs. Afterwards, different network simulators designed for WSNs are presented and the one suitable for this study is selected and its model structure is examined in depth. Finally, analysis of simulation results under different topological conditions with varying number of nodes are presented for the benchmarking AREA-MAC protocol and are compared with the newly suggested LINE-MAC which is especially designed to provide high energy efficiency and low latency in linear WSN.

As a result in this study we investigate the specifics of linear topology WSN and suggest algorithms for the MAC layer protocol operation that increase energy efficiency and reduce latency.

**Keywords:** WSN, MAC, Linear Topology, Energy Efficiency, Latency.



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince danışmanlığımı yapan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, çalışmalarım sırasında desteğini benden esirgemeyen ve beni sabırla yönlendiren değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Radosveta Sokullu'ya çok teşekkür ederim. Ayrıca çalışmamın çeşitli aşamalarında yardımlarını gördüğüm Dr. Athanassios Boulis ve Yuri Tselishchev'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak ve en önemlisi, göstermiş oldukları sabır ve vermiş oldukları maddi ve manevi destek için sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
TEŞEKKÜR .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxii
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Amaç .....	3
1.2 Tez Ana Bölümleri .....	4
2. TELSİZ DUYARGA AĞLARI .....	6
2.1 TDA Mimarisi İşleyiş ve İletişim .....	6
2.1.1 Düğüm mimarisi .....	6
2.1.2 Ağ mimarisi .....	8
2.2 TDA Uygulamaları .....	9
2.3 TDA Tasarım Hedefleri ve Sorunlar .....	11
2.4 TDA'lar İçin Ortam Erişim Kontrolünün (MAC) Temelleri .....	12
2.4.1 MAC fonksiyonları ve görevleri .....	14

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4.2 MAC sorunları .....	14
2.4.3 Yaygın MAC yaklaşımları .....	19
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	26
3.1 TDA MAC Protokolleri ve Sınıflandırması.....	26
3.1.1 Rekabet tabanlı MAC protokolleri.....	26
3.1.2 Zamanlama tabanlı MAC protokolleri .....	28
3.1.3 Kanal oylama tabanlı MAC protokolleri .....	30
3.1.4 Melez MAC protokolleri.....	33
3.2 Çizgisel TDA Yaklaşımları.....	37
3.2.1 ÇTDA uygulamaları.....	37
3.2.2 ÇTDA sorunlarına yaklaşımlar .....	39
3.3 AREA-MAC .....	43
4. MATERYAL VE YÖNTEM .....	48
4.1 Benzetim Ortamları.....	48
4.1.1 NS2, SensorSim ve NRL .....	48
4.1.2 Omnet++, SenSim, Castalia, Mixim ve PAWiS .....	49
4.1.3 J-Sim .....	50

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.1.4 Sense .....	50
4.2 Omnet++ .....	51
4.2.1 Omnet++ tasarımı .....	52
4.2.2 Model yapısı .....	52
4.2.3 NED dili tasarımı .....	54
4.2.4 Paralel benzetim desteği .....	55
4.3 Castalia Benzetim Aracı .....	55
4.3.1 Genel bakış .....	57
4.3.2 Yapısı .....	57
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	60
5.1 Benzetim Kurulumu .....	60
5.2 Deneysel Bulgular .....	61
5.2.1 Senaryo A – ızgara topolojisi tek kaynak senaryosu .....	62
5.2.2 Senaryo B – ızgara topolojisi çok kaynak senaryosu .....	65
5.2.3 Senaryo C – toplayıcının merkezde olma durumu .....	66
5.2.4 Çizgisel topoloji senaryoları .....	67
5.2.5 Çizgisel topoloji bulguları .....	74

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
5.3 Tespit Edilen Problemler ve Önerilen Çözümler .....	83
5.3.1 Problem 1 .....	83
5.3.2 Önerilen çözüm (Ç1).....	84
5.3.3 Problem 2 .....	85
5.3.4 Önerilen çözüm (Ç2).....	85
5.3.5 Problem 3 .....	85
5.3.6 Önerilen çözüm (Ç3).....	86
5.3.7 Problem 4 .....	87
5.3.8 Önerilen çözüm (Ç4).....	87
5.3.9 Ağ modeli.....	88
5.3.10 Enerji modeli.....	90
5.3.11 LINE-MAC .....	91
5.3.12 Başarım değerlendirmesi.....	93
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	96
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	97
ÖZGEÇMİŞ .....	103

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Tipik bir algılayıcı düğümün yapısı .....	7
2.2 Tipik bir TDA ağ yapısı .....	8
2.3 TDA uygulama alanları .....	10
2.4 Haberleşme protokol yığını .....	12
2.5 TDA içinde görev süresi belirleme.....	19
2.6 TDA içindeki basit bir topoloji kontrolü örneği.....	22
3.1 TDA'ların kanal erişim sınıflandırması.....	26
3.2 TDA'larda kanal oylama metodu .....	30
3.3 IEEE 802.15.4 MAC superframe yapısı.....	35
3.4 Nesnelerin interneti ve TDA – aydınlatma direği .....	38
3.5a Farklı haberleşme mesafesi ve eşit başlangıç enerjisi .....	40
3.5b Farklı başlangıç enerjisi ve eşit haberleşme mesafesi .....	40
3.6 Çizgisel hiyerarşik düğümlerden oluşan boru algılama sistemi .....	41
3.7 WiWi çift yönlü senkronize iletim metodu .....	41
3.8 ACCPAR ağ yapısı.....	42
3.9 AREA-MAC protokolü kullanan bir düğümün akış diyagramı .....	46
3.10 AREA-MAC ızgara topolojisi .....	47

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Omnet++ model yapısı .....	53
4.2 Omnet++ paralel benzetim özü lojik mimarisi .....	55
4.3 Castalia içerisindeki modüller ve bağlantıları .....	57
4.4 Düğüm bileşik modülü.....	58
5.1 Izgara topolojisi için tek kaynak ve çok kaynak senaryoları .....	62
5.2 Gönderilen veri paketi sayısı .....	63
5.3 Her düğümün almış olduğu veri paketleri .....	64
5.4 Harcanan enerji .....	64
5.5 Alınan veri paketleri sayısı .....	65
5.6 Uygulama katmanında üretilen paketler .....	66
5.7 Alınan veri paketleri sayısı .....	66
5.8 Uygulama seviyesindeki gecikme .....	67
5.9 İletimde geçirilen süre .....	68
5.10 Harcanan enerji .....	68
5.11 Alınan veri paketi sayısı .....	68
5.12 Uygulama seviyesindeki gecikme .....	69
5.13 Artan düğüm sayıları ile birlikte PDR yüzdesi .....	69

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.14 Düğüm sayısı ve PDR yüzdesi .....	70
5.15 Karşılaştırmalı PDR yüzdesi .....	70
5.16 N0 yönlendirme senaryosu .....	71
5.17 N0 yönlendirme kaydırılmış toplayıcı düğüm senaryosu.....	72
5.18 N1 yönlendirme senaryosu .....	72
5.19 N1&N2 yönlendirme senaryosu .....	73
5.20 Yönlendirici düğümler ve senaryo 1 .....	73
5.21 Yönlendirici düğümler ve senaryo 2 .....	73
5.22 Yönlendirici düğümler ve senaryo 3 .....	74
5.23 Karşılaştırmalı enerji tüketimi.....	75
5.24 Karşılaştırmalı gecikme.....	78
5.25 Karşılaştırmalı alınan paketler.....	79
5.26 Karşılaştırmalı enerji tüketimi.....	80
5.27 Karşılaştırmalı gecikme.....	81
5.28 Çizgisel topoloji için karşılaştırmalı PDR yüzdeleri .....	82
5.29 Problem 1 ACK paketleri çarpışması .....	83
5.30 VERİ_İÇİN_BEKLE zamanlayıcısı bitince uyku durumuna girme .....	84

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.31 Fazladan işaret paketi gönderimi ve artan gecikme.....	86
5.32 Uyku zamanının işaret ve “preACK” paketlerine göre belirlenmesi.....	87
5.33 İşaret ve “preACK” paketleri içinde yayınlanan bilgiye göre uyanma .	88
5.34 N adet düğümden oluşan çoklu atlamalı çizgisel ağ.....	88
5.36 LINE-MAC protokolü çalışma yapısı ve akış şeması .....	92
5.36a AREA-MAC ızgara topolojisi için PDR başarımı .....	94
5.36b Önerilen protokolün ve AREA-MAC’ın PDR karşılaştırması .....	94
5.37 LINE-MAC ve AREA-MAC’ın enerji verimi karşılaştırması .....	95
5.38 LINE-MAC ve AREA-MAC’ın gecikme karşılaştırması .....	95

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 Benzetim parametreleri.....	60

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
<i>bc</i>	<i>Hamle sayısı (burst count)</i>
<i>D</i>	<i>Mesafe (distance)</i>
<i>Gr</i>	<i>Alıcı kazancı (receiver gain)</i>
<i>Gt</i>	<i>Verici kazancı (transmitter gain)</i>
<i>Pr</i>	<i>Alıcı gücü (receiver power)</i>
<i>Pt</i>	<i>Verici gücü (transmitter power)</i>
<i>Tl</i>	<i>Dinleme süresi (listen time)</i>
<i>Ts</i>	<i>Uyku süresi (sleep time)</i>
<i>Ttxrx</i>	<i>Gönderim durumundan alım durumuna geçiş süresi (transition time from transmit to receive state)</i>
<i>Trtxx</i>	<i>Alım durumundan gönderim durumuna geçiş süresi (transition time from receive to transmit state)</i>
<i>Tw</i>	<i>Bekleme süresi (wait time)</i>
$\lambda$	<i>Dalga boyu (wavelength)</i>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ACK	Alındı (acknowledgement)
ADC	Analog'dan sayısala dönüştürücü (analog to digital converter)
ADV	Duyuru (advertisement)
AREA-MAC	Gerçek zamanlı ve enerji verimli ortam erişimi denetleme (a real time and energy efficient medium access control)
BAN	Vücut alan ağı (body area network)
BE	Geri çekilme üsteli (backoff exponential)
BER	Bit hata oranı (bit error rate)
B-MAC	Berkeley ortam erişimi denetimi (berkeley MAC)
BO	İşaret rütbesi (beacon order)
CAP	Rekabetli erişim periyodu (contention access period)
CCA	Açık kanal değerlendirme (clear channel assesment)
CDMA	Kod bölmeli çoklu erişim (code division multiple access)
CFP	Rekabetten muaf periyot (contention free period)
CPU	Merkezi işleme birimi (central processing unit)
CSMA-CA	Taşıyıcı duyulu çoklu erişim – çarpışmadan kaçınma (carrier sense multiple access collision avoidance)
CTS	Göndermek için açık (clear to send)
CW	Rekabet penceresi (contention window)
ÇTDA	Çizgisel telsiz duyurga ağı (Linear Wireless Sensor Networks)

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
FDMA	Frekans bölmeli çoklu erişim (frequency division multiple access)
FRTS	Gelecekte gönderime açık (future ready to send)
FSK	Frekans kaydırmalı anahtarlama (frequency shift keying)
GNU	Genel kamu lisansı (general public license)
GPS	Küresel konumlandırma sistemi (global positioning system)
GTS	Garantili zaman dilimi (guaranteed time slot)
HRT	Zor gerçek zamanlı (hard real time)
IDE	Bütünleşmiş geliştirme ortamı (integrated development environment)
IoT	Nesnelerin interneti (internet of things)
IP	İnternet protokolü (internet protocol)
ISM	Endüstriyel, bilimsel, tıbbi (industrial scientific medical)
LEACH	Düşük enerjili adaptif kümelenme hiyerarşisi (low energy adaptive clustering hierarchy)
LINE-MAC	Çizgisel topolojide enerji verimli ortam erişimi denetimi (linear topology energy efficient medium access control)
LPL	Düşük güçte dinleme (low power listening)
MAC	Ortam erişim kontrolü (medium access control)
MCU	Mikro denetleme birimi (micro controller unit)
MF	Hareketlilik yapı çalışması (mobility framework)
NB	Geri çekilme sayısı (number of backoff)

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
NED	Ağ tanımı (network description)
NS2	Ağ benzetim aracı 2 (network simulator 2)
PAN	Kişisel alan ağı (personal area network)
PDR	Paket teslim oranı (packet delivery ratio)
PHY	Fiziksel (pyhsical)
PSK	Faz kaymalı anahtarlama (phase shift keying)
PTDMA	Olasılıklı zaman bölmeli çoklu erişim (probabilistic time division multiple access)
QoS	Hizmet kalitesi (quality of service)
REQ	İstek (request)
RSS	Alınan sinyal gücü (received signal strength)
RSSI	Alınan sinyal gücü göstergesi (receive signal strength indicator)
RTS	Göndermeye hazır (ready to send)
SD	Süper çerçeve süresi (superframe duration)
SNR	Sinyal gürültü oranı (signal to noise ratio)
SO	Süper çerçeve rütbesi (superframe order)
SRT	Yumuşak gerçek zamanlı (soft real time)
TDA	Telsiz duyurga ağı (Wireless Sensor Networks)
TDMA	Zaman bölmeli çoklu erişim (time division multiple access)

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
WLAN	Telsiz yerel alan ağı (wireless local area network)
XML	Genişletilebilir biçimlendirme dili (extensible markup language)

## 1 GİRİŞ

Son yıllarda telsiz duyurğa ağları (TDA) araştırmacılar tarafından oldukça önem kazanmıştır. Algılayıcı düğümleri genellikle sınırlı batarya gücüyle çalışan cihazlar olduklarından onların enerji tüketimlerini düşürmek öncelikli araştırma konusudur.

Bir telsiz duyurğa ağı, çevredeki sıcaklık, nem, basınç, sismik titreşimler gibi bir coğrafyadaki fiziksel olayları görüntüleyen birçok algılayıcı düğümünden oluşur. Tipik bir algılayıcı düğümü üç temel bileşenden oluşur: Bir algılama nitesi, bir veri işleme ve bellek nitesi, bir de kablosuz haberleşme sisteminden oluşur. Buna ek olarak programlanan görevi yerine getirmek için gerekli olan enerjiyi sağlayacak olan bir güç kaynağı vardır.

Gelişiminin başlangıcı her ne kadar askeri uygulamalara dayansa da günümüzde, endüstriyel ve sivil uygulama alanlarında da kullanılan TDA'lar genel olarak iki büyük gruba ayrılırlar: *gözleme (monitoring)* ve *olay tespiti (event detection)* (Akyildiz I. et al., 2002). İletişim, hesaplama, istihbarat, keşif ve hedef tespit sistemlerinin ayrılmaz birer parçası olan TDA'lar aynı zamanda olası kaza, yangın ve felaketlerin farkedilmesi gibi gözetim uygulamalarında gerekli mdahelenin yapılmasını mümkün kılar. Tipik bir TDA kablosuz bir ortam aracılığı ile birbirine bağlanmış ve birbirleriyle bilgi alışverişi yapan yüzlerce hatta binlerce algılayıcı dğmnnden oluşur (Bhattacharyya D. et al., 2010). Donanım ve kablosuz sistemlerdeki gelişmeler düşük maliyetli, düşük güç tüketimli, çok işlevli minyatür algılama aygıtlarının üretilmesine olanak sağlamıştır. TDA insan bakımına gereksinim duymayan fiziksel olarak ayrılmış pek çok düğüm içerebilir. Düğüm bazında bakıldığında tek bir düğümün kapsamı kk de olsa, yoğun olarak dağıtılmış düğümler eř zamanlı ve iş birliği prensipleriyle çalışabilir, böylece tüm ağın kapsamı genişletilmiş olur (Wei Y. et al., 2002). Ayrıca algılayıcı düğümleri yaşam tehlikesinin olduğu alanlara bırakılabilir ve dört mevsim işlem yapabilir. Bu yüzden bu düğümler algılama görevlerini her an yerine getirebilir. TDA işleyiş ve iletişimini veriyi toplayarak, işleyerek, çözümleyerek ve yayarak yerine getirir. Veriler genel olarak tek bir toplayıcı düğüme gönderildiği gibi birden çok toplayıcı düğümüne de gönderilebilir. Böylece ağ, etkin ve hızlı bir şekilde zeki bir ortam oluşmasında rol oynamış olur.

Son senelerde teknolojiye ortaya atılan en çarpıcı devrimlerden biriside “Internet of Things” yani “Nesnelerin İnterneti” dir. Nesnelerin interneti ile yeni teknolojilerin hayatımızın her alanına girmesi mümkün olacaktır. Bu devrimin temelinde algılayıcılar vardır (Ersöz A, 2013). Fiziksel dünyadaki hava sıcaklığı, nem, tansiyon, kalp atışı, bir sokaktan geçen araba sayısı basit algılayıcılar ile ölçülebilir ve sayısallaştırılarak bilgisayarlarımıza aktarılabilir. Son zamanlarda tasarlanan algılayıcılar küçük ve ucuzdur. Bunların birbirleri ile konuşabilmeleri için gerekli olan standartlar üzerinde çalışılmakta. İçinde algılayıcıları barındırması ve genel olarak nesnelerin kablosuz olarak iletişime geçmeleri bu teknolojinin TDA’lar ile birebir ilişkili olduğu söylenebilir. Nesnelerin interneti hızlı bir şekilde insan hayatına girmeye hazırlanmakta. Bazı şehirlerde, algılayıcılardan gelen veri boş park yerlerini belirliyor ve sürücülere bildiriyor. Akıllı evlerden gelen verilerin analizi içeride hırsız olup olmadığına karar verebiliyor. Seralardaki topraktaki nem miktarını ölçen algılayıcılar sulama veya bitki üzerinde yapılacak olan işlemi belirleyebiliyor. Deri altına yerleştirilerek yaşamsal verileri sürekli takip eden çipler hastayı ilaç alması için uyarıyor. Tek başına yaşayan yaşlılar düşüklerinde algılayıcılar yakınlarına haber verebiliyor. İşletmeler, depo ve tanklarda azalan ürünleri, cihazların arıza olasılıklarını fark ederek önlem alabiliyor. Bu tez çalışmasında “Smart Santander” projesindeki bir IoT uygulamasından ve Bolonya Üniversitesi’nin bu konudaki çalışmalarından fikir alındı. Bu yüzden bu tez çalışması aynı zamanda IoT konsepti ile yakından ilişkilidir.

Bir TDA’da bulunan düğümlerin koordineli olarak yapılması gereken işi uzun süre devamlı olarak yerine getirebilmeleri için enerjinin mümkün olduğu kadar verimli bir biçimde kullanılması esastır. Enerjiyi etkin bir biçimde kullanabilmek için birbirinden farklı ortam erişim protokolleri tasarlanmış ve TDA’da kullanılmak üzere uygulanmaya başlanmıştır. Haberleşmede, veri iletişim paketlerinin hangi aşamalardan geçeceğini tanımlayan sistemin bir parçası olan ortam erişim kontrolü (MAC) katmanı, sensör düğümlerinin kablosuz kanala erişimlerini sağlamaktan sorumludur ve enerjiyi etkin bir biçimde kullanmaya olanak sağlayacak bir biçimde tasarlanmaları gerekmektedir. MAC protokolleri kablosuz kanal üzerinde kontrol sağladıkları için sensör düğümlerinin toplam enerji tüketim ihtiyaçlarına ciddi bir biçimde katkıda bulunur. Veri iletişimi sırasında sensör radyolarının sürekli aktif kalmalarını sağlamaktansa, sensör radyolarının düşük güç tüketimi moduna geçmesini ve ortama periyodik erişim sağlamasına izin verirler. MAC katmanındaki işlemleri dikkate alarak TDA’larda

en çok enerji tüketimine sebep olan durumları genel olarak şöyle sıralayabiliriz (Ahmad M. et al., 2011):

**Çarpışma:** En büyük enerji tüketim sebebidir. İki paket çarpıştığında bozulur ve iptal edilir bu da aynı anda paket taşımadan kaynaklanır. Tekrar taşımamanın başlaması için fazladan enerji tüketilir.

**Boşta Dinleme:** Hiçbir veri alınıp gönderilmediğinde sensörler sürekli açık durumdadır bu da enerji tüketimini artırır. Bazı protokollerde her zaman kanallar dinlenir, bazılarında periyodik bazılarında ise gerektiğinde sensörler kapatılır.

**Fazladan Duyma:** Sensörler kendisine ait olmayan başka sensörlere gönderilmiş bilgileri alabilirler bu da enerji israfı açısından büyük bir sorundur.

**Kontrol Paketini Fazladan Duyma:** Kontrol paketini yollamak, almak, dinlemek de enerji sarfına neden olur. Kontrol paketleri, bilginin tamamını kaplamasından dolayı verimli iletişimin kalitesini düşürür.

MAC protokolleri çalışma prensibine göre iki ana gruba ayrılır; zaman tabanlı protokoller (schedule based): katı zaman eşlemesi gereksiniminin dışında çarpışmaları önler, gönderme ve dinleme periyotlarını bir zaman çizelgesine oturtarak fazladan duyma, boşta dinleme gibi gereksiz enerji tüketimi yapılan durumları ortadan kaldırır. Diğer grup ise rekabet tabanlı protokoller (contention based): daha serbest ve rahat bir zaman eşlemesi sağlar. Ağ'a yeni düğümlerin dahil edilmesi veya bazı düğümlerin tamamen ölmesi gibi durumlardan dolayı meydana gelen topoloji değişimlerine kolay adapte olur. Dezavantajı ise çarpışmaların yüksek olmasıdır (Yadav R. et al., 2008).

## 1.1 Amaç

Son yıllarda TDA uygulamaları çok yönlü bir hal alırken aynı zamanda teknolojiye gelişmeler ile algılayıcı düğümlerin maliyetleri de azalmaktadır. Şimdiye kadar literatürde yer alan çalışmaların bir çoğu özellikle enerji tüketimi ve gecikme üzerinde büyük etkisi olan ortam erişim kontrol katmanı üzerinde

yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların farklı trafik senaryoları, ölçekleme ve topolojiler altında gerçekleşen denemeleri ile elde edilen sonuçlar her uygulamada aynı sonuçları verememektedir. Çünkü bu algoritmalar genel olarak belirli bir uygulamaya özgü olarak tasarlanmışlardır. MAC katmanının oldukça parametrik olması ve direkt olarak fiziksel katman ile etkileşim halinde olması gerçek dünyanın dinamikmine, örneğin trafik yükü ve topoloji değişimleri gibi durumlara karşı adaptif protokoller geliştirilmesini gerektirir. Çoğu araştırmacılar bir MAC protokolü geliştirirken hem benzetim hem de gerçek deney boyutunda, düğümlerin ızgara (grid) veya rastgele (random) yerleştirilmiş topolojilerini kullanırlar. Fakat çizgisel topoloji çoğu zaman göz ardı edilir. Bir çok protokol farklı senaryolar altında iyi sonuçlar verebilirken çizgisel topoloji altında kötü sonuçlar verebilir. Çünkü çizgisel topoloji, düğümlerin pozisyonları gereği bir çok engeli beraberinde getirir. Bu yüzden bu tez çalışmasında enerji tüketimi ve gecikmenin optimize edilmesi gerektiği çizgisel topolojiye sahip yoğun TDA'ların özel durumları üzerine odaklanıldı. Bu tez çalışmasının amacı enerji tüketimi ve gecikmeye neden olan farklı faktörleri araştırmak ve bu durumlara uygun olarak optimize edilmiş bir MAC protokolü önermektir.

## 1.2 Tezin Ana Bölümleri

*Birinci bölümde*, telsiz duyurga ağlarının tanımı, gelişim süreci, bazı kullanım alanları ve önemi anlatılarak giriş yapıldı ve bu tez çalışmasının ana amacından bahsedildi.

*İkinci bölümde*, telsiz duyurga ağlarının genel olarak mimarisi, işleyiş yapısı, günümüzdeki uygulamalarına yer verilmiştir. Bunun yanı sıra bir TDA tasarımında göz önünde bulundurulması gereken faktörler ve karşılaşılabilecek olan sorunlar ve bu sorunların en fazla görüldüğü ortam erişim kontrolü katmanına bir giriş yapılmıştır.

*Üçüncü bölümde*, literatürde TDA'lar için tasarlanmış olan farklı MAC yaklaşımları ve çizgisel topoloji ile ilgili yapılan önemli çalışmalar özetlenmiştir.

*Dördüncü bölümde*, TDA tasarımında kullanılmak üzere geliştirilmiş olan farklı benzetim ortamlarının özellikleri incelenmiş ve bunlardan bu tez çalışması için uygun olan bir tanesi seçilerek detaylı bir biçimde anlatılmıştır.

*Beşinci bölümde*, çizgisel topolojideki TDA'lar için yeni bir MAC protokolü önerilmiş ve yeni geliştirilen bu protokolün TDA'lar için tasarlanmış olan bir benzetim ortamında farklı topolojiler ve düğüm sayıları altında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalarına ve elde edilen bulgularına yer verilmiştir. Ayrıca enerji tüketimi ve gecikme bakımından verimliliği arttırmak için farklı bir yaklaşım önerilmiş ve denemeler yapılmıştır. Mevcut protokol ve önerilen yaklaşım ile yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen bulgular karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

*Altıncı bölümde*, gelecekte yapılacak olan çalışmalar için öneriler verilmiş ve geliştirilebilir yanları belirtilmiştir.

## 2 TELSİZ DUYARGA AĞLARI

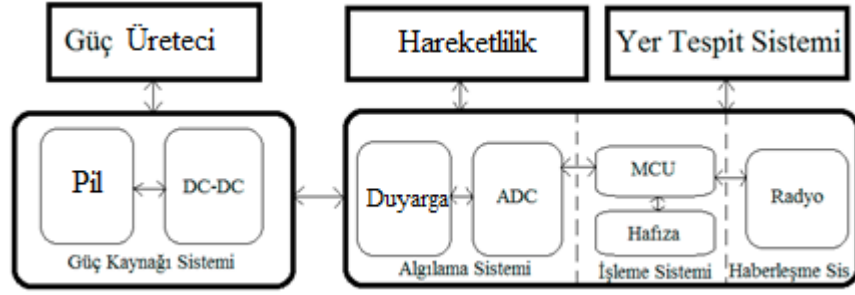
Telsiz Duyarga Ağları son zamanlarda akademi ve sanayi tarafından muazzam bir ilgi görmektedir. TDA'lar ile ilgili yeni yönler keşfetmek için araştırma faaliyetlerinin önemli bir çoğunluğu komponent, sistem ve uygulama düzeyi konuları üzerinde durmakta. Bu ilgi alanı işlenebilir bir form içinde olayları algılayarak, yakalayarak ve dönüştürerek yaşam biçimimizde, davranışlarımızda ve fiziksel çevre ile etkileşimimizde köklü bir değişiklik yapmak için ortaya çıkmıştır. Bu bölüm öncelikle TDA'ların bazı belirgin özelliklerini ve sonrasında onların ortam erişimi protokollerinin bazı tasarım yönlerini özetlemektedir.

### 2.1 TDA Mimarisi İşleyiş ve İletişim

TDA'lar genellikle belirli bir coğrafi bölge içerisine veya çok yakınına dağıtılmış olan ve bir veya birden fazla parametre ile ilgili veriyi algılama, toplama, yayma görevlerini yerine getiren çok çeşitli algılayıcı düğümlerden oluşur. TDA mimarisini “*düğüm mimarisi*” ve “*ağ mimarisi*” olarak ikiye ayırabiliriz. Enerji verimliliği hem düğüm hemde ağ seviyelerinde elde edilebilir (Raghunatan V. et al., 2002). Düğüm seviyesinde radyo yönetimi, modülasyon, hesaplama, paket yönlendirme ve farklı katmanlar arasındaki etkileşimin iyi bir şekilde tasarlanması enerji verimliliği sağlayabilir. Ağ seviyesinde ise enerji verimliliği sağlamak için topoloji yönetimi, trafik yönetimi, algılayıcı düğümler arasındaki daha iyi işbirliği ve iletişim, azaltılmış fazladan duyma (overhead) kullanılabilir. Bu mimarilerin her ikisinde aşağıda açıklanmıştır.

#### 2.1.1 Düğüm Mimarisi

Bir algılayıcı düğüm genel olarak 5 temel bileşenden oluşur; *bir mikroişlemci birimi, bir radyo birimi, bir hafıza birimi, bir giriş/çıkış birimi ve bir güç birimi.* (Bkz. Şekil 2.1)



Şekil 2.1 Tipik bir algılayıcı düğümün yapısı.

Düşük güç MCU birimi genel olarak düğümde, görevleri yerine getirme, veriyi işleme ve diğer komponentlerin foksiyonelliğini kontrol etmesini sağlayan bir mikrokontroler ve bir mikroişlemciden oluşur. Algılayıcı düğüm genel olarak hafıza birimi ile entegre edilmiş kendine yeterli olan ve uygun maliyetli bir mikrokontroler ile birlikte gelir. Daha iyi bir güç yönetimi içinse MCU birimi, aktif, rolanti (boş) ve uyku gibi çalışma modlarını destekleyebilir.

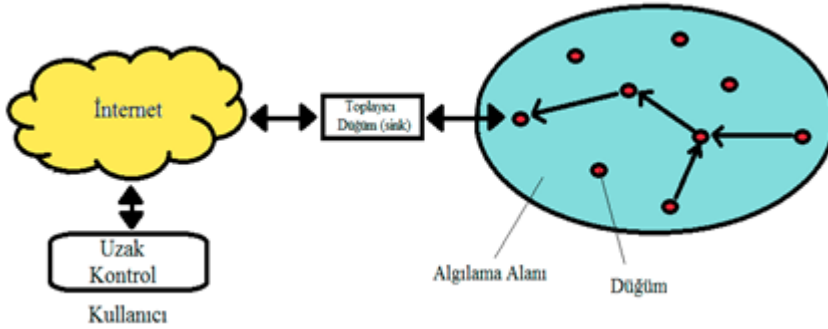
Radyo alıcı-vericisi bir anten, frekans sentezleyici, osilatör, demodülatör, yükseltici ve radyo kanalı üzerinden diğer düğümlerle haberleşebilmek için gerekli olan diğer devreleri içerir. MCU birimi gibi radyo birimide verici, alıcı, rolanti(boş) ve uyku modları gibi farklı modlarda çalışabilir. Radyo birimi özellikle algılayıcı düğümün enerji verimli operasyonları için önemli bir komponentdir. Güç tüketimi, taşıyıcı frekans, veri hızı, modülasyon, kodlama şemaları, transmisyon gücü, SNR ve RSSI değerleri, hata ayıklama ve daha bir çok parametre ile ilgili karar aşamasında yardımcı olur (Karl and Willig, 2006). Genel olarak kullanılan radyo birimleri ise Chipcon (Chipcon Radios, 2013), Mica serileri tarafından kullanılan MPR2400 (MPR2400 Radio, 2013) ve RFM TR serisi (RFM TR Radio, 2013) radyolardır.

Güç birimi algılayıcı düğümün diğer tüm komponentlerini çalıştırmak için gerekli olan batarya gücünü sağlar. Bu birimin sınırlı enerji kapasitesinden dolayı her komponentin enerji verimli operasyonlar gerçekleştirmesi gerekmektedir. Giriş/Çıkış arayüz birimi herhangi bir fiziksel fenomeni gözlemleyen ve gözlemlenen bu fenomene bağlı bir trafik üreten çok çeşitli uygulamaya özel algılayıcı düğümlerinin entegrasyonunu sağlar. Bu birim ayrıca düğümler tarafından üretilen analog sinyalleri işlemci birimine göndermeden önce sayısala çeviren bir ADC çeviricisine de sahip olabilir.

Algılayıcı düğümler ayrıca bazı ekstra komponentlere sahip olabilirler. Bazı lokalizasyon uygulamaları için fiziksel lokasyonun bilinmesi gerektiğinden algılayıcı düğüm, üzerine yerleştirilmiş bir GPS birimine sahip olabilir. Hareketli ve mekanik bağlantılı uygulamalar içinse bir motor veya bir mobilizer, algılayıcı düğümleri harekete geçirmek için üzerlerine yerleştirilebilir. Daha fazla güç kaynağına sahip olabilmek için düğümler üzerlerinde solar, termal, kinetik veya titreşim enerjisini kullanabilen ekstra güç üreteçleri taşıyabilirler. Fakat bu komponentler bazı uygulamalar için düğümlerin ağırlıkları ve boyutları göz önünde bulundurulduğunda yararlı olamayabilirler.

### 2.1.2 Ağ Mimarisi

Bir TDA oluşturmak için bir çok düğüm belirli bir alan içerisinde birbirleri ile haberleşirler ve işbirliği yaparlar. Bu düğümlerin her birinin veriyi üretme ve genellikle çok atlamalı (multi-hop) yollar üzerinden veriyi toplayıcı düğüme yönlendirme gibi iki sorumluluğu vardır. (Bkz. Şekil 2.2)



Şekil 2.2 Tipik bir TDA ağ yapısı

Toplayıcı düğüm son kullanıcı ile bir ağ geçidi (gateway) yardımı ile internet veya herhangi bir haberleşme ağını kullanarak haberleşebilir. Böylece yayılan veri kaydedilebilir, değiştirilebilir veya analiz edilebilir. Algılama alanı içerisinde arazinin fiziksel yapısına, büyüklüğüne ve alandaki trafik yüküne göre birden fazla toplayıcı düğüm olabilir. Ağ geçidi ayrıca farklı görevler gerçekleştiren algılayıcı düğümlerden oluşan birden fazla TDA'ya bağlı olabilir.

TDA ağ mimarisi algılayıcı düğümlerin birbirleri ile nasıl haberleşeceklerine bağlı olarak *düz mimari* ve *hiyerarşik mimari* olarakta ikiye ayrılabilir (Zheng and Jamalipour, 2009). Düz mimaride her algılayıcı düğüm birbiri ile emsaldir ve bir algılama görevinde aynı kapasiteye sahiptir. Algılayıcı düğümler çoklu atlamalı rotalar oluşturarak diğer emsalleri üzerinden veriyi toplayıcı düğüme yönlendirirler. Hiyerarşik mimaride ise düğümler kendi aralarında küme oluştururlar ve her biri bir küme başkanının kontrolü altındadır. Küme üyeleri verilerini küme başkanına gönderirler ve sonrasında veriler tekli atlamalı veya çoklu atlamalı tarzda toplayıcı düğüme iletirler. Küme başkanı diğer düğümlerden farklı yeteneklere sahip olabilir. Bahsedilen bu her iki alt mimarinin kendine göre avantajları olduğu gibi dezavantajları da olabilir.

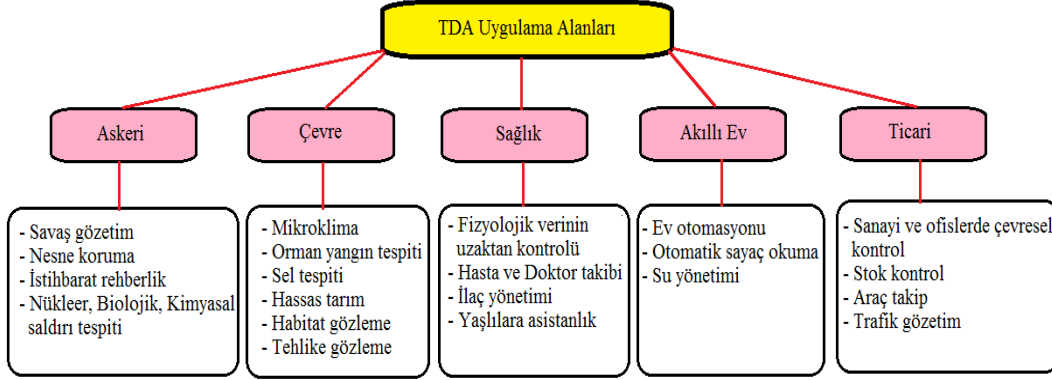
## 2.2 TDA Uygulamaları

TDA'lar sismik, düşük örnekleme hızlı manyetik, termal, görsel, infrared, akustik ve radar gibi çok değişik tipte duyargalardan oluşabilmektedir. Bu duyargalar, gözlenen nesne ve olayla ilgili, aşağıdakilere benzer özelliklere yönelik algılamalar yapabilirler (GenetLab, 2005).

- Isı
- Nem
- Araç hareketi
- Işık durumu
- Basınç
- Ses seviyesi
- Toprak ve Sıvı özellikleri
- Nesnelerin mevcudiyetleri
- Nesnelerin hız, yön ve hacim gibi özellikleri

Duyargalar sürekli algılama, olay tespiti, olay teşhisi, yer algılaması ve tetikleyicilerin (bir donanımı çalıştıran araç) kontrolü gibi maksatlarla kullanılabilirler. Mikro algılama ve duyargaların telsiz ortamlar üzerinden haberleşmesi konsepti bir çok yeni uygulama alanı doğurmaktadır. Genel olarak askeri, çevre, sağlık, akıllı ev, otomasyon, endüstriyel ve güvenlikle ilgili alanlarda kullanılsada, etki alanı bunlarla sınırlı değildir (Dargie and Poellabauer,

2010). TDA örnek uygulamaları aşağıda bir kaç şekilde sıralanmıştır. (Bkz. Şekil 2.3)



Şekil 2.3 TDA uygulama alanları

- Habitat (bitki, hayvan) izleme ve çevresel gözlem, hava durumu tahminleme sistemleri
- Sağlık uygulamaları (hasta, doktor takibi, hasta fizyolojik psikolojik durum izleme, vb.)
- Enerji tedarik ve aktarma sistemleri (üretim, dağıtım, tüketim yapılarında)
- Ev ve ofis uygulamaları (zeki anaokulu)
- Uzak yerlerin, konumların çözümlenmesi (tornado hareketi, orman yangın tespiti, vb.)
- Geniş bir metropol alanındaki taksilere sensörler yerleştirilerek trafiğin gözlenmesi ve bu gözlemlere dayanarak rotaların etkin planlanması
- Bir park yerindeki boş ve dolu alanların sensör ağlarıyla belirlenmesi
- Kablosuz gözetim sensör ağlarıyla alışveriş merkezi, araba garajı veya benzeri tesislerde güvenlik sağlama
- Düşman hareketlerini belirleme, bulmak ve izlemek için askeri sensör ağlar
- Terörist saldırılara karşı tetikliliği arttıran sensör ağlar vererek eyleme geçmelerini sağlayabilir veya komutanına danışabilir. Karar eylemlerinde (saldırı gibi) sadece ana karargah bilgiye dayanarak bir karar verebilir.
- Ormanların yangın için gözlenmesi ve nesli tükenmekte olan hayvanların izlenmesi (Dolay, 2013)

Şekil 2.3 TDA uygulamalarının ne kadar çeşitli ve geniş bir skalaya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu çeşitlilik zaman içerisinde teknolojinin ilerlemesiyle birlikte giderek artmaktadır.

### 2.3 TDA Tasarım Hedefleri ve Sorunlar

Diğer kablosuz ağlarda olduğu gibi TDA’larda da kablosuz ortamı algılayıcı düğümler kendi aralarında paylaşırlar. TDA’lar benzerlerine göre gözle görülür bir biçimde ayırt edilebilecek şekilde çok çeşitli hedeflere, sorunlara ve kısıtlamalara tabidirler (Stankovic John A. et al., 2003). Duyarga ağlarının bazı temel tasarım hedefleri kısaca aşağıda özetlenmiştir (Zheng and Jamalipor, 2009). Ayrıca uygulamaya özel doğasından dolayı TDA’ların tüm tasarım hedeflerini tek bir örnek altında uygulamak gerekmez.

- Zorlu ve tehlikeli ortamlarda yoğun (dense) dağıtım için **küçük düğüm boyutu**.
- Yoğun ağların toplam maliyetini düşürmek için **düşük maliyetli düğüm**.
- Ağ yaşam süresini arttırmak için **düşük güç tüketimi**.
- TDA’ları bir çok uygulamaya uygun olabilmesi için **uygulama çeşitliliği**.
- Mühendislik içermeyen yerleştirmeler, topoloji durumları ve hatta değişken trafik altında düğümlerin kendilerini otonom olarak organize edebilmeleri için düğümlerin kendi aralarında **öz yapılandırma** oluşturma kabiliyeti.
- Farklı uygulamalar ve koşullar altında farklı ağ büyüklüklerini desteklemek için **ölçeklenebilirlik**.
- Uygulamanın gereksinimlerine göre gecikme ve güvenilirlik açısından **QoS odaklı** davranma.
- Yeni algoritmaların çalıştırabilmesi için **esneklik**.
- Sonradan yapılan topoloji ve değişken trafik durumlarına karşı **uyum sağlama**.
- Kötü ve değişken topoloji koşulları altında veriyi verimli bir biçimde gönderebilmek için **güvenilirlik**.

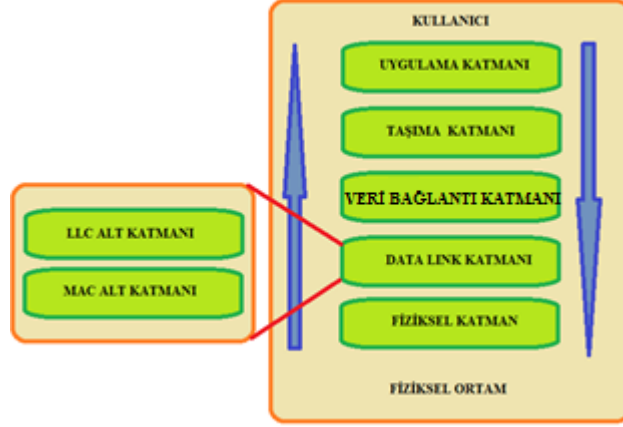
- Donanım bozulduğunda veya bir süreliğine bloke olduğunda bir ortamda algılayıcı düğümlerin otomatik yenileme işlemlerini aktif hale getirebilmek ve ağı kesintisiz çalışabilmesini sağlamak için ***hata toleransı***.
- Veri akışını birden fazladan – teke ( many-to-one) örneğin kaynak düğümlerden toplayıcı düğüme doğru akışını desteklemek için ***yakınsama yeteneği***.

Yukarıda bahsedilen tüm bu hedefler, düğümlerin sınırlı miktardaki kaynakları göz önünde bulundurulduğunda TDA tasarımında çok çeşitli sorunlar yaratabilmektedir. Algılama, işleme ve haberleşme fonksiyonelliği bir algılayıcı düğümden bir araya getirildiğinde bir çok karmaşıklık beraberinde getirir. Yalnızca bir kaç saatlik yaşam süresine sahip olan düğümleri yıllarca çalışabilen düğümler haline getirebilmek enerji verimli tekniklerin çok çeşitli yinelenmelerini gerektirir. Algılayıcı düğümlerin boyutlarını daraltmak küçük boyutlarda alıcı-vericiler gerektirir. Tüm sistem gereksinimlerini tek bir cihaz kapasitesine indirgemek basit bir iş değildir. Dağınık ve rastgele yerleştirme düğümleri erişimsiz, dinamik ve güvenilir olmayan bir ortamda kendi kendilerini organize etmeye zorlar. TDA'ların gerçek dünya ile direkt etkileşimi ve onların uygulamaya özel doğası, düğümlerin uyum içerisinde cevap vermesini gerektirir. Sonuç olarak kapasite, gereksinim, sınırlamalar ve kısıtlı olan durumları anlamak ve analiz edebilmek için ayrıntılı bir bilgi gerekir.

Bir sonraki kısımda böylesi ağlar için bir ortam erişim kontrolü protokolü tasarlanmasının önemi, sorunları ve genel yaklaşımları değerlendirilmiştir.

## **2.4 TDA'lar İçin Ortam Erişim Kontrolünün (MAC) Temelleri**

MAC alt katmanı haberleşme protokolünün içerisinde data link katmanının bir parçasıdır. (Bkz. Şekil 2.4) Ortamı paylaşan bir çok aygıt için kanal erişim mekanizması sağlar. Bir çok aygıt tarafından paylaşılan kablosuz bir ortamda bir aygıt iletime geçtiğinde onun iletim kapsamında olan diğer tüm aygıtlar iletilen sinyali alırlar. Bir noktaya iki veya daha fazla aygıtın aynı anda



Şekil 2.4 Haberleşme protokol yığını.

iletme geçmesi durumu “paket çarpışması” olarak bilinir ve oluşan bu girişim paketlerin alıcı tarafında alınamamasına neden olur. Algılayıcı düğümler genellikle kablosuz ortam üzerinde dağınık, yoğun ve sürekli değişen bir alan içerisinde çoklu-atlamalı yollar üzerinden haberleşirler. Bir MAC protokolü paylaşılan bir ortam için haberleşme trafiğini yönetir ve algılayıcı düğümlerin birbirleri ile haberleşebilmeleri için temel bir altyapı oluşturur.

Herhangi bir insan müdahalesine gerek kalmadan ve güç kaynağı değişimi olmaksızın ağ yaşam süresini uzatmak için haberleşme yığınındaki tüm katmanlarda verimli protokoller tasarlanması genel bir gereksinimdir. Fakat asıl kazanç data link katmanında elde edilebilir çünkü MAC protokolü direkt olarak enerjisi sınırlı düğümlerin en çok güç tüketimine neden olan haberleşme aktivitelerini kontrol eder. Böylece MAC protokolü düğümlerin radyoyu nasıl devreye sokacaklarını, ortamı nasıl paylaşacaklarını, ilişkili ve yayınsal (broadcasted) ortamlarda çarpışmalardan nasıl kaçınılacağını, talepte bulunan düğüme en kısa zamanda nasıl cevap verileceğini ve daha uzun süre nasıl hayatta kalacağını belirleyerek önemli tasarım hedeflerine tatmin edici bir biçimde katkı sağlar. Bu yüzden MAC protokolleri için etkili çözümler tasarlamak bir çok araştırmacı için her zaman önemli bir noktadır ve hep öyle olacaktır.

### 2.4.1 MAC Fonksiyonları ve Görevleri

Genel olarak herhangi bir MAC protokolünün temel görevi algılayıcı düğümlerin bireysel olarak iyi bir işlem hacmine (throughput), verimliliğe ve daha iyi bir kanal kullanıma sahip olabilmeleri için paylaşılan ortama adil bir biçimde erişimlerini düzenlemektir (Labrador and Wightman, 2009). Fakat sınırlı kaynaklar, ihtiyaç fazlası yerleştirme ve düğümlerin çekişmeden çok birbirleri arasında işbirliği içerisinde olmaları gözle görülür bir biçimde TDA'lar için gerekli olan bir MAC protokolünün sorumluluklarını değiştirmiştir. Ayrıca TDA'ların MAC protokolünün çalışma şeklini kolaylaştırıcı bazı özellikleri vardır. Örneğin, TDA içindeki düğümler genellikle çok küçük paketler gönderirler ve kanalı anlık, periyodik veya önemli bir olay gerçekleştiği anda kullanırlar. Düğüm bazında adil olmak TDA'lar için diğer ağlardaki kadar önemli değildir çünkü TDA içindeki düğümler genel bir amacı yerine getirmek için işbirliği içerisinde çalışırlar. TDA'larda veri akışı genel olarak tek yönlüdür. Örneğin, kaynak düğümlerinden toplayıcı düğüme doğru ve son kullanıcı genel olarak bireysel işlem hacmi (throughput) yerine toplanan bilgiye odaklanır.

Diğer bir taraftan TDA'lar için MAC protokollerinin bazı ekstra sorumlulukları vardır. Bunlardan ilki ve en önemlisi enerji korunumudur. Dağıtık bir ağın düğümleri uzun yaşam süresi ile bakıma gerek kalmaksızın çok çeşitli operasyonlar yürütmek istediği sürece, MAC protokolünün durum ne olursa olsun güç korunumu mekanizmasına sahip olması gerekir. Enerji verimliliği ile birlikte uygulama gereksinimleri, operasyonların zamanında sağlanması (gecikme), trafiğe adaptif olma, topoloji koşulları, ölçeklenebilirlik, senkronize olmamış operasyonlar için destek ve çapraz katman haberleşme (cross-layering) ile diğer katmanlarla etkileşim gibi durumlar bir MAC protokolü tasarlamada önemli rol oynayan faktörlerdir. Ayrıca bir TDA için ideal bir MAC protokolü öz stabilizasyon, zarif adaptasyon ve kabul edilebilir bir iletim oranı (delivery ratio), düşük fazladan duyma (low overhead), düşük hata oranı gibi faktörleri göz önünde bulundurmalıdır.

### 2.4.2 MAC Sorunları

TDA'lar için bir MAC protokolü tasarımı kısıtlı enerji miktarı, düşük iletim menzili ve düğümlerin kompakt donanım tasarımlarından dolayı çok kompleks bir

görevdir. Bu faktörlerin yanında TDA'ların olay veya görev temelli ağ davranışı ve uygulama çeşitliliği geleneksel TDA'lar için genel olmayan çok özgün MAC planları yapılmasını gerektirir. Ayrıca kablosuz yayılım ortamından dolayı TDA'lar enterferans, sinyal zayıflaması, yol kaybı, sönümlenme, gürültü ve yüksek hata oranları gibi kablosuz haberleşme için bilinen tüm sorunları miras alır (Garg, 2007). MAC protokolü fiziksel katmanın hemen üzerinde olduğundan ve ortam üzerindeki tüm kontrolü elinde barındırdığından yukarıda bahsedilen tüm faktörlerden doğrudan etkilenir. Ayrıca ISM bandının bir çok algılayıcı düğüm tarafından lisanssız olarak çok sık kullanılması ve algılama uygulamaları bu etkileri dahada kötüleştirmektedir.

Enerji verimli operasyonlara duyulan ihtiyaç TDA'lar için genellikle enerji ve gecikme, paket resepsiyonu, işlem hacmi, adil olma, ölçeklenebilirlik gibi diğer herhangi bir parametre arasında bir ödünleşime neden olur. Yani bir parametreden verimlilik elde ederken bir diğerinden kötü sonuçlar elde edilebilir. Bu durumda kablosuz haberleşme için mevcut geleneksel mimari ve protokoller TDA'lar için uygun değildir. Onlar genellikle yüksek veri hızları hedeflerler ve enerji tüketimi ve diğer TDA'ya özgü bazı parametrelere daha az önem verirler. TDA'ların temel üç sorumluluğu *algılama, işleme ve haberleşmedir*. Bunların her biri ayrı ayrı düğümlerin algılayıcıları, mikroişlemci birimleri ve radyo birimleri tarafından gerçekleştirilir ve en son belirtilen haberleşme sorumluluğu bunlar arasında en çok güç tüketendir (Akyildiz and Vuran, 2010). Algılama için harcanan enerji her ne kadar kullanılan algılayıcının türüne, ADC biriminin çalışma yapısına, uygulamanın doğasına ve olay tespitinin karmaşıklığına bağlı olsada haberleşmek için gerekli olan enerjiden daha azdır. Sıcaklık, ışık, nem, sismik gibi bir çok *pasif algılayıcı*, sonar ranger, mobilizer ve pan-zoom-tilt özellikleri olan kamera algılayıcıları gibi *aktif algılayıcılar* ile kıyaslandığında ihmal edilebilecek düzeyde güç tüketirler (Raghunathan V. et al., 2002).

Benzer bir biçimde bir veriyi işlemek için gerekli olan güç yine haberleşme için gerekli olandan daha azdır. Yapılan bir çalışmada araştırmacılar 1kb büyüklüğündeki bir paketin 100m'lik bir mesafeye iletimi için gerekli olan enerjinin tipik bir mikroişlemcinin yaklaşık 3 milyon talimatı çalıştırmak için gerekli olan enerjiye eşit olduğu sonucuna varmışlardır (Pottie and Kaiser, 2000). Haberleşme gücünün işlem gücüne oranı Rockwell WIN algılayıcıları için 1500 ile 2700 ve 1 bitlik bir veriyi iletmek için ise bu oranın 1000 ile 10000 arasında olduğu tespit edilmiştir (Raghunathan V. et al., 2002).

Bir düğümün haberleşmede harcadığı güç, modülasyon tipi, veri hızı, iletim gücü, radyonun operasyonel modları ve bu modları arasındaki anahtarlama frekansı gibi bir çok faktöre bağlıdır. Aynı zamanda bir MAC protokolü TDA'lar için aşağıda sıralanan ve haberleşme ile ilişkili olan enerji tüketimi nedenlerinden sorumlu sayılabilir (Bachir A. et al., 2010).

- **Boşta Dinleme:** TDA içinde bir düğüm genel olarak ne zaman mesajın alıcısı olacağını bilemez ve radyosunu algılamaya hazır durumda tutar. Dolayısıyla bu da neredeyse algılamada harcanan enerji kadar enerji tüketilmesine neden olur. Düşük trafikli uygulamalarda bu durum enerji tüketimine neden olan en büyük nedenlerden biri olarak kabul edilir. Dikkat edilmesi gereken bir husus ise bir MAC protokolünün kanalın mevcut durumunu algılamak için ihtiyaç duyduğu taşıyıcı algılamanın (carrier sensing) boşta dinlemenin bir parçası olmadığıdır.
- **Çarpışma:** İki paketin çarpışması istenmeyen bir durumdur çünkü paketin gönderilmesi ve alınması için harcanan enerji paketlerin uygun bir form içinde alınması ile sonuçlanmaz. Bir çarpışma genel olarak tekrar iletimler (retransmission) ortaya çıkarır ve ekstra paketlerin iletiminde ve alımında daha fazla enerji harcanmasına sebep olur. Kablosuz ortamın doğası çarpışma tespitini engeller ve MAC protokolünün sorumluluğunu artırır. Bir taraftan yüksek yoğunlukta yerleştirilmiş düğümler iletim gücünden ödün vermeden artan ağ bağlantısı sağlarken diğer yandan ortam için rekabet eden düğümlerin sayısı arttığından çarpışma olasılıklarının artmasına sebep olur. Çarpışmalar neticesinde ortaya çıkan paket kayıpları ise uygulamanın gerçekliğini düşürür. Çarpışmaların azaltılması için önerilen bir çok yaklaşım vardır ve üçüncü bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.
- **Fazladan Duyma:** Fazladan duyma kablosuz yayın ortamı üzerinde kendisine hitaben gönderilmemiş olan bir paketi algılayıp işleme geçirdiğinde gerçekleşir. Yoğun ağlarda ve ağır trafik koşullarında bu durum ciddi sorunlara yol açabilir. Yinede bazı MAC protokolleri ayrıca kanal, mevcut iletim ve hat durumu hakkında önemli bir bilgi

çıkarmı yapmak için fazladan duymadan yararlanır (Ye W. et al., 2004).

- **Kontrol Paketini Fazladan Duyma:** Kontrol paketlerinin sayısındaki ve büyüklüğündeki artış fazladan duymaya ve özellikle her mesajın içerisinde yalnızca bir kaç baytlık gerçek verinin iletiildiği bir TDA için gereksiz enerji tüketimine neden olur. Bu tarz kontrol sinyalleri aynı zamanda kanal kapasitesinde düşmesine neden olurlar. Düğümler “gizli ve uç terminal” ve boşa dinleme, çarpışma gibi problemleri yenmek için RTS/CTS/ACK, zaman eşlemesi veya uzun işaret (preamble) gibi kontrol paketleri kullanırlar. Bu durum üçüncü bölümde özetlenmiştir. Sonuç olarak gerekli olan kontrol paketlerini minimal düzeyde tutabilmek için dengeli bir yaklaşım gereklidir.
- **Fazladan Yayma:** Fazladan yayma veya sağrlık hedef düğümün hazır olmadığı bir anda mesajın iletimi ile meydana gelir.
- **Karmaşıklık:** Hesaplama açısından masraflı olan algoritmalar düğümlerin uyku modunda geçirdikleri sürenin azalmasına neden olabilir. Bu karmaşıklık uygulama için uygun olan işleme süresini ve protokolün diğer fonksiyonelliklerini kısıtlayabilir. Basit bir MAC algoritması daha karmaşık olana göre daha fazla enerji korunumu sağlayabilir. Fakat basit bir algoritma ise trafik adaptasyonu, topoloji koşulları, kümeleşme, veri toplama gibi kompleks fonksiyonlar sağlamak için yeterli olmayabilir.

Görev süresi belirleme (duty cycling), algılayıcı düğümlerin radyolarını zamanın büyük bir kısmında düşük uyku gücü moduna geçirmeleri ve onların kanal aktivitesini kontrol etmeleri için kısa aralıklar şeklinde uyandırmalarıdır. Bu durum TDA'lardaki enerji ile ilişkili olan bir çok faktör ile ayrıca bağlantılıdır. Fakat düşük görev süresi belirleme, yani düğümlerin zamanlarının çoğunu uykuda geçirmeleri ağda yüksek gecikmelere ve düşük işlem hacmine neden olur. Ayrıca radyonun farklı modlarda çok sık geçiş yapması da enerji tüketimini azaltmaktan çok artmasına neden olabilir. Bu yüzden uygun bir görev süresi belirlemede derin bir düşünce oluşturulması gerekmektedir.

Enerji verimliliğinden ayrı olarak bir çok TDA uygulaması sınırlı miktarda gecikmeye ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel dağıtık sistemlerin aksine TDA'lar için gecikme güvencesi vermek daha zorlu bir iştir çünkü düğümler fiziksel olayların tahmin edilemeyen bir tarzda farklı trafik ve gecikme gereksinimleri altında gerçek dünya ile direkt olarak etkileşim halindedir. Görev süresi belirleme, dinamik topoloji, sınırlı hafıza ve hesaplama gücü ayrıca ödün verebileceğimiz tasarım alanını sınırlamaktadır.

MAC protokolü ayrıca deterministik bir gecikme ve daha iyi bir enerji verimliliği sağlamak için düğümlerin radyolarını planlanan belirli zamanlarda uyandırarak düğümlerin haberleşmelerini koordine edebilir. Fakat bu merkezi planlama düğümler arasında sistem çapında bir zaman eşlemesi gerektirir ve bu da yoğun ağlarda yüksek karmaşıklık, kontrol paketi fazlalığı, uzun kuyruk gecikmeleri, ciddi ölçekleme ve adaptasyon gibi problemleri beraberinde getirir. Enerji tüketimi ve gecikmeyi azaltmak için MAC protokolü kendini değişen ağ topolojisi, büyüklüğü ve trafik karakteristikleri ile birlikte adapte edebilir. Fakat bu tür bir adaptasyon genellikle bir düğüm için işlem yükü ve hafıza kullanımını arttırarak karmaşıklığa neden olur. Adaptasyon ayrıca sistem başarımını etkileyen faktörlerden biridir. Çapraz katmanlama, örneğin diğer katmanlar ile etkileşim bir MAC protokolüne bir operasyon için gerekli olan kaynakları koordine etmeye ve sınırlamaya imkan sunabilir (Kumar P. et al., 2010). Örneğin, etkili bir yönlendirme bilgisi MAC protokolüne enerji ve zaman tüketimini azaltmada yardımcı olabilir ve MAC katmanı uygulama katmanı tarafından belirlenen farklı mesaj türlerine öncelik verebilir. MAC ve fiziksel katman arasındaki güçlü bir birliktelik ise MAC protokolüne radyonun mevcut durumu, kanal ve diğer bir çok parametre hakkında bilgi sahibi olmasını sağlar. Çapraz katmanlamanın çok çeşitli pozitif yönleri olduğu gibi özellikle kaynakları kısıtlı olan algılayıcı düğümler için dezavantajları da oluşabilir (Kredo and Mohapatra, 2007). Sonuç olarak TDA'lar için MAC protokolü genel olarak birbirleri ile zıt olan çok çeşitli faktörler arasında ödünleşmeye neden olur ve genel olarak enerji verimliliği bu ödünleşmenin içerisinde.

Ayrıca uygun donanım seçimi MAC protokolünün başarımı ve neticesinde tüm sistem üzerinde bir etkisi vardır. Çoklu-kanal donanımı desteği, uygun hafıza büyüklüğünü dengeleme, uyanma radyosununun kullanımı ve paket veya bit temelli radyonun seçimi önemli faktörlerdir (Bachir A. et al., 2010).

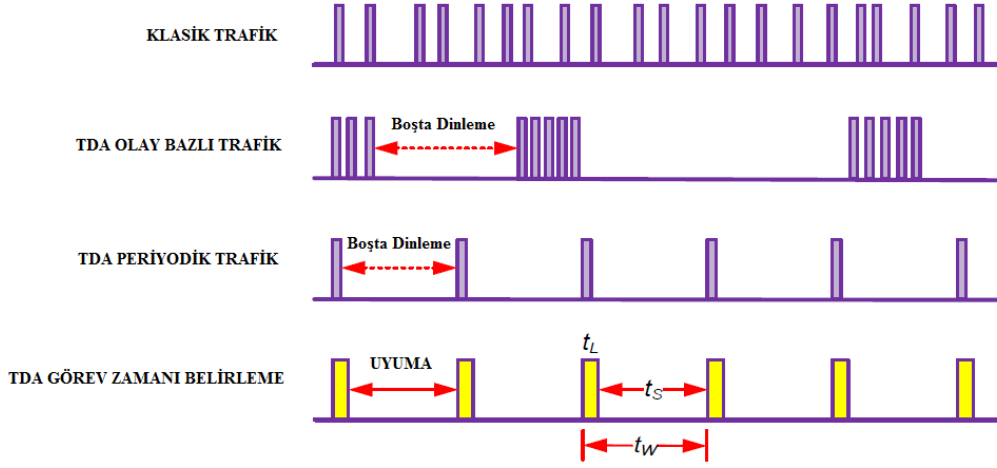
### 2.4.3 Yaygın MAC Yaklaşımları

TDA'lar için evrensel çapta en iyi denilebilecek bir MAC protokolü yoktur çünkü tasarım seçimi temel olarak uygulamanın doğası üzerine kuruludur (Karl and Willig, 2006). MAC protokolleri tasarımında en yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar aşağıda özetlenmiştir.

#### 2.4.3.1 Görev Süresi Belirleme (Duty Cycling Determination)

TDA'ların uygulama alanının çeşitli ve yaygın olmasıyla birlikte en çok görülen uygulamaları çevre gözleme ve gözetimdir. Bu tarz uygulamalarda düğümler tarafından üretilen ve işlenen trafik iki ayrı sınıfa ayrılabilir; *periyodik trafik (schedule based)* ve *olay-temelli trafik (event based)*. Periyodik trafik sınıfı çevreyi genellikle düzenli bir aralıkla dinler ve fiziksel bir nesne için bir veya daha fazla parametre ile alakalı bilgiyi toplar ve toplayıcı düğüme rapor eder (Tolle G. et al., 2005). Olay temelli trafik sınıfında ise düğümler periyodik gözleme mekanizmasını takip etmezler fakat algılama alanında önemli bir olay gerçekleştiği zaman toplayıcı düğüme rapor ederler veya bir alarm sesi çıkarırlar (Bhuse and Gupta, 2005). Bu sınıftaki düğümler zamanın çoğunda boşta bekleyebilirler fakat bir olay olduğunda bu kısa süre zarfı içerisinde peş peşe (burst) paketler üretirler.

Geleneksel kablolu veya kablosuz ağlar ile kıyaslandığında bir TDA genel olarak daha az veri trafiği üretir ve çok küçük veri paketleri gönderir. Bu yüzden algılayıcı düğümler genel olarak boşta beklerler veya veri üretmek için periyodik dönüşümlerini beklerler veya birşeyler olabilmesi ihtimaline karşı boş kanalı dinlerler. Düğümlerin radyosunun boşta dinleme süresince, neredeyse veri paketlerini algılama kadar enerji harcadıklarından radyoyu düşük güç uykü moduna almak ve periyodik olarak kısa süreler için uyanması farkedilir bir biçimde düğümlere enerji korunumu sağlar. Dahası diğer bir çok düğüm bir düğümün iletim menziline düşebilir ve genellikle komşu düğümlerin var olması durumunda radyonun kapatılması arzu edilen bir durumdur ve böylece çarpışmalar, fazladan duymalar ve fazlalıklardan kurtulmuş olunur. Tüm bu durumlar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Bkz. Şekil 2.5).



Şekil 2.5 TDA içinde görev süresi belirleme

Düğüm görev süresi belirlemede boş kanalı sabit bir şekilde dinlemek yerine radyolarını uyku ve dinleme modları arasında periyodik olarak değiştirirler. Radyosunu  $T_s$  kadarlık bir süre için *uyku periyodunda* tutar ve ortamı dinlemek için  $T_L$  kadarlık bir süre için radyosunu uyandırır ve *dinleme periyoduna* girer. Uyku periyodu ve dinleme periyodunun toplamı ise *uyanma periyodu* olarak adlandırılır. Ayrıca dinleme periyodunun uyanma periyoduna oranı  $T_L / T_W$  ise *görev süresi* (duty cycle) olarak adlandırılır.

Görev süresi belirleme yoğun bir TDA'nın boşta dinleme ve düğümler arasındaki fazladan duyma durumlarını azaltarak sistem yaşam süresinde gözle görülebilir bir artış sağlar. Fakat bu avantajlar bazı diğer olumsuzluklarda sahip olabilir. Alıcı vericinin genel olarak zamanın büyük bir kısmını uyku durumunda geçirmesi son olarak uyanma periyotlarında düğümler arasında gözle görülür bir rekabete yol açacaktır. Bu durum eninde sonunda çarpışmalara, düşük işlem hacmine ve özellikle ağır trafik yükü durumlarında yüksek ağ gecikmelerine yol açar. Burada önemli olan nokta bir uygulama için görev süresini belirlemede optimum bir seçim yapmaktır.

Uzun bir uyuma periyodu seçmek her bir atlama başına (per-hop) gecikmenin kayda değer bir biçimde artmasına neden olur çünkü gönderici düğümün neredeyse ortalama olarak alıcı düğümün paketleri alabilmesi için onun uyku periyodunun yarısı kadar beklemek zorundadır. Çok kısa uyuma periyodu ise radyonun çok sık bir biçimde açılıp kapanmasına neden olur ve bu da görev süresini belirlemenin faydalarından uzaklaşmak demektir çünkü radyo

anahtarlama da anlık bir durum değildir ve ekstra enerji tüketimine yol açar (Akyildiz and Vuran, 2010). Bundan dolayı arzu edilen sistem başarımına ulaşmak için optimum bir görev süresi belirlemek kritik bir adımdır.

### **2.4.3.2 Gecikme (Latency)**

TDA'lar için MAC protokolleri tasarlanırken zamanlama faktörü genellikle araştırmacılar tarafından ihmal edilir. Şimdiye kadar çok çeşitli alanlardaki artan TDA uygulamaları birlikte zamanlama ile ilişkili yeni QoS konseptleri teklif etmek kaçınılmazdır. Genellikle zamanlama ile ilişkili olan uygulamalar Sert Gerçek Zaman (Hard-Real-Time / HRT) ve Yumuşak Gerçek Zaman (Soft-Real-Time / SRT) olarak kategorize edilebilir (Li Y. et al., 2007). Gelen mesajların sıkı bir mühlete tabi oldukları HRT uygulamalarında uçtan uca (end-to-end) deterministik bir gecikme gerekir. Alternatif olarakda toleranslı ve probabilistik bir gecikme garantisi SRT uygulamaları için desteklenebilir.

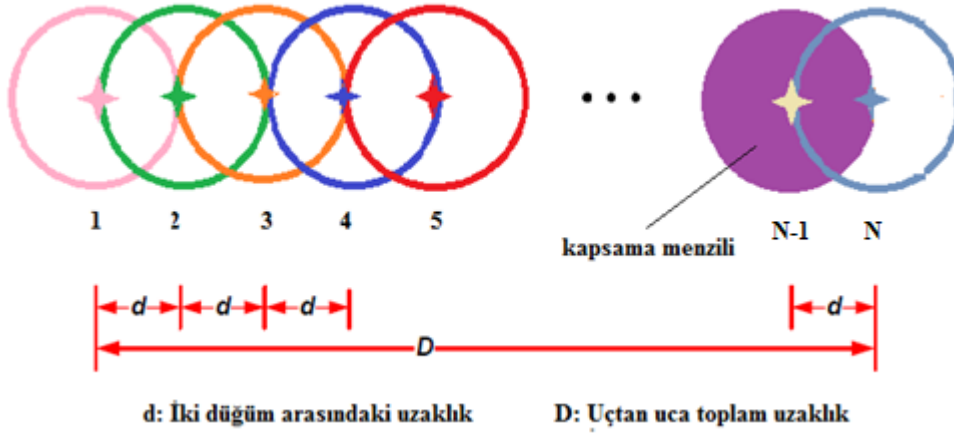
Sınırlı kaynaklar, düşük düğüm güvenilirliği, dinamik ağ topolojisi ve fiziksel dünya ile direkt etkileşim TDA'lar içindeki HRT uygulamalarını oldukça zorlaştırır. Üçüncü bölümde bahsedilen bir zamanlama mekanizması ile sınırlı ve tahmin edilebilen bir gecikmeye erişilebilir (Rajendran V. et al., 2003). Fakat bu durumda yanında diğer bazı dezavantajları getirmektedir çünkü bir düğüm ortama erişebilmek için kendisine tahsis edilen zaman dilimine kadar beklemek zorunda olduğundan ortalama kuyruk ve erişim gecikmeleri oldukça yüksektir. Sonuç olarak probabilistik temelli bir SRT uygulaması TDA ile ilişkili bir çok uygulama için daha kabul edilebilir.

### **2.4.3.3 Topoloji Kontrolü**

Topoloji kontrolünün asıl hedefi enerji korunumu sağlamak ve bağlanabilirlik ve kapsama gibi önemli ağ karakteristiklerini korumak amacıyla düğümlerin iletim menzilini dinamik olarak değiştirerek azaltılmış bir topoloji düzeni inşa etmektir (Santi, 2005). İletim enerjisinin haberleşme enerjisinin genellikle tamamına hakim olduğu ve iletim mesafesi ile doğru orantılı olarak artması nedeniyle, topoloji kontrolü paketlerin çoklu atlamalı bir yol üzerinden gitmesini sağlayarak enerji tüketimini azaltabilir. Topoloji kontrolü fonksiyonu

genellikle MAC ve ağ katmanları arasına yerleştirilmiştir ve her ikisi ile etkileşir. Topoloji yapımı ayrıca gereksiz olan düğümleri kapatılarak veya kesin koordinasyon fonksiyonlarını devralarak dinamik olarak çalışılabilir (Karl and Willig, 2006). Topoloji kontrol mekanizması çarpışmaları, rekabeti ve uç terminal sorunlarını azaltarak enerji tüketimini azaltır. Fakat boşta dinleme, toplam gecikme, karmaşıklık ve artan paket kaybı olasılıkları bu mekanizma ile birlikte temel sorunlar olarak kalır.

Enerji tüketimi bir düğümün iletim menzilini küçülterek azaltılabilir (Bkz. Şekil 2.6). Böylece paketler tek bir atlama yerine çoklu atlama üzerinden iletebilir (Labrador and Wightman, 2009). Şekil 2.6’da çizgisel bir TDA örneği verilmiştir ve ağda bulunan her düğüm birbirlerinden eşit olarak  $d$  uzaklığı kadar ayrılmıştır. Eğer 1 numaralı düğüm doğrudan  $D$  kadarlık bir mesafede olan  $N$  numaralı düğüme paket iletmek isterse ve yol kaybı katsayısının 2 olduğu farzedilirse,  $D$  kadarlık mesafede algılanan güç Friss serbest-uzay yayılım modeli ile formül 2.1’deki gibi hesaplanabilir.



Şekil 2.6 TDA içindeki basit bir topoloji kontrolü örneği.

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left( \frac{\lambda}{4 \times \pi \times D} \right)^2 \quad (2.1)$$

Yukarıdaki formülde  $P_t$  iletilen sinyalin çıkış gücünü,  $G_t$  ve  $G_r$  vericinin ve alıcının anten kazançlarını,  $D$  1 numaralı düğüm ile  $N$  numaralı düğüm arasındaki mesafeyi ve  $\lambda$  ise dalga boyunu temsil eder. Denklem ayrıca formül 2.2’deki gibi yazılabilir:

$$Pr = C \times Pt/D^2 \quad , \quad C = (Gt \times Gr \times \lambda^2) / (4 \times \pi)^2 \quad (2.2)$$

Yukarıdaki formül 2.2’de C alıcı-vericiye özgü sabit bir parametredir. Eğer C değerini 1 kabul edersek, 1 numaralı düğümün D uzaklığındaki bir düğüme bir sinyal iletmek için ihtiyacı olan iletim enerjisi formül 2.3’deki gibi olur.

$$Pt = Pr \times D^2 \quad (2.3)$$

Alternatif olarak eğer 1 numaralı düğüm bir paketi N numaralı düğüme komşu düğümleri üzerinden iletmek isterse iletmek istediği düğüm sayısının bir eksiği kadar atlama yapmak zorundadır. Bu atlama sayısına h diyelim ve d komşu iki düğüm arasındaki mesafe olsun. Böylece her bir düğüm için komşu düğüme erişmesi için gerekli olan enerji formül 2.4’te gösterildiği gibi olur.

$$Pt = Pr \times d^2 \quad (2.4)$$

Bundan dolayı, çoklu atlamalı haberleşme ile elde edilen enerji korunumu:

$$Ps = (Pr \times D^2) / (h \times Pr \times d^2)$$

$$Ps = (Pr \times (h \times d)^2) / (h \times Pr \times d^2)$$

$$Ps = h \quad (2.5)$$

Formül 2.5 daha fazla atlama olduğunda daha fazla enerji korunumu sağlanabildiğini ispatlamaktadır. Fakat bu sadece düğümlerin iletim enerjisini göz önünde bulunduran çok basitleştirilmiş bir örnektir. Çoklu atlamalı haberleşme ile ortaya çıkan işlem enerjisi, bit hata oranı (BER) ve değişken iletim mesafeleri ile birlikte paket kaybı olasılığı gibi faktörler ayrıca göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü örneğin atlama sayısı arttıkça her bir düğümün yönlendirilen paketi işleme sokmak için harcadıkları enerjinin toplamı, sadece tek bir atlamada yalnızca iki düğümün paketi işlemek için harcadıkları enerjiden daha fazladır.

#### **2.4.3.4 Zamanlama ve Zaman Eşlemesi**

Birçok MAC protokolü düğümlerin zaman bakımından senkronize olduklarını ve radyolarını uyanma ve uyku modları arasında anahtarlama sağlayan sabit bir planı takip ettiklerini farzeder (Ye W. et al., 2004). Benzer şekilde (Rajendran V. et al., 2003)'de kullanılan planlar senkronize olmuş düğümlerin rekabete gerek duymaksızın yalnızca kendilerine tahsis edilen zaman dilimlerinde erişim sağlayabileceklerini ve böylece çarpışma, boşa dinleme ve fazladan duymanın azaltılabileceğini farzeder. Fakat gerçek uygulamalarda böylesine dinamik ve kaynakları sınırlı olan bir TDA için bu tarz bir zaman eşlemesi bir çok fazladan duymaya neden olduğundan ve ekstra donanım gerektirdiğinden ulaşılması oldukça zordur. Eğer tüm düğümler aynı anda uyanırlarsa çarpışmalar ve tekrar iletimler dramatik bir biçimde artar ve zaman dilimi tahsis planları ile birlikte ağdaki gecikmede artar. Bundan dolayı, düğümler için senkronize edilmemiş ve ratgele bir uyuma / uyanma planı kullanmak daha akılcı olur.

#### **2.4.3.5 Çapraz Katmanlama**

Genel olarak TDA'lar için bir çok MAC protokolü başarımı yalnızca ilgili oldukları katmanda arttırmaya çalışan genenekselsel katmanlanmış yapıyı takip eder (Polastre J. et al., 2004). Düğümlerin çok sınırlı kaynakları ile birlikte, farklı katmanlar arasında birleştirilmiş bir optimizasyon elde edebilmek için bir çapraz katman tasarımı (cross layer design) eğilimi ortaya çıkmaktadır. Katmanlı ağların aksine TDA'lar sınırlı miktarda enerjileri, hafızaları ve işlem kapasiteleri yüzünden yalıtılmış bir katman yapısı sağlayamazlar. Dahası uygulama-farkındalığı olan haberleşme biçimi ve düşük güçlü radyo durumları TDA'lar için çapraz katmanlama mimarisi tasarımına motive etmektedir. Bazı araştırmalar çapraz katmanlama kullanarak TDA başarımında bir artış sağlandığını beyan etmektedir (Kumar P. et al., 2010). Ancak dinamik ve kaynakları sınırlı olan TDA'lara birleştirilmiş bir çapraz katmanlama haberleşme mimarisi sağlamak için hala yapılacak çok iş vardır.

### 2.4.3.6 Diğer Teknikler

TDA'lar için genel MAC tasarımlarının yanında literatürde bazı alışılmadık yaklaşımlar için çalışılmıştır. Bazı araştırmacılar her düğüm için *veri kanalı* ve *kontrol kanalı* gibi iki farklı kanal olması gerektiğini önermişlerdir (Shurgers C. et al., 2002). Veri kanalı veri veya bir ACK paketinin ortaya çıkması durumu haricinde sürekli uyku durumundayken kontrol kanalı ise yalnızca kontrol paketlerinin değişiminde devreye girer. Bu yaklaşım zaman eşlemesine ihtiyaç duymaz fakat donanımsal, maliyet, enerji tüketimi ve her düğümde iki alıcı-verici barındırması açısından düğümlerde karmaşıklığı artırır.

Bazı araştırmacılar ise iletimin başlatılması görevini vericiden alıcıya kaydırmayı önermişlerdir (Sun Y. et al., 2008). Alıcı uyandığında ve bir paketi almaya hazır olduğunda bir işaret (beacon) paketi gönderir ve kanalı bir süre gelecek olan bir paket için gözler. İşaret paketini alma durumunda verici düğüm gerçek veriyi gönderebilir. Bu tarz planlar yalnızca haberleşmeyi kimin başlatacağını belirleme dışında gerçekte klasik olanlar ile benzerdir. Bundan dolayı her iki yönlüde bu temelde bahsedilen tüm sorunları da barındırmaktadır. Dahası bu tarz protokoller yayın (broadcast) ve çoklu gönderme (multicast) haberleşmeler için kullanılamaz ve gönderici düğüm tarafında boşa dinlemeyi ve gecikmeyi arttırabilir.

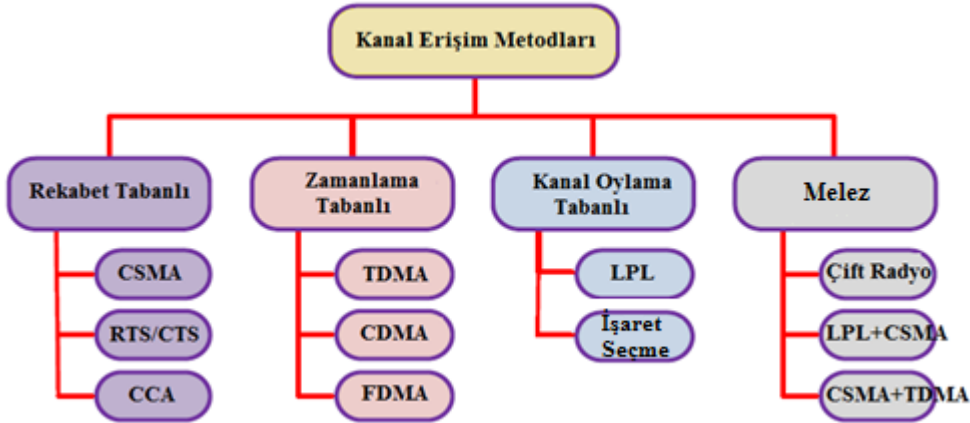
Bu bölümde TDA tasarımına bir giriş yapıldı ve TDA'ların arkasında yatan mimari, uygulamalar, tasarım hedefleri, karşılaşılabilecek olan sorunlar ve tasarım yaklaşımlarından bahsedildi. Ayrıca bu bölümde atıfta bulunulan tüm yaklaşımlar ve protokoller bir sonraki bölümde daha detaylı bir biçimde anlatıldı. Bir sonraki bölümde ise son yıllarda özellikle TDA'lar için önerilen MAC protokolleri incelenmiştir.

### 3 LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde literatürde TDA'lar için özel tasarlanmış olan MAC protokollerinin geniş bir incelemesine yer verildi. Protokoller farklı kanal erişim sınıflarına kategorize edildi. Sonrasında bu tez çalışmasının asıl odak noktası olan çizgisel topolojideki TDA'ların literatürde yer alan çalışmalarına yer verildi ve son olarak enerji verimliliği ve gecikme bakımından oldukça verimli olan AREA-MAC protokolü incelenmiştir.

#### 3.1 TDA MAC Protokolleri ve Sınıflandırması

Literatürde TDA'ların zorlu tasarım gereksinimlerini karşılayacak çok çeşitli MAC protokolleri önerilmiştir. Bu protokoller düğümlerin ortama erişimlerine nasıl imkan tanıdıklarına göre *rekabet tabanlı*, *zamanlama tabanlı*, *kanal oylama tabanlı* ve *melez protokoller* olarak genel kategorilere ayrılırlar (Bkz. Şekil 3.1) (Klues K. et al., 2007).



Şekil 3.1 TDA'ların kanal erişim sınıflandırması.

#### 3.1.1 Rekabet Tabanlı MAC Protokolleri

Rekabet tabanlı metodları kullanan düğümler komşuları ile kanala erişim için rekabet ederler. Herhangi bir iletimden önce bir düğüm öncelikle taşıyıcıyı algılamaya çalışır. Eğer taşıyıcı boş bulunursa düğüm iletimine başlar, aksi takdirde genellikle bir backoff algoritması tarafından belirlenen rastgele bir süre

boyunca iletimini erteler. Rekabet tabanlı MAC protokolleri işlemsel kaynakları az tüketirler ve olay tabanlı TDA uygulamaları için uygundur. Çalışmaları için kümeleşmeye veya topoloji bilgisine ihtiyaç duymadıkları için ağ ölçeklendirmesine ve dinamizmine karşı esnekler. Her bir düğüm kontrol paketleri değişimine ihtiyaç duymaksızın bağımsız olarak rekabete karar verebilir. Fakat bu yaklaşım ile gerçekleşen iletim tamamen gönderici tarafından ele alınır ve çarpışmalara, fazladan duymaya, boşta dinlemeye ve düşük işlem hacmine neden olan gizli ve uç terminal sorunlarına maruz kalabilir.

Bu kategorideki bir çok MAC protokolünde paketlerin çarpışma olasılığı vardır çünkü tüm komşu düğümler aynı anda kanala erişim için rekabet ederler. Çarpışan paketler genellikle tekrar iletilir ve bu durum yüksek enerji tüketimi ve gecikme ile sonuçlanır. Bununla birlikte kaynakları sınırlı olan TDA'larda zaman eşlemesi oluşumu ve bakımı karmaşıklığa ve haberleşme fazlalığına neden olur. Ayrıca özel donanımlar ve algoritmalar gerektirebilir. Dahası, her düğümdeki saat kayması zamanlama hatalarına neden olarak plan koordinasyonunu ve zaman eşlemesini etkileyebilir. Literatürde çok sayıda rekabet tabanlı mekanizma üzerine çalışılmış TDA MAC protokolü vardır. Aşağıda bu protokollerden bazıları özetlenmiştir.

### **3.1.1.1 S-MAC**

Multi-hop sensör ağları için iyi bilinen bir protokol olan S-MAC (Sensor-MAC), planlanmış bir sözleşmeli haberleşme metodunu benimser (Ye W. et al., 2004). Düğümler birbirlerinin uyuma/uyanma periyotlarını koordine edebilmek için zaman eşlemesi paketleri değişimi yaparlar. Her düğüm belirli bir algoritmaya göre kendi planını oluşturabilir veya bir komşusunun planını takip edebilir. Aynı planı kullanan düğümler sanal bir küme oluşturur. Bir düğüm, eğer üst üste gelmiyorsa aynı anda iki planı birden takip edebilir. Böylece farklı sanal kümeler arasında haberleşme köprüsü oluşturabilir. Kanal erişim zamanı iki kısma ayrılır. Dinleme periyodunda düğümler IEEE 802.11 standardında olduğu gibi çarpışmalardan kaçınmak için zaman eşlemesi paketi değişimi ve özel kontrol paketleri değişimi yaparlar. Kalan periyotta ise gerçek veri transferi yapılır. Gönderen düğüm ve hedef düğüm uyanıktır ve birbirileri ile konuşurlar. Haberleşme işlemiyle ilgilenmeyen düğümler bir sonraki dinleme periyoduna kadar uyuyabilirler. Çoklu atlamalı ortamlardaki yüksek gecikmelerden kaçınmak

için S-MAC, adaptif bir dinleme metodu kullanır. Değişken trafik yükü için S-MAC'in geliştirilmiş bir versiyonu olan T-MAC (Timeout MAC) (Van Dam and Langendoen, 2003) protokolü önerilmiştir.

### 3.1.1.2 T-MAC

T-MAC protokolü özellikle değişken trafik koşulları altında algılayıcı düğümlerin adaptif olarak dinleme periyotlarını kısaltarak S-MAC protokolünün enerji verimliliğini artırır (Van Dam and Langendoen, 2003). Dinleme periyodunun kesin olduğu S-MAC protokolünün aksine bir T-MAC düğümünün dinleme periyodu, TA kadarlık bir eşik periyodunca herhangi bir aktivasyon olayı meydana gelmediği zaman sona erer. Bu dinamik yaklaşım uygulamayı uygun çalışma zamanı belirleme bakımından serbest bırakır. Bu gelişim T-MAC ve S-MAC'ı karşılaştırarak anlaşılabilir. Fakat bu gelişim TA değerine bağlıdır. TA yeterince uzun olmalıdır ve böylece bir düğüm taşıyıcıyı duymaya çalışabilir ve komşusundan gelecek olan potansiyel bir CTS paketini duyabilir. T-MAC her ne kadar değişken trafik yükü altında daha iyi çalışsada sanal kümeler içindeki dinleme periyotlarının zaman eşlemesi kısmen bozulabilir. Bu durum T-MAC düğümleri için erken uyuma sorununa yol açar. Erken uyuma, bir düğümün komşusunun hala ona göndereceği mesajları olmasına rağmen uyumasıdır. Fakat T-MAC ile birlikte FRTS paketleride üçüncü atlamadaki düğümlere TA sürelerinin bitimini uzatmaları için gönderilebilir veya uygun zamanda uyandırılmaları sağlanabilir. T-MAC, S-MAC ile kıyaslandığında daha çok enerji korunumu sağlar ve çarpışmaları ve fazlalığı minimize eder çünkü boştaki düğümler göreceli olarak uyku moduna erkenden girerler. Fakat bu durum düşük işlem hacmine ve yüksek ağ gecikmesine mal olur. T-MAC ayrıca zaman eşlemesi ve ölçeklendirme problemlerinden de etkilenir.

### 3.1.2 Zamanlama Tabanlı MAC Protokolleri

Zamanlama tabanlı MAC protokolleri zamanı çerçevelere (frame) ayırır ve her çerçeve belirli bir sayıda zaman dilimi içerir (Li and Lazarou, 2004). Yine belirli bir zaman algoritmasına göre her düğüm bir veya birden fazla zaman dilimine tahsis edilir ve diğer düğümlerden paketleri almak yada onlara göndermek için bu zaman dilimlerini kullanır. Birçok durumda düğümler kümeler oluşturmak için gruplaşırlar. Her kümenin, kümedeki düğümlere bir zaman tahsis

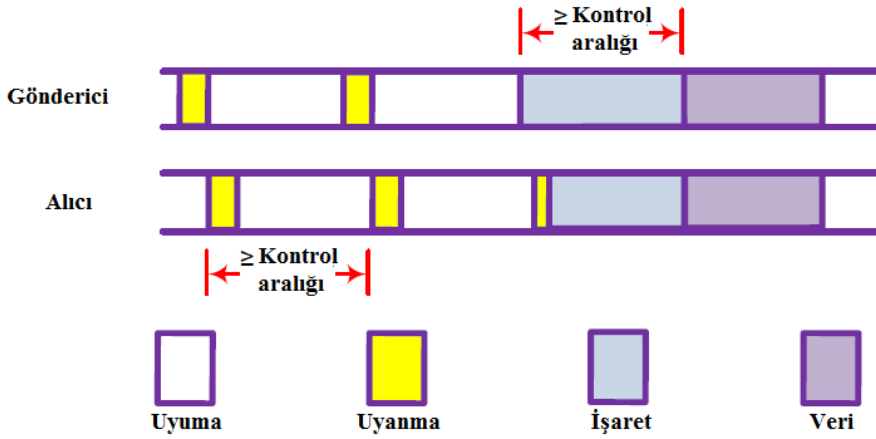
etmek üzere bir başkanı vardır (Bluetooth (Haarsten, 2000), LEACH (Langendoen and Reijers, 2003), TDMA tabanlı MAC (Arisha K. et al., 2002) ).

### 3.1.2.1 LEACH

LEACH genel olarak yoğun ve homojen bir TDA'yı bir çok kümeye ayıran zamanlama tabanlı bir MAC protokolüdür (Heinzelman W. et al., 2002). Her küme bir TDMA planı oluşturan, yöneten, küme elemanlarıyla haberleşen ve alınan paketleri toplayıcı düğüme ileten bir küme başkanı tarafından organize edilir. Bir küme başkanı her zaman açıktır ve erken ölme ihtimali daha yüksektir. Fakat, LEACH küme başkanı seçiminde bir rotasyon mekanizması kullanır. Uzun süre küme başkanı olmamış olan her düğüm bağımsız olarak küme başkanı olmaya karar verir. Böylece LEACH enerji tüketimini düğümler arasında adil bir şekilde dağıtılmasını sağlar. LEACH turlar şeklinde çalışır ve her bir tur kurulum (set-up) ve kararlı durum (steady-state) fazlarından oluşur. Küme formasyonu kurulum aşamasında gerçekleşir ve her küme başkanı üyelerini davet etmek için CSMA mekanizması kullanarak bir duyuru (ADV) paketi yayımlar. Daha sonra küme başkanı kendisine katılım isteği (REQ) paketi gönderen düğümlere bir TDMA planı oluşturur ve yayımlar. Kümeler arası enterferansı azaltmak için küme başkanı üyeleri için rastgele bir CDMA kodu seçer. Kurulum fazı bir kez tamamlandığında, kararlı durum fazı başlar ve her düğüm tahsis edilen zaman dilimi içinde küme başkanına veri iletebilir. Üyelerinden verilerin alınmasıyla küme başkanı bu verileri toplayıcı düğüme iletir. LEACH kümeler arası haberleşmeye imkan sunmadığı için küme başkanı toplayıcı düğüm ile direkt olarak CSMA mekanizması kullanarak haberleşir. Küme başkanı çok yüksek hesaplama gerektiren ve enerji tükettiren görevleri yerine getirmek zorundadır. Bir TDMA planı oluşturmak ve sürdürmenin yanında tam bir tur süresince uyanık kalmak, verileri toplamak ve direkt olarak toplayıcı düğüme iletmek zorundadır. LEACH her bir düğümün en fazla bir kümeye ait olacağını garanti eder. Fakat, ADV paketi çarpışmasından dolayı her düğümün kümeye ait olduğunu garanti edemez. Bu durumda LEACH her düğümün toplayıcı düğümün menzili içinde olduğunu varsayar. Dolayısıyla bu durum aynı zamanda LEACH protokolünün ağ ölçeklenebilirliğini sınırlar.

### 3.1.3 Kanal Oylama Tabanlı MAC Protokolleri

İşaret örnekleme veya düşük güçük dinleme (LPL) olarakta bilinen kanal oylama metodu ile bir düğüm veri paketlerinin önüne “preamble” adı verilen ekstra işaret paketleri yerleştirir. Düğüm kanal üzerinde işaret göndererek hedef düğümün bu işareti algıladığından ve gerçek veri gelmeden önce uyandırdığından emin olur. Bir uyanmadan sonra eğer bir radyo aktivitesi tespit edilirse, radyo veri paketlerini almak için radyosunu açar. Aksi takdirde bir sonraki oylama periyoduna kadar düğüm uyku moduna girer. Sağırılık ve fazladan yayılımdan kaçınmak için gönderici işaret süresini en az kontrol aralığı (check interval) kadar belirler. Çünkü alıcının uyanmasını ve işaret gönderilirken en az bir kere kanal oylaması yapmasından emin olmak ister (Polastre J. et al., 2004). Yani işaret paketinin uzunluğu en az kontrol aralığı kadar olmalıdır (Bkz. Şekil 3.2).



Şekil 3.2 TDA'larda kanal oylama metodu.

Kanal oylama tabanlı protokoller genel bir uyuma/uyanma planı takip etmedikleri için zaman eşlemesine, planlamaya veya düğümlerin kendi aralarında küme oluşturmalarına gerek yoktur. Özellikle alıcı düğümler kanal üzerindeki işaretin varlığını kontrol etmek için çok kısa bir süreliğine uyanık kaldıkları için daha az enerji tüketirler. Dolayısıyla enerji verimliliği açısından bu yaklaşım, özellikle düşük trafik koşullarında genel olarak diğer yaklaşımlardan daha iyidir (Buettner M. et al., 2006). Fakat gönderici düğüm uzun ve genişletilmiş işaret paketlerini göndermede ve verinin gönderildiğinden emin olana kadar kanalı dinlediğinden daha fazla enerji tüketebilir. Dahası, hedef olmayan diğer düğümler işareti fazladan duyabilirler ve ancak işaretin tümünü aldıktan sonra bu işaret için hedef düğüm olmadıklarına karar verebilirler. Bu durum artan iletim ve algılama

uzunluklarına ve belkide ilerde trafik yükünüde çoğaltan artan çarpışma olasılıklarına neden olur. Kanal oylamanın dezavantajlı diğer bir yönü ise görev süresi belirleme değerindeki kısıtlamadır. Görev süresi belirleme değerini düşürmek kontrol aralığını genişletmek anlamına gelir. Bu alıcı düğüm açısından iyi bir noktadır fakat gönderi açısından daha uzun işaret göndermek gerektiğinden enerji açısından kayda değer bir iletim maliyetine neden olur. Sonuç olarak uzatılmış işaretler gereksiz enerji tüketimine ve hedef olmayan düğümlerde fazladan duymaya, her atlamada fazladan gecikmeye sebep olur. Daha kısa işaret kullanarak, adaptif bir görev süresini belirleyerek ve paket fazlalığını azaltarak bu durumun üstesinden gelinebilir (Kumar P. et al., 2009).

Diğer bir sorun ise veri paketinden önce uzatılmış bir işareti gönderecek olan radyo ile ilgilidir. Her ne kadar CC1000 gibi bayt seviyesindeki radyoların aksine CC2420 gibi ileri düzey paket tabanlı radyolar MAC katmanını her bir baytı yönetmekte serbest bıraksada, işaretin uzunluğunu bir kaç baytın ötesine esnetmedeki kapasite eksikliği bu radyolar için kanal oylama mekanizmasını zorlu hale getirmiştir (Langendoen, 2008). Bundan dolayı paket tabanlı radyolar için kanal oylama mekanizması her biri kısa aralıklarla ayrılmış olan sürekli ard arda gelen paketlerle yürütülmüştür.

### **3.1.3.1 B-MAC**

En popüler kanal oylama tabanlı MAC protokollerinden birisi B-MAC (Berkeley MAC) protokolüdür (Polastre J. et al., 2004). Bu protokolün amacı kanal erişimi için enerji verimli bir mekanizma ve bir kaç fonksiyonellik sağlamaktır. İlk olarak B-MAC, temel kanal erişim kontrolü özelliklerini uygular: bir geri çekme planı, bir kusursuz kanal tahmin yeteneği ve opsiyonel alındı onayları. İkinci olarak, düşük çalışma zamanına ulaşabilmek için B-MAC'ta periyodik dinleme üzerine kurulu asenkron bir uyuma/uyanma metodu ve düşük güç dinleme LPL (Low Power Listening) metodu önerilmiştir. Düğümler periyodik olarak kanalı denetlemek için uyanırlar. Böylesi ardışık iki uyanma anı arasındaki periyoda kontrol aralığı (check interval) denir. Uyandıktan sonra, düğümler muhtemel devam eden iletimleri düzgün bir şekilde tespit edebilmek için belirli bir uyanma süresince (wake up time) aktif kalırlar. Uyanma süresi sabit kalırken, denetim aralığı uygulamaya göre değişebilir. B-MAC paketleri, uzun bir işaret (preamble) paketi ve bir veri (payload) paketinden meydana gelir. Başlangıç

süresi, en az kontrol aralığına eşit olur ve böylece her düğüm kendi kontrol aralığı süresince her zaman muhtemel bir iletimi tespit edebilir. Bu yaklaşım düğümlerin senkronize olmasını gerektirmez. Doğrusu, bir düğüm kanal aktivitesi tespit ettiği zaman, sadece aktif kalır ve önce işareti (preamble) daha sonra veriyi (payload) alır.

### 3.1.3.2 WiseMAC

WiseMAC protokolü kalıcı olmayan (non-persistent) CSMA ile kanal oylama mekanizmasının birleşimi üzerine çalışan protokoller arasındadır (El-Hoiydi and Decotignie, 2004). WiseMAC temel fonksiyonelliği hemen hemen B-MAC ile benzerdir. Fakat, boşta dinlemeyi hafifletmek ve uzun ve sabit işaret paketinden kaynaklanan enerji tüketimini azaltmak için WiseMAC bir düğüme komşularının uyanma periyotları ile ilgili bilgi sahibi olmasına imkan sunar. Düğümler ACK paketleri içindeki bir sonraki uyanma periyodu için kalan süreyi alarak komşularının örnekleme planını öğrenir. Ayrıca komşularının örnekleme zaman ofsetlerinin güncellenmiş bir tablosunu tutar. Gönderici bir düğüm işareti alıcı düğüm tam uyanmadan önce gönderir ve böylece işaret uzunluğu minimal seviyede tutulur. Saat kaymaları vericiyi, tahmini kaymayıda kapsayacak şekilde yeteri uzunlukta işaret göndermesine neden olabilir. Ağ'da bulunan tüm düğümler genel döngü süresi ile birlikte kanalı örnekler. Fakat her birinin uyuma ve uyanma periyotları bağımsız ve senkronize edilmemiştir. WiseMAC düzenli trafik için kısa işaret paketleri kullanır ve çok sık olmayan haberleşmeler için bu işaret paketlerinin süresini uzatır. Veri paketinin işaret paketinden daha küçük olabileceği düşük trafik yükleri için WiseMAC genişletilmiş işaret paketleri yerine veri paketlerini tekrarlar. WiseMAC ile birlikte bir alıcı işaret paketinin sonunda çarpışma veya enterferanstan dolayı hazır bulunamayabilir ve fazladan yayılım meydana gelir. Bu fazlalık işaret ve veri paketinin büyüklüğünün artmasıyla daha da artabilir. Düğümler senkronize olmadıkları için tüm komşuların uyanma zamanlarını barındırmak hafıza ve zaman bakımından tüketici bir işittir. Yayın (broadcast) haberleşmesi durumunda bir verici aynı paketi her komşusuna bir çok kez göndermek zorunda kalır. Bu fazladan iletim düğümler için yüksek enerji tüketimine ve gecikmeye yol açar. Ek olarak, bir düğüm hali hazırda başka bir düğümden paket almakta olan başka bir düğüme işaret paketi gönderdiğinde gizli terminal problemi oluşabilir. WiseMAC değişken trafik durumları için zaman planını adapte edebilme mekanizması sağlamaz.

### 3.1.4 Melez MAC Protokolleri

Melez MAC protokolleri iki veya daha fazla farklı MAC protokolünü ortak bir iyileştirme sağlamak amacıyla güçlerini bir araya getirir. Genellikle zaman eşlemesi kullanan bir metodu senkronize olmayan birisiyle birleştirir. Melez protokoller her ne kadar iki mekanizmasında avantajlarını bir araya getirsede, iki veya daha fazla çalışma modunu sürdürmede ölçeklenebilirlik ve karmaşıklık sorunlarını taşırlar.

Melez MAC protokollerinin arkasındaki ana düşünce (örneğin; rekabet seviyesine bağlı olarak protokol davranışını TDMA ve CSMA arasında değiştirmek.) yeni değildir. WLAN ortamlarında daha öncelerden olasılıksal (*Probabilistic*) TDMA (PTDMA) yaklaşımı önerilmiştir (Ephremides and Mowafi, 1982). PTDMA zamanı dilimlendirmiştir ve düğümler sahip olanlar (*owners*) ve sahip olmayanlar (*non-owners*) olarak ayrılmıştır. Protokol, gönderici sayısına göre sahip olanların ve olmayanların erişim olasılığını ayarlar. Bunu yaparak, ağdaki rekabet seviyesine göre MAC protokolünü TDMA veya CSMA gibi çalışması için adapte eder. Fakat, PTDMA one-hop kablosuz senaryoları için düşünülmüştür. Bundan dolayı, telsiz duyurga ağları için oldukça genel olan topoloji değişimleri, zaman eşlemesi hataları ve enterferans düzensizlikleri gibi konuları göz önünde bulundurmaz.

TDMA tabanlı protokoller doğal olarak enerji verimlidir çünkü düğümler sadece kendi zaman dilimlerinde aktif olurlar ve diğer zamanlarda dinlenme moduna girerler. Uygun bir zaman dilimi tahsis algoritması ve doğru protokol parametreleri boyutlandırması ile enerji tüketimini azaltmak mümkün. TDMA tabanlı protokoller aynı zamanda düğümler arasındaki parazit durumlar ile ilişkili problemleride çözer çünkü komşu düğümlerin farklı zamanlarda planlı iletimleri vardır. Fakat, pratikte TDMA tabanlı protokollerin bir çok eksikliği vardır (Rhee I. et al., 2005). İlk olarak esneklikleri ve ölçeklenebilirlikleri sınırlıdır çünkü gerçek bir duyurga ağında bir çok faktörden dolayı (kanal koşulları, düğüm hataları gibi) sık topoloji değişimleri olabilir ve zaman tahsisi problemleri olabilir. Bundan dolayı çoğu durumda merkezi bir yaklaşım benimsenir (Haartsen, 2000) (LEACH (Heinzelman W. et al., 2000) gibi). İkinci olarak, iyi bir zaman eşlemesi gerektirir. Bunun yanısıra TDMA tabanlı protokoller haberleşme trafiğinin düşük olduğu durumlarda rekabet tabanlı protokollerde göre daha kötü çalışır. Tüm bu

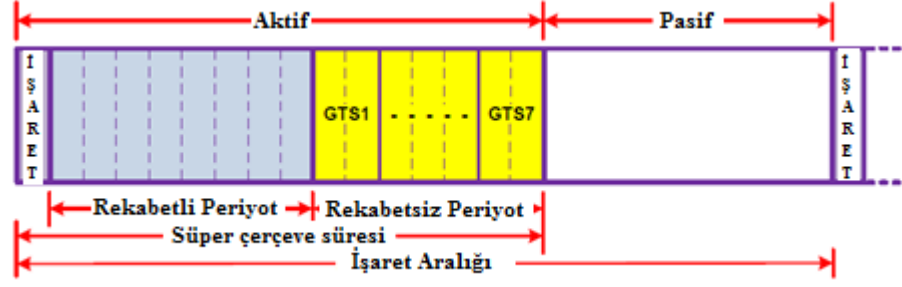
nedenlerden dolayı TDMA MAC protokolleri pratikte telsiz duyurga ağlarında çok sık kullanılmaz.

Diğer bir yandan, rekabet tabanlı MAC protokolleri güçlü ve ölçeklenebilirdir. TDMA tabanlı olanlara göre daha az gecikmeye sahiptirler ve trafik koşullarına kolayca adapte olurlar. Malesef enerji tüketimleri rekabet ve çarpışmalardan dolayı TDMA tabanlı protokollere göre daha fazladır. Çalışma zamanı dayanaklı mekanizma enerji tüketimini azaltmaya yardımcı olur fakat adaptif ve düşük gecikmeye sahip olabilmeleri için dikkatlice tasarlanmalıdır. Son olarak melez protokoller TDMA tabanlı ve rekabet tabanlı protokollerin gücünü birleştirmeyi dener. Fakat bu protokoller çok sayıda düğüm ile uygulanabilirlik açısından oldukça kompleks görünür.

#### **3.1.4.1 IEEE 802.15.4**

IEEE 802.15.4. dünyada TDA için tasarlanan ve standart haline gelmiş olan ilk protokoldür (IEEE, 2006). Onun ana hatları ve yapısı bütün diğer protokollere de yansıtılmaktadır. IEEE 802.15.4. MAC alt katmanının özellikleri: *beacon yönetimi, kanal erişimi, garantilenmiş zaman dilimi GTS (guaranteed time slot) yönetimi, çerçeve onaylama, onaylanmış (acknowledged) frame gönderimi, birleşme ve ayrılmasıdır.*

IEEE 802.15.4 süper frame yapısı ağ işaretleri ile sınırlandırılmıştır ve 16 eşit büyüklükteki zaman dilimlerine ayrılmıştır. İşaret frame her süper frame'in ilk zaman diliminde gönderilir. İşaretler birbirlerine bağlanmış olan aygıtları senkronize etmek için kullanılır. Süper frame aktif ve pasif kısımlardan oluşur. Aktif kısım "rekabetli erişim periyodu" CAP (contention access period) ve "rekabetsiz periyot" CFP (contention free period) periyotlarından oluşur (Bkz. Şekil 3.3). CAP sırasında haberleşmek isteyen herhangi bir aygıt zaman dilimli bir CSMA-CA mekanizması kullanarak diğer aygıtlarla rekabete girmelidir. GTS her zaman aktif süper frame'in sonunda CAP'i takiben yer alır.



Şekil 3.3 IEEE 802.15.4 MAC superframe yapısı.

Kordinatör GTS zaman dilimlerini ağ içerisindeki diğer aygıtlara paylaşır ve her aygıt sadece kendi zaman dilimi içerisinde veri transferi yapabilir. Süper frame ve diğer kısımlarının süreleri ise macBeaconOrder ve macSuperFrameOrder değerleri ile tanımlanır. MacBeaconOrder, kordinatörün hangi zaman aralığında işaret frame göndereceğini tanımlar ve formül 3.1'de gösterildiği gibidir.

$$BI = aBaseSuperFrameDuration * 2BO , \quad BO = (0...14) \quad (3.1)$$

Eğer beacon order 15 olursa süper frame iptal edilir. Aynı şekilde süper frame süresi ise formül 3.2'deki gibidir:

$$SD = aBaseSuperFrameDuration * 2SO , \quad SO=(0...14) \quad (3.2)$$

Beacon her zaman 0. zaman diliminde CSMA algoritması olmadan gönderilir. Kontrol paketleri ise sadece CAP içerisinde gönderilir.

Süper frame yapısı eğer PAN içerisinde kullanılırsa, zaman dilimli CSMA-CA algoritması kullanılmalıdır. Eğer PAN içerisinde işaretler kullanılmaz ise veya işaret, işaret-aktif bir ağ içerisine yerleştirilemez ise zaman dilimli olmayan (unslotted) CSMA-CA algoritması kullanılmalıdır. Her iki durum için algoritma backoff periyodu denilen zaman birimi ile hayata geçirilir.

Zaman dilimli CSMA-CA algoritmasında kanal erişim mekanizması içinde, PAN içerisindeki her aygıtın backoff periyodu sınırları PAN kordinatörünün süper

frame zaman dilimi sınırları ile sıralanmıştır. Her aygıt verilerini CAP periyodu içinde göndermeyi diler. Algoritmanın diğer backoff periyotunun sınırlarını koyması gerekmektedir. Zaman dilimli olmayan CSMA-CA algoritmasında ise bir aygıtın backoff periyotunun diğer bir aygıtın backoff periyodu ile senkronize olmasına gerek yoktur.

Her aygıt 3 değişkene sahiptir: NB, CW ve BE. NB gönderme işlemi yapmak isterken backoff için kaç kere CSMA-CA algoritmasına ihtiyaç olduğunu belirler. Her transmisyondan önce 0'a ayarlanmıştır. CW (contention window) rekabet penceresinin uzunluğunu belirler. Her transmisyondan önce 2'ye ayarlanmıştır. CW sadece zaman dilimli CSMA-CA için kullanılır. BE, backoff katsayısını tanımlar ve bir aygıtın kendisine kanal tayin edilmesine yeltenmeden önce ne kadar backoff periyodu beklemesi gerektiğini belirler. Aygıt alıcısı her ne kadar bu algoritmanın kanal tayini kısmında aktif hale getirilmiş olsa da aygıt bu zaman içerisinde gelen frameleri gözden çıkaracaktır.

CSMA-CA Algoritması genel olarak 5 adımdan oluşmaktadır:

1.Adım: Zaman dilimli CSMA-CA algoritmasında NB,CW ve BE başlangıç değerleri başlatılır ve bir sonraki backoff periyotunun sınırı belirlenir. Zaman dilimli olmayan CSMA-CA da ise, NB ve BE başlangıç değerleri başlatılır.

2.Adım: MAC katmanı 0 ile  $2BE-1$  arasında rastgele tam bir backoff periyodu kadar gecikme uygulamalıdır.

3.Adım: PHY katmanından bir CCA (clear channel assessment) kanal tayinini gerçekleştirmesi talep edilir.

4.Adım: Eğer kanal meşgul ise , MAC katmanı NB ve BE değerlerini bir birim arttırmalıdır ve BE  $aMaxBE$  değerinden daha büyük olamaz. Zaman dilimli CSMA-CA 'da CW değeri 2'ye sıfırlanabilir. Eğer NB değeri  $macMaxCSMABackoffs$  değerinden küçük veya eşit ise, CSMA-CA 2. Adım'a dönmelidir. Eğer küçük veya eşit değilse CSMA-CA bir kanal erişimi hatası durumu ile sonlanmalıdır.

5.Adım: Eğer kanal boş ise, zaman dilimli CSMA-CA'da MAC katmanının transmisyona başlamadan önce rekabet penceresinin süresinin bittiğinden emin olmalıdır. Bunun için MAC katmanı önce CW değerini bir birim artırır. Eğer CW değeri 0 değilse 3. Adım'a gider, bunun dışındaki bir durumda ise, MAC katmanı hemen transmisyona başlar.

## 3.2 Çizgisel Topolojideki Telsiz Duyarga Ağları

TDA'larda otoban, tünel ve petrol boruları gibi yapıların gözlenmesinde genellikle deterministik dağıtım kullanılır ve gözlemlenen alan dar ve uzundur. Dolayısıyla gecikme uzun, güvenilirlik ise düşüktür. Bu bölümde çizgisel telsiz duyarga ağlarının (ÇTDA) literatürde yer alan bazı uygulamalarına ve çalışmalarına değinilmiştir.

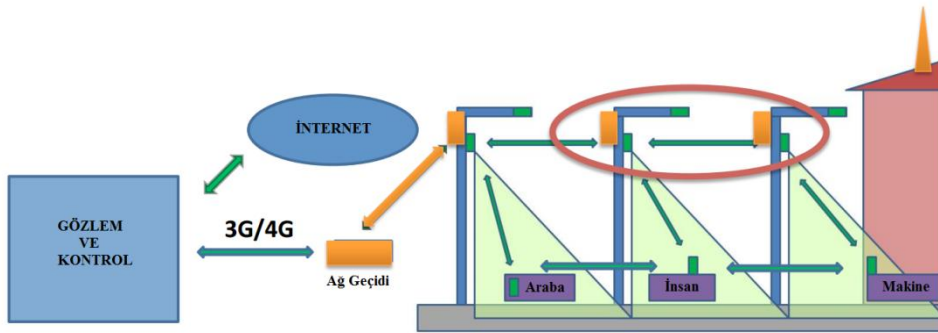
### 3.2.1 ÇTDA Uygulamaları

Literatürde yer alan bazı çalışmalar ÇTDA'ların petrol, gaz ve su borularını gözlemlemeye yöneliktir. Yapılan bir çalışmada araştırmacılar PipeNet isiminde borulardaki basınç, titreşim değerini gözlemleyen bir sistem üzerinde çalışmışlardır (Stojanov I. et al., 2007). Bir diğer makalede araştırmacılar çoklu atlamalı trafik modeli kullanarak boruları gözlemleyen kendi kendini idame ettirebilen bir ağ önermişlerdir (Changsoo O. et al., 2007). Bu çalışma bağlanabilirliği sağlamak için gerekli olan minimum toplayıcı düğüm sayısını tartışmaktadır. Örnekleme hızı hesaplandıktan sonra toplayıcı düğüm sayısı elde edilir. Başka bir çalışmada araştırmacılar insan müdahalesine gerek kalmaksızın su borularındaki tıkanıklık veya kaçak gibi anormallikleri tespit eden SWATS ismini verdikleri bir su gözleme sistemi tasarladılar (Sunhee Y. et al., 2011). SWATS birden fazla düğüm işbirliğinin sağladığı düşük maliyet, düşük gecikme ve güvenilirliği ile yanlış alarmı azaltır, doğruluğu artırır ve güvenilir bir gözlem sağlar.

Araştırmacıların üzerinde durduğu bazı diğer uygulamalar ise tren yolları, köprü ve tünelleri gözlemlemeye yöneliktir. Yapılan bir çalışmada virajlı yollarda araçların çarpışmalarını önlemek için çarpışma önleme sistemi tasarlanmıştır (Kyung S. et al., 2007). Yolun yapısı göz önünde bulundurularak

algılayıcılar hiyerarşik bir düzen oluştururlar ve yönlendirme fazlalığını azaltmak için sistem iki yönlendirme mekanizması kullanır. Deney sonuçları sistemin çarpışma yaklaşmadan önce araç sürücülerinin uyarılabildiğini göstermektedir. Bir diğer çalışmada kömür madeninin yer altı tüneline gözlemek için SASA adında bir TDA sistemi tasarlanmıştır (Li and Liu, 2009). Bu sistem çökmelerden kaynaklı yapısal değişiklikleri çabuk bir şekilde algılayabilir.

Bu bölümde ÇTDA'ların literatürdeki bazı uygulamalarına yer verildi. Bu tez çalışmasındaki ÇTDA senaryosu için Bologna Üniversitesinde görev yapan Prof. Roberto Verdone ve Prof. Chiara Buratti'nin "Nesnelerin İnterneti" (Internet of Things – IoT) konsepti kapsamında üzerinde çalışmış oldukları "Akıllı Işıklandırma Sistemi" (Smart Lighting System) projesinden esinlenmiştir. Bu sistemde sokaklardaki ve şehirler arası yollarda bulunan aydınlatma direklerinin üzerindeki lambalardan yararlanılması hedeflenmektedir. Sokakta yürüyen insanlardan, araçlardan veya diğer makinelerden aldığı veriyi birbirleri üzerinden merkezi bir noktaya iletebilen bir sistem planlanmaktadır. Algılayıcıların çizgisel topoloji ile çoklu atlamalı bir tarzda alınan tüm verileri merkeze iletmesi isteği bu tez çalışmasında bu senaryodan esinlenilmesini sağlamıştır (Bkz. Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Nesnelerin interneti ve TDA – ışıklandırma sistemi.

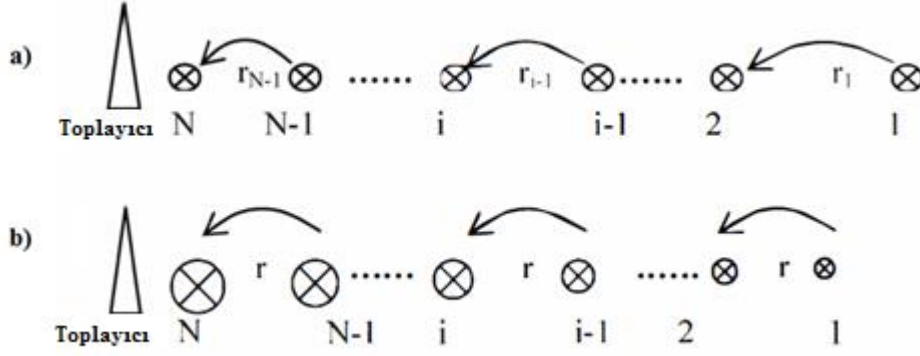
ÇTDA verimli bazı uygulamalarının yanı sıra diğer TDA uygulamaları ile kıyaslandığında kendine has bazı sorunları da beraberinde getirmektedir ve özellikle MAC tasarımında bir çok araştırmacının ihmal ettiği bu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bir sonraki kısımda bu sorunların üstesinden gelmek için literatürde yer alan ÇTDA tasarımlarına kısaca değinilmiştir.

### 3.2.2 ÇTDA Sorunlarına Yaklaşımlar

Çizgisel TDA'lar bir çok özelliğe sahiptir ve çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir fakat çoklu atlamalı haberleşme yapısı, uzun gözlem mesafesi, uzun gecikme ve daha bir çok açıdan diğer ağlardan farklıdırlar. Bu yüzden bu ağlar için yönlendirme protokolleri ve MAC protokollerinin çok detaylı bir şekilde çalışılması gerekir.

ÇTDA'lar için literatürde yer alan bir çalışmada araştırmacılar ağda bulunan düğüm sayısı arttıkça atlama sayısının artmasıyla birlikte komşu düğümleri arasındaki enterferanstan dolayı işlem hacminin düştüğünü gözlemlemişler (Wang. S. Y, 2003). Bunu önlemek için iki frekans kullanan bir metod geliştirmişlerdir ve başarımını arttırmak, enterferansı önlemek için kanalı iki farklı frekansı anahtarlayarak kullanmışlardır. ÇTDA'ların çoklu atlamalı yapıya sahip olması enerji tüketimi üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Bu yüzden düğümlerin nasıl yerleştirilmeleri gerektiği dikkatlice göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapılan bir çalışmada araştırmacılar enerji tüketimini azaltmak için optimal iletim yarı çapını seçen bir yaklaşım önermişlerdir (Ping and Suixiang, 2008). Bir diğer çalışmada ise düğümlerin harcadıkları enerji miktarına göre aralarındaki mesafenin belirlenmesi üzerine bir metod önerilmiştir (Howitt and Wang, 2004). Bir başka çalışmada ise düğümler arasında kümeleşme yapılmasını ve küme başkanlarının toplayıcı düğüme olan uzaklığına göre farklı başlangıç enerjilerine sahip olmasını önermiştir (Chen and Wang, 2008) (Bkz Şekil 3.5). Bir diğer çalışmada gözlemlenmesi gereken mesafenin uzunluğu ve ağda bulunan düğümlerin sayısına göre düğümler arasındaki optimal mesafenin hesaplanmasına yönelik bir metod önerilmiştir ( Hong and Xu, 2010). Yapılan bir başka çalışmada eşit aralıklarla yerleştirilmiş olan düğümlerin çizgisel topolojide daha az enerji harcadıkları ispatlanmış ve mesafenin hesaplanması için bir formül önerilmiştir (Bhardwaj M. et al., 2001).

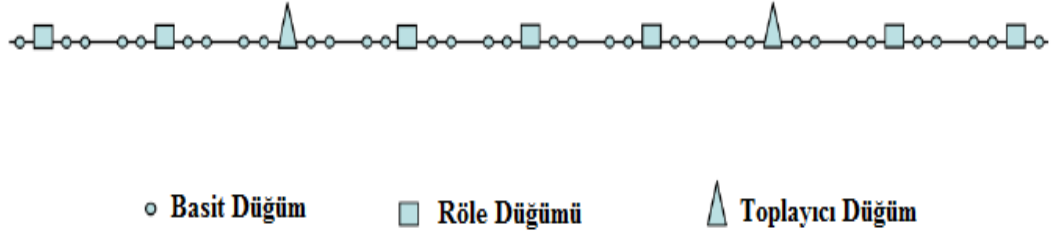


Şekil 3.5 a) Farklı haberleşme mesafesi ve eşit başlangıç enerjisi.

b) Farklı başlangıç enerjisi ve eşit haberleşme mesafesi.

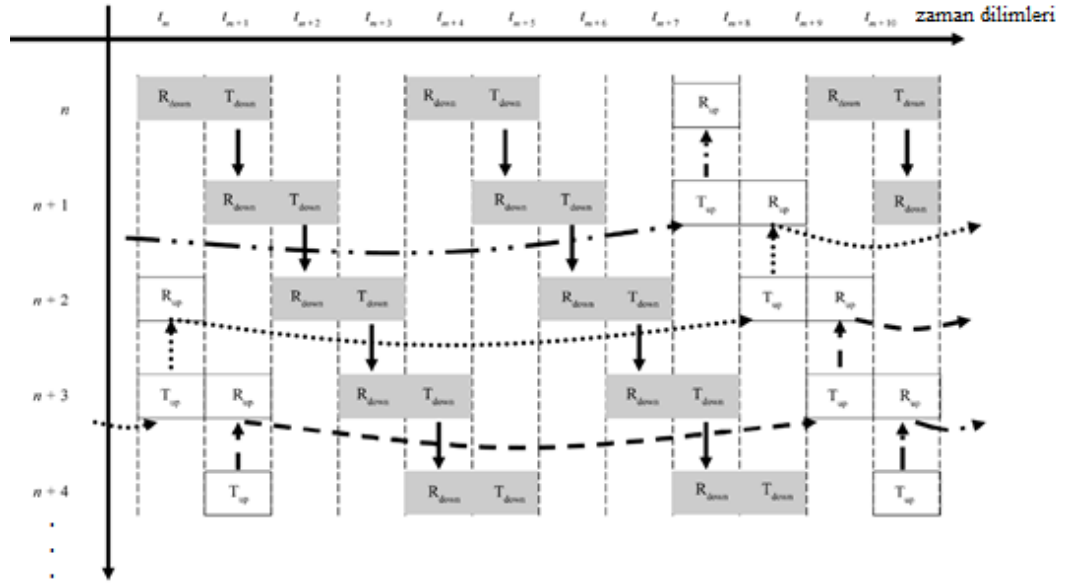
ÇTDA'lar için enerji tüketimini azaltmak için tasarlanan MAC protokolü sayısı oldukça azdır. Bir çalışmada araştırmacılar lokasyon tespiti yapan ve süper zaman eşleme mesajı geçiş tekniği kullanan bir MAC protokolü önermişlerdir ve S-MAC protokolü ile kıyaslamışlardır (Chen F. et al., 2011). Yapılan çalışma neticesinde önerilen protokolün gecikme ve enerji tüketimi açısından S-MAC'tan daha verimli olduğu kanıtlanmıştır.

Bir başka çalışmada yağ, gaz ve su borularının korunmasına ve gözlemlenmesine yönelik çizgisel bir TDA sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem ile birlikte düğüm bilgilerini merkeze iletebilmek için hiyerarşik bir yönlendirme protokolü tasarlamışlardır (Bkz Şekil 3.6). Protokol bireysel olarak her bir düğümün batarya yaşam süresini uzatan yük dengeleme özelliğine sahiptir. Basit düğümler algılama yapmak ve bilgiyi röle düğümlerine iletmekle görevlidir. Röle düğümleri bilgiyi toplamakla görevlidir ve röle düğümleri arasındaki mesafe kullanılan MAC protokolü haberleşme menziline göre belirlenir. Toplayıcı düğüm ise toplanan bilgileri ağ kontrol merkezine iletmekle yükümlüdür. Bilgilerin ağ kontrol merkezine iletim yöntemi değişkenlik gösterebilir. Örneğin uydu haberleşmesi yapılabilir. Bu yüzden toplayıcı düğümler bu haberleşme teknolojilerini üzerinde barındırması gerekir. Bu hiyerarşik yapı sayesinde her düğüm tarafından algılanan veri tüm hat boyunca ilerlemek zorunda değildir (Jawhar I. et al., 2007)



Şekil 3.6 Çizgisel hiyerarşik düğümlerden oluşan boru algılama sistemi.

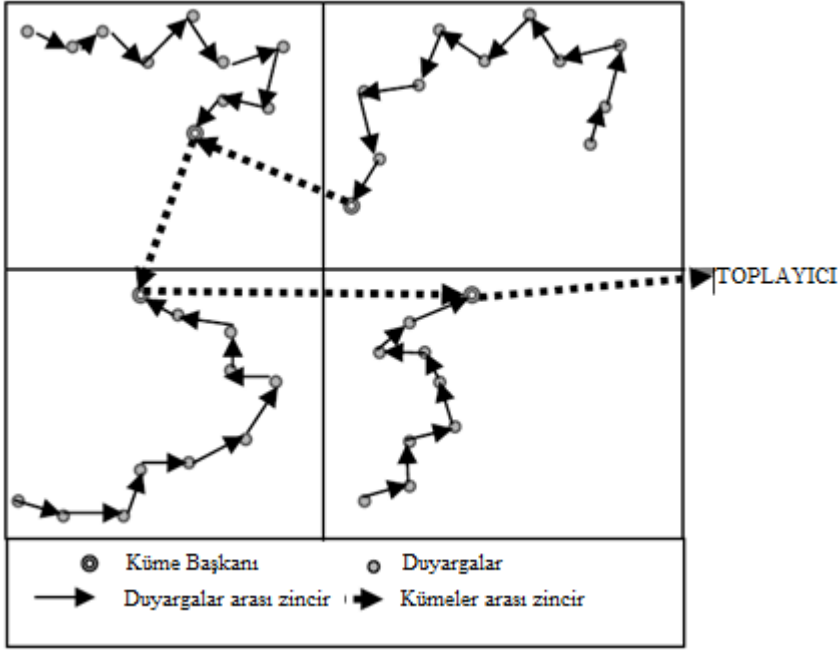
Çizgisel topoloji ile ilgili literatürde yer alan bir diğer çalışma ise rekabete dayalı olmayan, zaman eşlemesine bağlı çalışan WiWi protokolüdür (Caneva and Montessoro, 2010). WiWi herhangi bir yönlendirme tablosuna veya kompleks hesaplamalara ihtiyaç duymaz. Senkron iletişimin avantajlarını çizgisel topolojide kullanır. Bir düğüm bir kez senkronize olduğunda bir aktivite modelini takip eder. Bu model örneğin receive-transmit-idle-transmit-receive-idle “R-T-I-T-R-I” gibidir. Her düğüm çizgisel ağdaki yerinden bağımsız olarak bu modeli takip eder. Bu zaman eşlemesi sayesinde çarpışmalardan kaçınılmış olur (Bkz Şekil 3.7).



Şekil 3.7 WiWi çift yönlü senkronize iletim metodu.

Bir diğer çalışmada araştırmacılar CCPAR (Cluster Chain Based Power Aware Routing) isminde hiyerarşik bir yönlendirme protokolü önermişlerdir. Bu

protokolün altında yatan temel fikir küme oluşturmaktır olur (Bkz Şekil 3.8). Her küme içindeki düğüm bir zincir oluşturarak veriyi küme başkanına iletir. Diğer kümelerin başkanları da kendi aralarında bir zincir oluştururlar. Dolayısıyla her bir küme başkanı direkt olarak kontrol merkezine veriyi iletmek yerine birbirleri üzerinden iletirler. Küme başkanı yalnızca bir tane olmak üzere enerji seviyesi en yüksek olan seçilir. (Majumder K. et al., 2010).



Şekil 3.8 CCPAR protokolü ağ yapısı.

Başka bir çalışmada araştırmacılar çizgisel topolojide toplayıcı düğüme yaklaştıkça kuyrukta artan paket sayısını azaltmak ve çarpışmalardan kaçınmak için IEEE 802.15.4 protokolünün zaman dilimli olmayan CSMA/CA algoritması ile IEEE 802.11 protokolünün RTS/CTS mekanizmasını entegre ederek her ikisininde avantajlarından yararlanmayı hedeflemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda başarısız iletim neticesinde düşürülen paketlerin sayısında ve kuyruk yükünde azalma olduğu halde paket gecikmelerinde bazı artışlar gözlemlenmiştir (Ndoye M., et al., 2013).

Literatürde yer alan diğer iki çalışmada ise ÇTDA'larda enerji verimliliğini arttırmak için ağ katmanında görev yapan iki yönlendirme protokolü önermişlerdir (Zimmerling M. et al., 2008), (Sohkri R. et al., 2007). Bir diğer çalışmada araştırmacılar zincir tipli çizgisel bir ağ için MFT-MAC protokolünü

geliştirmişler ve bu protokolü çoklu-atlamalı ağlarda düşük bir gecikmeye sahip olan R-MAC ve DW-MAC isimli iki protokol ile kıyaslamışlardır. Önerilen protokol bir sonraki düğüme iletilecek olan veri paketi sayısını göz önünde bulunduran bir kontrol çerçevesi kullanmaktadır. Yapılan araştırma sonucu MFT-MAC'ın enerji verimliliği ve gecikme bakımından daha iyi bir başarımlı sağladığı kanıtlanmıştır ( Lee E. et al., 2013).

### 3.3 AREA-MAC

AREA-MAC protokolü zaman bakımından kritik uygulamalar ve enerji verimliliği sağlamak için geliştirilmiştir (Kumar P. et al., 2010). ve sistem adiliyeti, işlem hacmi, ölçeklenebilirlik ve trafik koşullarına adaptasyon gibi parametreler arasında iyi bir ödünleşim sağlamayı hedefler. AREA-MAC'in temel özellikleri şu şekildedir:

- **Asenkron:** Sistem çapındaki bir zaman eşlemesi paket fazlalıklarını ve ölçeklenebilme sorunlarını yaratır. AREA-MAC herhangi bir zaman eşlemesi içermez. Tüm düğümler uyuma uyanma zamanlarını belirlemede serbesttir.
- **Enerji verimliliği:** Bu protokolü kullanan düğümler gerçekte herhangi bir veri almadan önce kanal aktivitesini kontrol etmek için kısa bir süre için uyanırlar ve LPL tekniği kullanırlar. Eğer kanal boş ise uyku durumuna girerler , aksi takdirde veri paketini alırlar. B-MAC gibi uzun işaret paketleri ile LPL tekniği kullanan bir kaç protokolden daha önce bahsedilmişti. Bu protokoller uzun işaret paketlerinden dolayı hedef olmayan düğümlerin bu işaretin bitimine kadar kanalı dinlemeleri gerekmeteydi. AREA-MAC ise daha kısa ve adaptif işaret paketlerini hedef adresi ve geri bildirim kombinasyonu ile birlikte kullanır. Bu durum uzun işaret kullanan protokollerdeki fazladan duymayı, enerji tüketimini ve her atlamadaki gecikmeyi azaltır. Komşu düğüm çok kısa bir süreliğine uyanır ve hedef adresi kontrol eder. Hedef düğüm hemen kaynak düğüme bir geri bildirim yapar ve böylece kaynak düğüm daha fazla işaret paketi göndermeyi durdurur ve veri paketlerini göndermeye başlar. Diğer hedef olmayan düğümler ise hemen uyku durumuna

giderler. Bu durum çarpışma olasılığını, boşta dinlemeyi ve fazladan duymayı minimize eder.

- **Gerçek zaman desteği:** Gerçek zaman verisi için kaynak düğümü uygun olan bir komşusundan normal uyanma zamanını gözardı ederek uyanmasını ister. Böylece hedef düğüm hemen uyanır ve geri bildirim gönderir. Bu komşu belirli bir gecikme, enerji seviyeleri, düğümler arasındaki uzaklık ve etraftaki komşu sayısı tarafından belirlenen bir maliyet hesabına göre seçilir. Eğer veriyi alan düğüm son hedef düğüm değilse veri paketlerini üst seviyedeki komşularına gönderir. Seviyeler toplayıcı düğümüne doğru artmaktadır.
- **Adaptiflik:** Gerçek zamanlı paket gönderimi talebi aldığı zaman, bir düğüm görev süresi belirleme değerini bu talep doğrultusunda adaptif bir şekilde ayarlar. Üyelerin küme başkanıyla konuştuğu küme tabanlı yaklaşımların aksine AREA-MAC sadece emsaller ile konuşur.

AREA-MAC çalışma prensibi aralıklı olarak kısa işaret paketleri gönderip hedef düğümü uyandırmaktır. Bu işaret paketleri bir kontrol aralığı süresince gönderilir. Bu aralık boyunca gönderilecek olan azami işaret paketi sayısının aşılması durumunda düğüm kısa uyku durumuna gider. AREA-MAC aynı zamanda uzun ve kısa olmak üzere iki uyku modu kullanır. Uyku modu ise veri transferi gerçekleşikten sonra bir düğümün bir sonraki uyanma zamanına kadar uyku durumuna geçmesidir ve bu süre kontrol aralığı zamanından kalan süre kadardır.

AREA-MAC kullanan tüm düğümler birbirlerinin uyuma/uyanma zamanlarından bağımsız olarak çalışır ve herhangi bir zaman eşlemesine ihtiyaç duymazlar. Düğümler LPL düşük güç dinleme tekniğini kullanarak çok kısa süreliğine uyanarak kanalda herhangi bir aktivite olup olmadığını anlamaya çalışır. Eğer kanal boş ise hemen uyku konumuna girerler ancak aksi takdirde veri alırlar. Düğümler içinde kaynak ve hedef adreslerini de barındıran kısa işaret paketleri gönderirler ve bununla birlikte bir geri bildirim kombinasyonuna sahiptirler. Komşu düğüm kısa süreliğine uyanır ve işaret (preamble) paketinin hedef adresini kontrol eder. Eğer işaret kendisine gönderilmiş ise hemen geri bildirim (preACK) ile cevap verir. Bu geri bildirim gönderici düğümün daha fazla

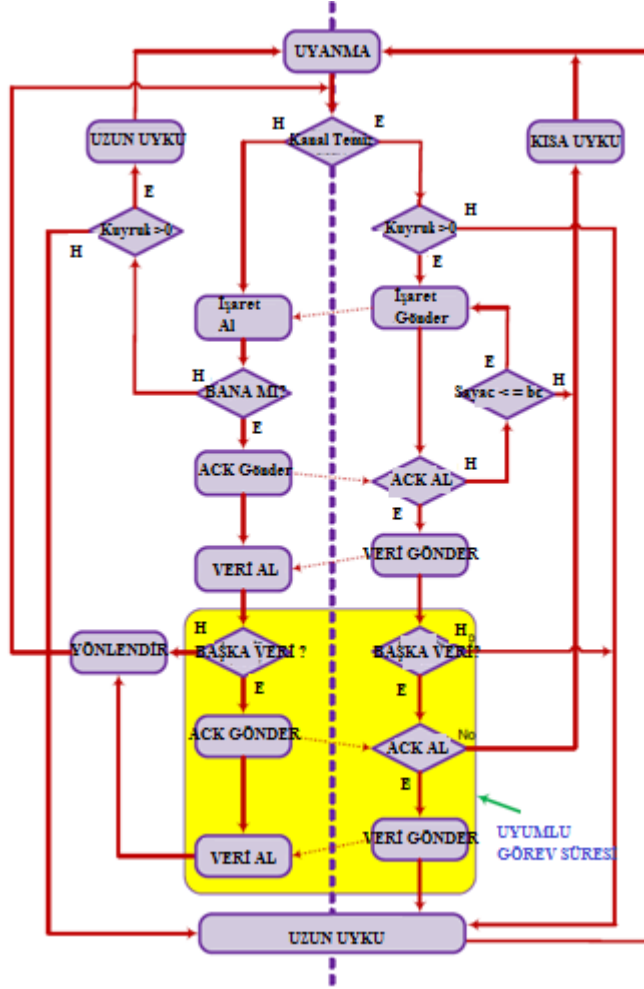
işaret paketi göndermesine son verir ve veri iletimi başlar. Hedef olmayan diğer tüm düğümler ise hemen uyku durumuna dönerler. Böylece boşa dinleme, çarpışma ve fazladan duyma gibi problemlerden kaçınılmış olur.

AREA-MAC kullanan düğümler eğer kuyruklarından bekleyen birden fazla veri paketi varsa protokol ard arda 2 veri paketi göndermelerine imkan tanır. Bu adaptif yapı veri paketlerinin içerisinde bulunan *moreToFollow* parametresine 1 değeri verilerek gerçekleşir. Bu parametreyi aktif bulan düğüm bir sonraki paketi alabilmek için uyuma zamanını adaptif olarak ayarlayabilir. Bu metod bazı avantajlar sağlamaktadır:

- Paket gecikmelerini azaltır. ( En azından ikinci paket için)
- Gönderilecek veya alınacak olan işaret paketi sayısını azaltır.
- Komşu düğümler için fazladan duymayı azaltır.
- Veri paketlerinin dayanıklılığını artırır.

Adaptif metod ile ardışık olarak gönderilebilecek olan veri paketi sayısı ikidir. AREA-MAC tasarımcıları bu sayının her ne kadar artırılabilir olsada toplayıcı düğüme yakın olan düğümlerin kuyruklarında veri sıkışmasına yol açacağını gecikmeleri arttıracığını ve komşu düğümlerin kanala erişiminin daha uzun süre engelleneceğini ileri sürmektedir. Ayrıca AREA-MAC gelen veri paketini en kısa zamanda gönderdiği için bir düğümün kuyruğunda ikiden fazla veri paketi bulunması olasılığının çok nadir olacağı öngörülmüştür.

AREA-MAC protokolünün akış diyagramı aşağıda detaylı bir biçimde verilmiştir ( Bkz. Şekil 3.9).



Şekil 3.9 AREA-MAC protokolü kullanan bir düğümün akış diyagramı.

AREA-MAC ayrıca düğümlerin yalnızca 1-hop komşuları ile veri alış verişi yapabilecekleri N1 yönlendirme metodu ile yalnızca 2-hop komşuları ile veri alışverişinde bulunabilecekler N2 yönlendirme metodlarını kullanır. Her düğümün N1 ve N2 komşuları düğümlerin kimlik numaralarına göre şu şekilde belirlenir:

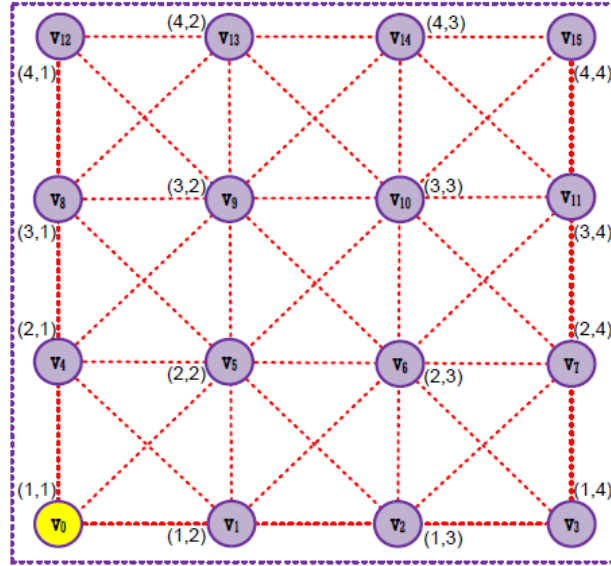
Toplayıcı düğüm  $V_0$  olmak üzere diğer normal düğümler  $V_1$ 'den  $V_N$ 'e kadardır. Koordinatı  $(x,y)$  olan üst seviye komşulardan herhangi biri aşağıdaki 3 koşulu sağladığı takdirde bir başka  $V_i$  düğümünün 1-hop komşuları ( $V_i^1$ ) arasında yer alır.

- 1)  $V_i^1(x) = V_i(x)$  ve  $V_i^1(y) = V_i(y-1)$
- 2)  $V_i^1(y) = V_i(y)$  ve  $V_i^1(x) = V_i(x-1)$
- 3)  $V_i^1(x,y) = V_i(x-1, y-1)$

Aynı şekilde koordinatı  $(x,y)$  olan üst seviye komşulardan herhangi biri aşağıdaki 3 koşulu sağladığı takdirde bir başka  $V_i$  düğümünün 2-hop komşuları ( $V_i^2$ ) arasında yer alır.

- 1)  $V_i^2(x) = V_i(x-2)$
- 2)  $V_i^2(y) = V_i(y-2)$
- 3)  $V_i^2(x,y) = V_i(x-2,y-2)$

Bu durumda örneğin  $V_{10}$  düğümünün 1-hop komşuları  $V_5, V_6, V_9$  olurken 2-hop komşuları  $V_0, V_1, V_2, V_4, V_8$  olur ( Bkz. Şekil 3.10).



Şekil 3.10 AREA-MAC ızgara topolojisi.

Bir sonraki bölümde deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere TDA'lar için tasarlanmış olan farklı benzetim ortamları özetlenmiş ve bunlardan bu tez çalışması için uygun olan bir tanesi seçilerek ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

## 4 MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde yapılan araştırmada kullanılan benzetim ortamı (OMNET++ ve Castalia) ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

### 4.1 Benzetim Ortamları

Son zamanlarda TDA'lara olan yoğun ilgi birbirinden farklı TDA benzetim araçları geliştirilmesini sağladı. TDA benzetiminin karmaşıklığı ve çeşitliliği özel bir amaç için doğru benzetim aracı seçimi problemini de beraberinde getirmiştir. Benzetim araçları genel olarak belirli bir TDA'nın yönlendirme, lokalizasyon, enerji tüketimi gibi belirli bir alanını hedef seğmiştir. Dahası her biri farklı başarımlar ve kullanım rahatlığı sunmaktadır. Bu yüzden özel bir benzetim yapmak gerekiyorsa bunun için uygun bir benzetim aracı bulmak için zaman harcamaya değer. Bu benzetim araçlarını genel olarak iki gruba ayırabiliriz; ilk grup özellikle TDA'lar için tasarlanmıştır ve diğer grup ise mevcut benzetim araçlarının TDA ile ilişkili özel eklentileri olan versiyonlarıdır. Bu benzetim araçlarından bazılarına aşağıda kısaca yer verilmiştir.

#### 4.1.1 NS2, SensorSim ve NRL

NS2 haberleşme ağları üzerine odaklanmış olan ve araştırmacılar tarafından kullanılan en popöler benzetim araçlarından biridir. NS2 bir giriş işlemine, veri analizine ve sonuç sunumuna sahip olan ayrıık olay tabanlı bir benzetim aracıdır. Otel yorumcusu ile birlikte C++ kodları ile yazılmış nesne yönelimli bir benzetim aracıdır. Her iki programlama dili benzetimleri kendi avantajlı özelliklerini kullanarak etkili bir biçimde yönetebilir. C++ protokollerin tanımında ve uygulanmasında geniş veri setleri üzerinde hızlı bir şekilde çalışmasını sağlarken, çalışma zamanı bu açıdan önemlidir, diğer bir yandan hataları bulma, düzeltme, derleme, tekrar çalıştırma gibi durumlar Otel dili tarafından daha avantajlı bir şekilde kontrol edilebilir. TDA ile ilişkili olarak direkt difüzyon ve S-MAC gibi bazı ad-hoc ve TDA protokollerini destekler. NS2 benzetim aracının TDA'larına özel SensorSim ve NRL isminde iki versiyonuda çıkmıştır fakat ikiside daha geniş bir başarı yakalayamamıştır. NS2, zayıf ölçeklenebilirlik, grafik arayüzü ve hata bulma zorluklarıyla rakiplerinin gerisinde kalmaktadır.

#### 4.1.2 Omnet++, SenSim, Castalia, Mixim ve PAWiS

NS2'ye benzer şekilde Omnet++, modüler bir yapıya sahip ayırık olay tabanlı bir ağ benzetim aracıdır. C++ ile geliştirilmiş, izleme ve hata ayıklama desteği ile birlikte güçlü bir kullanıcı arayüzüne sahiptir. TDA'lar için uygundur fakat çevre ve enerji modeli bakımından eksikleri vardır. Bu yüzden SenSim, Castalia ve Mixim gibi eklentili versiyonları geliştirilmiştir.

SenSim her katmandaki protokol yığını, düğüm donanımını ve iç mesaj geçişi yönetimi sunan düğüm seviyesinde modül desteği sağlayan Omnet++ tabanlı bir benzetim aracıdır.

Castalia, Omnet++ benzetim aracının TDA'lar için tasarlanmış olan eklentili bir diğer versiyonudur. Düğümün radyo haberleşmesi ve işlemci hesaplamaları gibi aktiviteleri ile ilişkili enerji tüketimini izleyebilen bir enerji modülü sunar. Enerji modülü tüketilen enerjiyi doğrusal olarak çıkararak bir fonksiyona sahiptir. Her bir saniyede bu fonksiyon çağırılır ve düğüm durumuna göre tanımlanan gücü çıkarır. Modül, iletim, alma ve uyku gibi 3 modu ayırt edebilir. Toplam enerji tüketimi toplam benzetim süresi ve güç moduna göre hesaplanır.

Mixim benzer şekilde Omnet++ tabanlı bir benzetim aracıdır. Farklı radyo dalga yayılımı, enterferans tahmini, radyo alıcı-verici güç tüketimi ve kablosuz MAC protokolleri modellerini içerir. Mobility framework-MF, Chanel Simulator-ChSim ve Positif framework gibi bir çok eski Omnet++ çerçevelerini bir araya getirir ve TDA benzetimleri için temel Omnet++ çerçevesi olarak amaçlanmıştır. Mixim bağlanabilirlik, hareketlilik, enerji tüketimi, kanal karakteristiği gibi fonksiyonları tanımlayan temel model ile lokalizasyon, MAC ve ağ protokollerini içeren protokol kütüphanesinin birleşiminden oluşur.

Enerji modülü bir arayüz ile diğer modüllerden mesajları alır ve tüketilen enerji ile ilgili cevap gönderir. Her modül tanımlanmış bir format içinde mesajlar kullanarak batarya modülü ile haberleşir. Sonra her düğümün herhangi bir aktivitesi spesifik bir enerji tüketimine sahip olabilir. Ayrıca düğümlerin enerjilerinin tükenmelerinden dolayı ölmelerinde destekler. Dahası, düğüm enerji ile ilgili bazı kararlar alabilmek için kalan enerji seviyesinde öğrenebilir.

TDA'lar için tasarlanmış bir diğer Omnet++ tabanlı benzetim aracı ise PAWiS'tir. PAWiS, CPU modülü, tüketim yönetim modülü, algılama modülü, haberleşme modülü ve kanal modülünü içerir. Enerji tüketimi donanım bileşenlerini temsil eden modüller tarafından gönderilen mesajlardan türetilir. Donanım operasyonları direkt olarak enerji modülüne bildirilir ve yazılım operasyonları CPU modülüne gönderilir, işlenir ve enerji tüketimi CPU modülü tarafından duyurulur.

### 4.1.3 J-Sim

J-Sim, JAVA ile geliştirilmiş bileşen tabanlı bir benzetim aracıdır. Bu nesne yönelimli NS2 ve Omnet++ benzetim araçları gibi her hangi bir ölçeklenebilirlik sorunu olmadığı anlamına gelir. TDA'nın detaylı bir modelini ve gerçekleştirmenin lokalizasyon, yönlendirme ve veri difüzyonu algoritmalarını içerir. Bu çerçevede düğümlerin 3 farklı tipini sağlar; algılayıcı düğüm, hedef düğüm, toplayıcı düğüm. Etrafındaki çevreyi algılama görevi hedef düğümler tarafından sensör kanalı üzerinden gerçekleştirilir. Algılayıcı düğümler bu bilgileri işler ve toplayıcı düğüme gönderir. Landmarklar pozisyonlarını bilen ve uygulama katmanında eklenmiş fonksiyonelliğe sahip genel düğümlerdir. Düğümler arasındaki sinyal yayılımı ve bağlanabilirlik kablosuz kanal içinde tanımlanmıştır. Hedef düğümü, fiziksel model ile gerçekte çevreyi temsil eden algılanmış veriyi üreten hedef ajansı içerir.

### 4.1.4 SENSE

SENSE bir ağ benzetim aracı ve öykünücüdür. J-Sim gibi haberleşmenin verimliliğini arttıran komponent yönelimli bir benzetim aracıdır. Asıl amacı genişletilebilir, tekrar kullanılabilir ve geniş ölçeklenebilir uygulama desteğidir. Bileşen yapısı kullanıcılara istekleri ve benzetim amacı doğrultusunda bir benzetim modeli inşaa etmelerine izin vermektedir. Böylece örneğin, ağ bileşeni daha basit bir model kullanmak için kaldırılabilir veya MAC katmanı meşgul olduğundan paketlerin bırakılıp bırakılmadığını anlamak için bir kuyruk bileşeni eklenebilir.

Enerji modeli dinamik batarya etkilerinin de göz önünde bulundurularak batarya modeli yardımıyla gerçekleştirilir. Güç modeli güç yönetiminden sorumludur ve farklı enerji tüketimleri ile 5 enerji modu destekler; gönderme, alma, boş, uyku, kapalı. Güç modeli, gerçek model ve basit model olarak ikiye ayrılan batarya modeli ile işbirliği içindedir. Basit modelde deşarj hızı bataryadan azalan güç ile orantılıdır. Gerçek batarya modelinde ise akım göz önünde bulundurulur ve yüksek akımlar bataryayı daha çabuk deşarj eder.

Yapılan çalışmada Omnet++ tabanlı Castalia benzetim aracı seçilmiştir. Uzun araştırmalar sonucunda kullanım kolaylığı, güzel bir şekilde hazırlanmış dökümantasyona sahip olması, kullanıcı sayısı ve kullanıcı grubu üzerinden verilen programlama desteğinden dolayı bu benzetim aracı uygun görülmüştür. Bir sonraki bölümde Omnet++ ve Castalia benzetim araçları detaylı olarak anlatılmıştır.

## 4.2 OMNET++

OMNeT++ haberleşme ağlarını, çoklu işlemcileri ve diğer dağıtık ya da paralel sistemleri modellemek için kullanılan C++ tabanlı bir ayrık durum benzetim aracıdır (OMNET++, 2013). OMNeT++ açık kaynak kodludur ve hem GNU (General Public License) lisansı altında hem de yazılımı kâr amacı olmayan kullanımlar için ücretsiz yapan kendine ait lisansı altında kullanılabilir. OMNeT++ bilgisayar ağlarının ve dağıtık ya da paralel sistemlerin simülasyonu için akademik, eğitsel ve araştırma amaçlı ticari kurumlar tarafından kullanılabilen güçlü, açık kaynak kodlu bir benzetim aracı olarak geliştirildi. OMNeT++ , ns ve onun pahalı ticari bir alternatifi olan OPNET gibi araştırma amaçlı ve açık kaynak kodlu olan benzetim araçları arasındaki boşlukları doldurmak için çalışır. OMNeT++ Unix sistemleri üzerinde ve Cygwin ya da Microsoft Sanal C++ derleyicisi kullanarak Windows üzerinde çalışır. Biz bu projede, Oracle Virtualbox sanal makinesi üzerinde çalışan Kubuntu sistemi üzerinde çalışacağız. OMNeT++ , Eylül 1997'den beri umumi kullanımlar için uygun olmasının yanısıra şimdiye kadar sahip olduğu oldukça geniş bir kullanıcı topluluğu vardır.

### 4.2.1 OMNET++ Tasarımı

OMNeT++ en başından beri ağ benzetimlerini desteklemek için tasarlandı. Bu görev, aşağıda belirtilen tasarım gereksinimlerine öncülük etmektedir.

- Geniş ölçekli benzetimleri mümkün kılmak için, benzetim modellerinin hiyerarşik olmaya ihtiyacı vardır ve mümkün olduğunca tekrardan kullanılabilir komponentlerden inşa edilmedilir.
- Benzetim programları uzun hata ayıklama / düzeltme periyotları için kötüdür. Bu yüzden, hata ayıklama zamanını düşürmek için benzetim yazılımı kolay izlenebilir olmanın ve hataların düzeltilebilmesinin önemine yer vermelidir.
- Benzetim yazılımı kendi kendine modüler, uyarlanabilir olmalı ve ağ planlama yazılımı gibi daha geniş uygulamaların içine benzetim modelleri yerleştirmeye izin verebilmelidir.

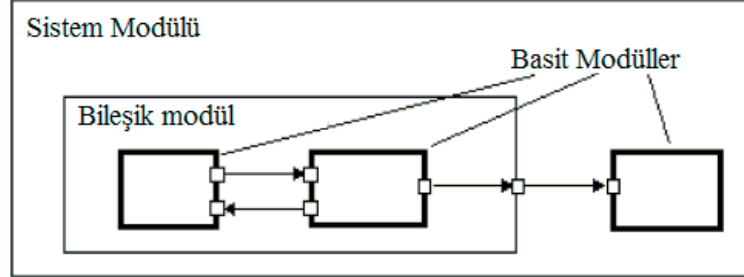
Veri arayüzleri açık olmalıdır: giriş ve çıkış dosyalarının genellikle uygun olan yazılım araçları ile üretilebilmesi ve işlenebilmesi mümkün olmalıdır.

### 4.2.2 Model Yapısı

Bir OMNeT++ modeli mesaj geçişi ile haberleşen modüllerden oluşur (Bkz Şekil 4.1). Aktif modüller *basit modüller* olarak adlandırılır ve C++ ile yazılmıştır. Basit modüller birleşik modüller şeklinde gruplandırılabilir ve hiyerarşi seviyelerinin sayısı sınırlı değildir. Basit ve birleşik modüllerin konsepti atomik ve birleştirilmiş modellerine benzerdir. Mesajlar ya modüller arasında köprü kuran bağlantılar üzerinden ya da direkt onların hedef modüllerine gönderilir.

Basit ve birleşik modüller, modül türlerine birer örnektir. Modeli tanımlarken, kullanıcı modül türünü tanımlar; bu modül türlerinin örnekleri daha kompleks modül türleri için komponent olarak kullanılır. Son olarak kullanıcı sistem modülünü oluşturur. Bir modül türü inşa bloğu olarak kullanıldığı zaman,

onun basit veya birleşik bir modül olduğuna dair bir ayırım yoktur. Bu kullanıcıya açık bir şekilde basit bir modülü bir birleşik modül içerisinde birkaç basit modüle ayırmasına izin verir. Bunun tersi de mümkündür.



Şekil 4.1 OMNeT++ model yapısı.

Modüller isteğe bağlı veri içerebilen mesajlar ile haberleşir. Basit modüller tipik olarak mesajları kapılar (gates) üzerinden gönderir fakat direkt olarak onun hedef modülüne göndermek de mümkündür. Kapılar modüllerin giriş ve çıkış arayüzleridir. Mesajlar çıkış kapıları üzerinden gönderilir ve giriş kapıları üzerinden alınır. Bir giriş ve bir çıkış kapısı bir bağlantı ile birbirine bağlanabilir. Bağlantılar tek seviye modül hiyerarşisi içerisinde oluşturulur. Bir birleşik modül içerisinde iki alt modülün birbirine karşılık gelen kapıları veya bir altı alt modül kapısı ile bir birleşik modülün kapısı birbirine bağlanabilir. Modelin hiyerarşik yapısından dolayı mesajlar bir bağlantı zinciri üzerinden yol alır. Birleşik modüller model içerisinde karton kutular ("cardboard boxes") gibi davranır. Açık bir şekilde mesajları onun iç ve dış dünyası arasında nakleder. Bağlantılara yayılım gecikmesi, veri hızı, bit hata oranı gibi özelliklerde tahsis edilebilir.

Modüller parametrelere sahip olabilir. Parametreler temel olarak yapılandırma verisini basit modüllere aktarmak için kullanılır ve model topolojisini tanımlama da yardımcı olur. Parametreler string, numeric veya pointer değerler olabilir. Parametreler değere göre veya referansa göre geçebilir. Referans ile alınan parametreler benzetim çalışması sırasında global model parametresi değişimlerini yaymak için kullanılabilir. Bu teknik parametre optimizasyonu gibi kesin benzetim senaryoları için çok kullanışlı olabilir.

### 4.2.3 NED Dili Tasarımı

Kullanıcı model yapısını (modüller ve onların ara bağlantıları) OMNeT++ topoloji tanımlama dili NED içinde belirler. Tipik bir NED tanımının bileşenleri basit modül bildirimleri, bileşik modül tanımları ve ağ tanımlarıdır. Basit modül bildirimleri, modül arayüzünü tanımlar (kapılar ve alt modüllerin tanımını ve onların ara bağlantılarını içerir. Bir ağ tanımı temelde bir modül türüne örnek olarak bir modeli tanımlar. Ayrıca NED büyük NED dosyalarını, dosya dahil etme yoluyla daha küçük olanlara ayırmayı destekler.

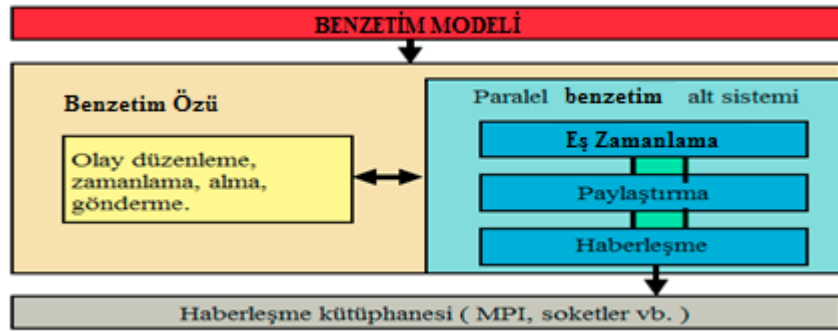
OMNeT++ paketi NED 'i yerel dosya formatı olarak kullanan bir grafik editörü içerir. Dahası, NED kodu elle yazılmış olsa bile editör keyfi çalışabilir. Editör tam olarak iki yönlü bir araçtır, kullanıcı ağ topolojisini grafiksel olarak veya NED kaynak görünümü içinde düzenleyebilir ve her an bu iki görünüm arasında dönüşüm yapılabilir. NED, bildirim yapan (declarative) bir dildir ve bir bileşik modülün iç yapısını tanımlamak için zorunlu emreden (imperative) bir programlama dili kullanmaz.

Bir çok grafik editörü sadece sabit topolojilerin oluşturulmasına izin verir. Ancak, NED topolojileri parametrelenebilir kılan (ring, grid, star, tree, hypercube gibi genel düzenli topolojiler oluşturmayı mümkün kılan) bildirimli yapılar içerir. Parametrelenebilir topolojiler ve ilişkilendirilmiş tasarım örnekleri 1997 ve 1998 yıllarında Varga ve Pongor tarafından incelenmiştir. Parametrelenmiş topolojiler ile NED bir çok benzetim senaryosu için oldukça kullanışlı hale gelir.

NED dili birebir XML ile eşlenebilir. Grafiksel editör XML dosyalarının export ve import edilmesi yeteneğine sahiptir. XML, uygulamalar arasında yapısal bilginin değişimi için hızlı bir şekilde tercih edilen bir yol haline gelmiştir. NED için geçerli olan bir XML varlığı OMNeT++ ve diğer sistemler arasında arayüz oluşturmak için büyük fırsatlar oluşturur. Örneğin, ağ yönetim programı tarafından SQL veritabanı içerisine kaydedilen bir ağ topolojisi OMNeT++ içerisinde iki adım ile ifade edilebilir. Birinci adımda topoloji verisi veritabanından XML formatında çıkartılır. İkinci adımda ise, elde edilen XML bir XML dönüştürücüsü ile NED XML formatına dönüştürülür. Her iki adım için genel olarak kullanıma hazır XML araçları vardır.

#### 4.2.4 Paralel Benzetim Desteği

OMNeT++ ayrıca paralel benzetim alıştırma desteğine sahiptir. Çok geniş benzetimler, hız arttırarak ya da hafıza gereksinimlerini paylaştırarak dağıtık benzetim özelliğinden yararlanabilirler. Eğer benzetim birkaç gigabit hafızaya ihtiyaç duyarsa, bu hafızayı bir küme üzerinde dağıtmak onu çalıştırmanın tek yolu olabilir. Hızı arttırmak için ise, donanım veya küme düşük gecikmeye sahip olmalıdır ve model doğal paralelliğe sahip olmalıdır. Paylaştırma ve diğer yapılandırma INI dosyası içerisinde yapılandırılabilir. Benzetim modeli kendiliğinden değiştirilmeye ihtiyaç duymaz. Haberleşme katmanı MPI'dir fakat konfigüre edilebilirdir, böylece eğer kullanıcı MPI'ye sahip değilse boru (pipes) olarak adlandırılan kısımlar üzerinde bazı temel testler çalıştırabilir. Paralel benzetim özünün lojik mimarisi aşağıda verilmiştir (Bkz. Şekil 4.2).



Şekil 4.2 OMNeT++ Paralel benzetim özü lojik mimarisi.

#### 4.3 Castalia Benzetim Aracı

Castalia, Telsiz Duyarga Ağları (TDA), Body Area Ağları (BAN) ve genellikle düşük güç aygıtlardan oluşan ağlar için tasarlanmış bir benzetim aracıdır (Castalia, 2013). Temeli OMNeT++ platformuna dayanır ve özellikle radyoya erişim ile ilişkili olan gerçekçi bir düğüm davranışı ile gerçekçi telsiz kanalı ve radyo modelleri içerisinde kendi dağıtık algoritmalarını veya protokollerini test etmek isteyen araştırmacı ve geliştirmeciler tarafından kullanılabilir. Castalia, spesifik uygulamalar için farklı platform karakteristiklerini hesaplamak içinde kullanılabilir çünkü son derece parametrikdir ve bir çok platformun benzetimini gerçekleştirebilecek kadar kapsamlıdır.

Castalia'nın temel özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Deneysel olarak ölçülmüş veri temelli ileri **kanal modeli**.
  - Model basit olarak düğümler arasındaki bağlantıları değil, bir path loss haritası tanımlar.
  - Path loss'un zamana bağlı değişimi için kompleks model.
  - Düğümlerin hareketliliğini tamamen destekler.
  - Enterferans ayrı bir özellik olarak değil, algılanan sinyal gücü (RSS) olarak ele alınır.
- Düşük güç haberleşme için gerçek radyo temelli ileri **radyo modeli**.
  - SNR-BER eğrisini tanımlayarak, SINR temelli resepsiyon olasılığı, paket büyüklüğü, PSK - FSK destekli modülasyon tipi, özel modülasyona izin verildi.
  - Bireysel düğüm değişimleri ile çoklu TX güç seviyelerine izin verildi.
  - Farklı güç tüketimleri ile birlikte durumlar (states) ve onlar arasında anahtarlanan gecikmeler.
  - Taşıyıcı hissetme (carrier sensing) ve RSSI 'nin gerçeğe uygun modellemesi.
- Genişletilmiş **algılama** modellemesi biçimlendirme.
  - Oldukça esnek fiziksel yöntem modeli.
  - Algılama aygıt gürültüsü, eğilimi ve güç tüketimi.
- Düğüm **saat sapması** (clock drift)
- Mevcut MAC ve yönlendirme protokolleri.
- Adaptasyon ve ilerleme için tasarlandı.

Kullanıcılar, benzetim aracının sağladığı özellikleri kullanırken kendi algoritma ve protokollerini de Castalia içerisinde kolayca uygulayıp ifade edebilirler. Modülerlik, güvenilirlik ve Castalia'nın hızı kısmen OMNeT++ tarafından etkin hale getirilmiştir.

Castalia belirli bir sensör platformuna özgü değildir. Castalia bir algoritmanın spesifik bir sensör platformu üzerinde yaşama geçirilmeden önce ilk durum geçerliliği için kapsamlı, güvenilir ve gerçekçi bir sistem yapısı sağlar. Castalia belirli bir sensör platformu için derlenmiş olan bir kodu test etmek

isteyen birisi için yararlı değildir. Bu tür kullanımlar için Avrora gibi benzetim araçları mevcuttur.

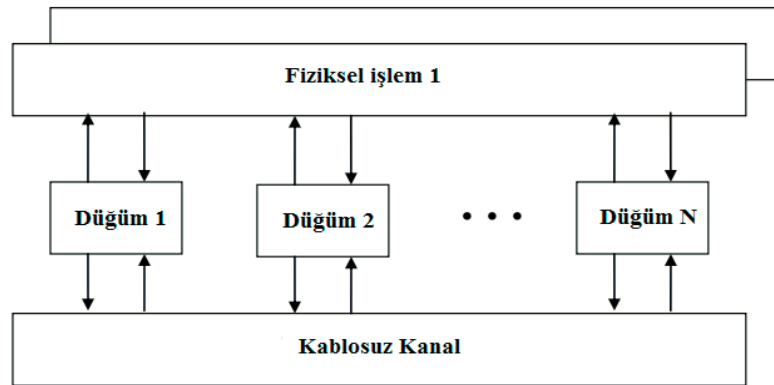
### 4.3.1 Genel Bakış

Castalia ile kendi protokollerimizi veya algoritmalarımızı tasarlayabilmek için öncelikle OMNeT++ 'ın temel konseptlerini anlamış olmamız gerekiyor çünkü Castalia temelinde OMNeT++ 'ı kullanır.

OMNeT++ 'ın temel konseptleri modüller ve mesajlardır. Basit bir modül uygulamanın en temel ünitesidir. O, diğer modüllerden veya kendi kendinden mesajları kabul eder ve bu mesajlara göre bir parça kod çalıştırır. Kod, mesajlar alındığında değişen durumunu koruyabilir ve yeni mesajlar gönderebilir. Ayrıca bileşik modüller vardır. Bir bileşik modül tam anlamıyla basit ve/veya diğer bileşik modüllerin inşasıdır.

### 4.3.2 Yapısı

Castalia'nın temel modül yapısı aşağıdaki diagram içerisinde gösterilmiştir (Bkz Şekil 4.3).



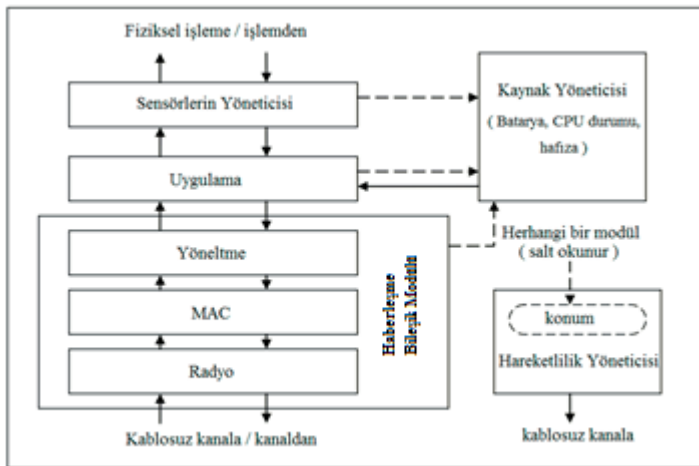
Şekil 4.3 Castalia içerisindeki modüller ve bağlantıları.

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi düğümler birbirlerine direkt bağlı değildirler fakat kablosuz kanal modül veya modülleri üzerinden birbirleri ile

bağlanırlar. Ok işaretleri ise bir modülden diğer bir modüle mesaj geçişlerini belirtmektedir. Bir düğüm göndereceği bir pakete sahip olduğu zaman, bu paket onu hangi düğümlerin alması gerektiğine karar veren kablosuz kanala gider. Düğümler ayrıca izledikleri / gözlemledikleri fiziksel işlemler üzerinden de birbirleri ile bağlanabilirler. Her fiziksel işlem için o fiziksel işlemin sunduğu nicelik üzerindeki “ gerçeği ” tutan bir modül vardır. Düğümler kendi sensör ölçümlerini alabilmek için fiziksel işlemi uzay ve zaman içerisinde örneklerler. Bir düğümün sahip olduğu bir çok algılama aygıtını temsil eden bir çok fiziksel işlem olabilir.

Düğüm modülü bileşik bir modüldür (Bkz Şekil 4.4). Kesiksiz ok işaretleri mesaj geçişini belirtmektedir ve kesikli ok işaretleri basit fonksiyon çağırımını belirtmektedir. Örneğin; modüllerin çoğu tüketilen enerjiyi bildirim için kaynak yöneticisinin bir fonksiyonunu çağırır. Uygulama modülü kullanıcının genel olarak en çok değiştireceği modüldür, genellikle yeni bir algoritmayı hayata geçirmek için yeni bir modül oluşturulur. Haberleşme MAC ve yönlendirme modülleri hareketlilik yöneticisi modülü kadar kullanıcının değişiklikleri için iyi birer adaydırlar.

Castalia uygun abstract sınıflarını tanımlayarak kendi protokollerimizi veya uygulamalarımızı inşa etmemiz için destek sunar. Mevcut olan tüm modüller bir çok parametre tarafından oldukça ayarlanabilirlerdir.



Şekil 4.4 Düğüm bileşik modülü.

Yukarıdaki şekillerin içerisinde tarif edilen yapı Castalia içerisinde OMNeT++ NED dili kullanılarak uygulanmıştır. Bu dil sayesinde kolaylıkla modüller tanımlayabiliriz. Örneğin; modül ismi, modül parametreleri ve modül arayüzü (giriş ve çıkış kapıları) ve olası alt modül yapısını (eğer bileşik bir modülse). Uzantısı “ .ned ” ile biten dosyalar NED dili kodunu içerir. Castalia yapısı ayrıca kaynak kodu içerisindeki klasörlerin hiyerarşisi içinde de yansıtılmıştır. Her modül, her zaman bir modülü tanımlayan bir .ned dosyasını içeren bir klasöre karşılık gelir. Eğer modül bileşik bir modülse, alt modülleri tanımlayan alt klasörler mevcuttur. Eğer basit bir modülse, onun davranışlarını tanımlayan bir C++ kodu (.cc, .h dosyaları) mevcuttur. NED dosyalarının bu tamamlanmış hiyerarşisi Castalia benzetim aracının baştan sona tüm yapısını tanımlar. Normalde kullanıcı bu dosyalarda değişiklik yapmayacaktır. Yine de, bu dosyalar dinamik olarak yüklenir ve işlenir. Böylece herhangi bir değişikli Castalia'nın tekrardan derlenmesini gerektirmez (yeni fonksiyonelliği ile birlikte yeni basit modüller belirene kadar).

Benzetim, özellikle haberleşme ağları gibi karmaşık olan bir sistemin analizi için çok kullanışlı, hızlı ve ucuz bir yöntemdir. En önemlisi tasarım aşamasında sistemin başarımını tahmin etmede yardımcı olur. Bilgisayar tabanlı bir çok sistem tasarlanan konu ile ilgili diğer alternatifleri kıyaslama imkanı sunan benzetimler ile analiz edilir. Dahası sistem çok çeşitli iş yükü altında çalıştırılıp analiz edilebilir. Sistemin bir diğer değerlendirme yöntemi ise gerçek deneysel çalışmalardır ve normal şartlar altında her iki yönteminde bir araya getirilmesi gerekir. Fakat benzetim ortamında yapılacak olan çalışmalar ile kıyaslandığında maliyet açısından oldukça külfetlidir. Bu yüzden bu tez çalışmasında yalnızca benzetim boyutunda analizler yapılmıştır.

Daha önce avantajları ve dezavantajları ile TDA'lar için tasarlanan farklı MAC yaklaşımlarına değinilmişti. Bu tez çalışmasının bir sonraki bölümünde, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere enerji tüketimi ve gecikme bakımından oldukça verimli olduğunu düşünülen AREA-MAC protokolü incelenecek, artan düğüm sayıları ile birlikte farklı senaryolar altında denemeler yapılacaktır.

## 5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu bölüm iki ana kısımdan oluşmaktadır: ilk kısımda bir önceki bölümde anlatılmış olan AREA-MAC, benzetim ortamında çalıştırılmış ve ağ başarımları parametreleri çıkarılmıştır. Ağ başarımları - enerji tüketimi, gecikme ve paket teslim oranı olarak farklı düğüm sayısı ve farklı topolojiler için incelenmiştir. Bu çalışma sırasında, özellikle çizgisel topoloji için başarımları düşürecek bazı durumlar ve nedenler tespit edilmiş ve ikinci kısımda onların çözümleri önerilmiştir. Böylece ikinci kısımda, çizgisel topolojiler için önerdiğimiz yeni bir MAC protokolü sunulmuştur ve onun benzetim ortamındaki sonuçları gösterilmiştir.

### 5.1 Benzetim Kurulumu

AREA-MAC protokolü Omnet++ benzetim ortamı tabanlı Castalia benzetim aracı ile çalıştırılmıştır. Bir önceki bölümde Omnet++ ve Castalia benzetim aracının detaylı olarak model yapısı ve çalışma mantığı anlatıldı. Aşağıda benzetim için gerekli olan yapılandırma parametreleri verilmiştir (Bkz. Çizelge. 5.1)

BENZETİM PARAMETRELERİ		
Katman	Parametre	Değer
Genel	Benzetim Süresi	1800s
	Düğüm Sayısı	16,36,64,100,144,196,256 ( Izgara) 16,36,64 ( Doğrusal)
	Topoloji	Izgara(Grid), Doğrusal(Line)
Uygulama	Veri Paketi Üretim Aralığı	75s
	Veri Paketi Üretim Sapması	45s
	Paket Büyüklüğü	42 bayt
	Gecikme Sınırı	Yok
MAC	Azami Kuyruk Büyüklüğü	10
	İşaret Hamle Sayısı	61
	Varsayılan Paket Sınırı	2
	ACK paketi büyüklüğü	12 byte
	İşaret Paketi Büyüklüğü	14 byte
	Kontrol aralığı	1000ms
	Uzun Uyku	1000ms
	Kısa Uyku	1ms
Fiziksel	Kullanılan Radyo	CC1000 & CC 2500
	İletim Gücü	0 - 10 dBm
	CCA Eşik Seviyesi	-90 dBm (1000) & -83dBm (2500)
	Veri Hızı	19.2 Kbps (1000) & 500kbps (2500)
	Sembol Başına Gönderilen Bit	1

Çizelge 5.1 Benzetim parametreleri

Yukarıda belirtilen benzetim parametreleri doğrultusunda 1 baytlık veriyi iletebilmek için gereken süre şu şekilde hesaplanmaktadır.

Transmisyon Süresi:

$$TX\_TIME(x) = (\text{phyLayerOverhead} + x) * 1 / (1000 * \text{phyDataRate} / 8.0)$$

1 Veri Paketi iletim süresi:

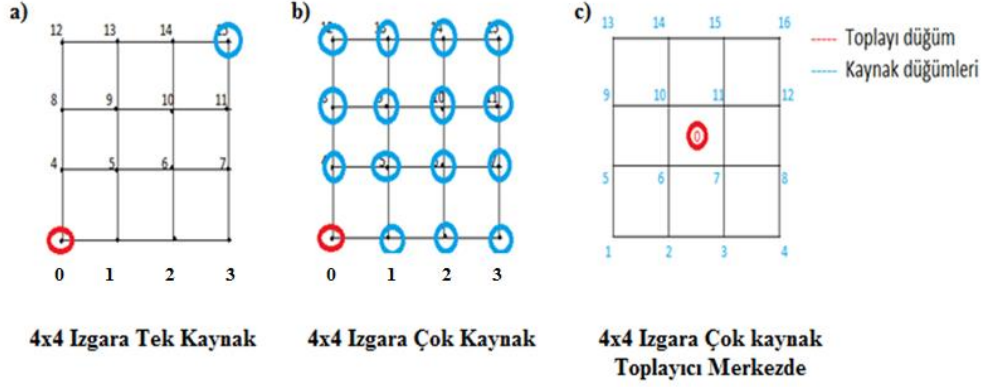
$$T_{\text{işaret}} + T_{\text{ack}} + T_{\text{veri}} + T_{\text{txrx}} + T_{\text{rxtx}}$$

Ayrıca uygulama katmanında kaynak düğümleri 75 saniyede bir 45 saniyelik bir sapma ile veri paketi üretilip ağ katmanına göndermektedirler.

## 5.2 Deneysel Bulgular

Bu çalışmada genel olarak 4 farklı yönlendirme metodu kullanılmıştır; düğümlerin yalnızca birinci seviye komşularına veri paketi gönderdikleri “*N1 Yönlendirme*”, yalnızca ikinci seviye komşulara gönderildiği “*N2 Yönlendirme*”, hem birinci hem de ikinci seviye komşulara gönderildiği “*N1&N2 Yönlendirme*” ve tüm komşuların paketi alabildiği “*N0 yönlendirme*” (broadcast).

İlk olarak Castalia benzetim aracında programlanmış olan AREA-MAC protokolünün doğruluğunu ispatlamak için basit bir senaryo hazırlandı ve bu senaryoda ızgara topolojisi kullanılarak 1 kaynak düğümü ile bir toplayıcı düğüm birbirine zıt en uç noktalara yerleştirilerek sonuçlar elde edildi. Daha sonra aynı topoloji için toplayıcı düğüm köşede olmak üzere diğer tüm düğümler kaynak düğümü haline getirildi, son olarak da yine ızgara topolojisi için çok sayıda kaynak düğümü kullanılarak toplayıcı düğüm merkeze kaydırıldı (Bkz. Şekil 5.1). Bu senaryoların tamamında paketler yayın (broadcast) tarzında yani N0 yönlendirme ile gönderilmektedir.

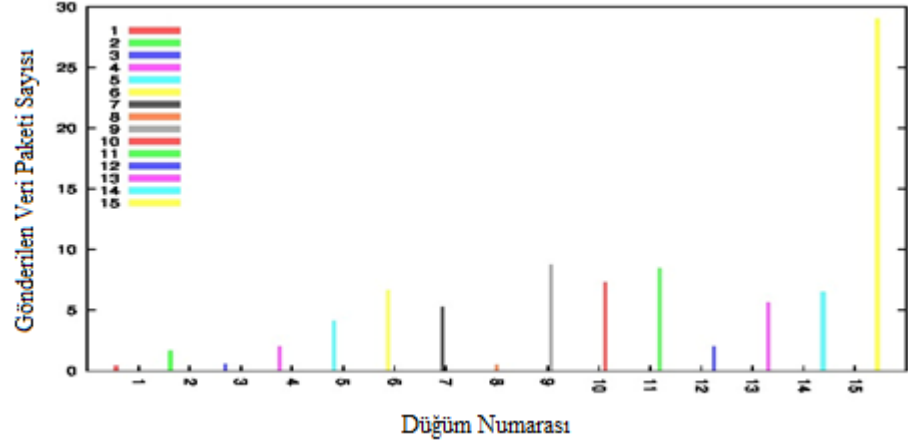


Şekil 5.1 Izgara topolojisi için tek kaynak ve çok kaynak senaryoları.

### 5.2.1 Senaryo A - Izgara Topolojisi Tek Kaynak Senaryosu

Bu senaryoda “N0 yönlendirme” metodu kullanılmıştır. Kuyruğunda (buffer) gönderecek bir veri paketi olan düğüm işaret paketini yayımlar. Yayınlanan işaret paketini alan ilk düğüm “preACK” paketi ile cevap verir ve akabinde veri paketi gönderilir. Bu bir yayın (broadcast) senaryosu olduğu için işaret paketini alan düğüm 1-level, 2 level komşu olup olmadığına veya lokasyonuna bakmaksızın cevap verir.

Sadece 15 numaralı düğüm paket üretmektedir. 1800 saniyelik bir benzetim süresi içerisinde ortalama 60 saniyede bir paket üretilmiş ve toplamda yaklaşık olarak 29-30 adet veri paketi üretilmiştir. Kaynak düğümü olan 15 numaralı düğüm toplam 29 adet veri paketi üretmiş ve bunların hepsini başarılı bir şekilde iletmıştır (Bkz. Şekil 5.2). Kaynak düğümü tarafından gönderilen bu paketler yayın (broadcast) senaryosu dahilinde genel olarak 1-level ve 2-level komşuları tarafından alınabilir. Benzetim yapılandırma dosyası olan omnetpp.ini dosyasındaki parametrelerle ve grid topoloji biçiminde yerleştirilen düğümler arasındaki mesafe yaklaşık 26 metre civarında belirlenerek haberleşme menzili azami 2 hop komşular ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.2 Gönderilen veri paketi sayısı

```
SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile =
"../Parameters/Radio/CC1000.txt"
```

```
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "10dBm"
```

```
SN.node[*].Communication.Radio.CCAthreshold = -90.0
```

Aşağıda 0 ve 1 numaralı düğümlerin örnek olarak koordinatları verilmiştir.

```
SN.node[0].xCoor = 0
```

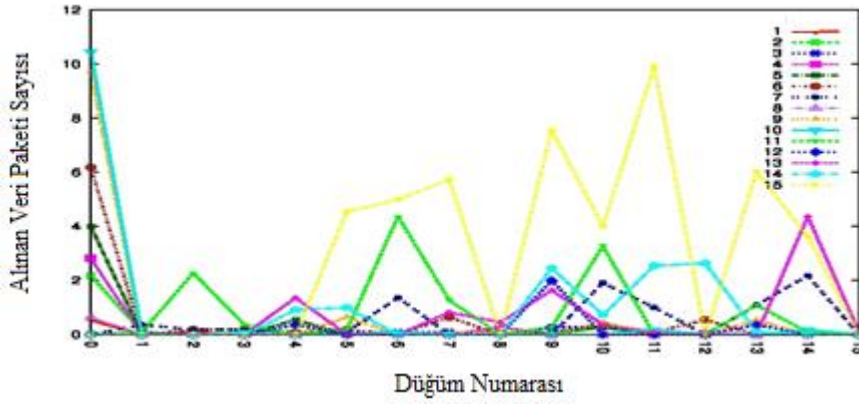
```
SN.node[0].yCoor = 0
```

```
SN.node[1].xCoor = 26
```

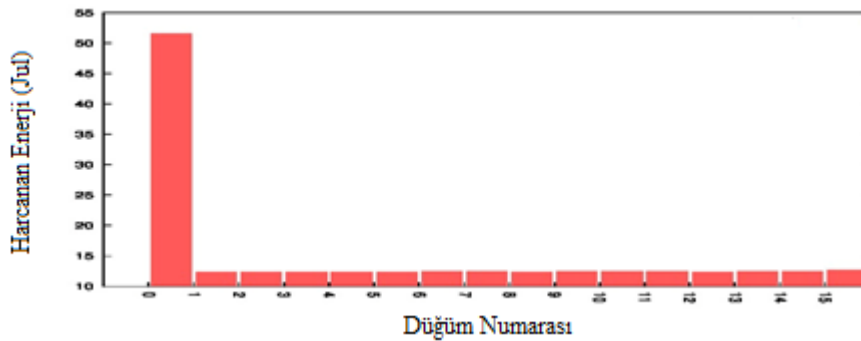
```
SN.node[1].yCoor = 0
```

15 numaralı kaynak düğümü yuvarlak noktalı sarı ile gösterilmiş ve genel olarak 5,6,7,9,10,11,13,14 numaralı düğümler bu düğümden veri paketi almışlardır ( Bkz. Şekil 5.3). Çünkü bu düğümler 15 numaralı kaynak düğümünün 1-level ve 2-level komşularıdır. Aynı şekilde 0 numaralı toplayıcı düğümün 1-level ve 2-level komşuları olan 1,2,4,5,6,8,9 ve 10 numaralı düğümler toplayıcı düğüme veri paketleri iletebilmişlerdir. Yine 0 numaralı kaynak düğümünün 1-level ve 2-level komşularından almış olduğu veri paketleri sayılarının toplamı neredeyse 15 numaralı kaynak düğümünün ürettiği paket sayısı kadardır.

“0” numaralı kaynak düğümü genel olarak RX state içerisinde bulunduğundan en çok enerji tüketen düğüm olmuştur. Fakat bu düğümün enerji bakımından herhangi bir sınırlamasının yoktur ve bu durumu ihmal edilmiştir. AREA-MAC protokolünün algoritmasına göre düğümler genellikle uyku durumunda olduklarından neredeyse tüm düğümler eşit miktarda enerji tüketmişlerdir (Bkz. Şekil 5.4). Her ne kadar gönderilen işaret paketi sayıları bazı düğümlerde çok olsa dahi işaret paketleri çok kısa olduklarından ve veri transferinin hemen ardından kuyrukların (buffers) boş olması gibi durumlarda uyku moduna geçtiklerinden enerji verimlilikleri yüksek olmuştur. Bu durumun oluşmasındaki en önemli faktörlerden ikisi AREA-MAC protokolünün short-sleep ve long-sleep gibi iki konsepti kullanıyor olmasıdır. Diğer bir unsur ise B-MAC gibi çok uzun işaret paketi kullanan protokoller ile kıyaslandığında AREA-MAC'in daha kısa işaret paketleri kullanıyor olmasıdır.



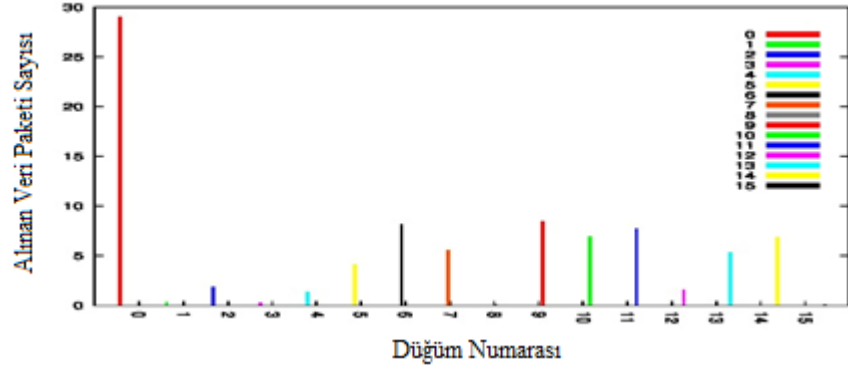
Şekil 5.3 Her düğümün almış olduğu veri paketleri.



Şekil 5.4 Harcanan enerji

Her bir düğümün başarılı bir şekilde application seviyesinden almış oldukları veri paketi sayısı elde edildi, 0 numaralı toplayıcı düğüm, 15 numaralı

kaynak düğümünün üretmiş olduğu ve yayınladığı 29 paketin tamamını başarılı bir şekilde application seviyesinde almıştır (Bkz. Şekil. 5.5) Bu da bize neredeyse %100'lük bir PDR (paket teslim oranı) değeri vermiş olur. Bu sonuçlardan hangi düğümlerin veri paketlerini daha çok yönlendirdikleri anlaşılabilir. 15 numaralı kaynak düğümünün 1-level ve 2-level komşuları olan 5,6,7,9,10,11,13,14 numaralı düğümler en çok veri paketi ileten düğümlerdir.



Şekil 5.5 Alınan veri paketleri sayısı

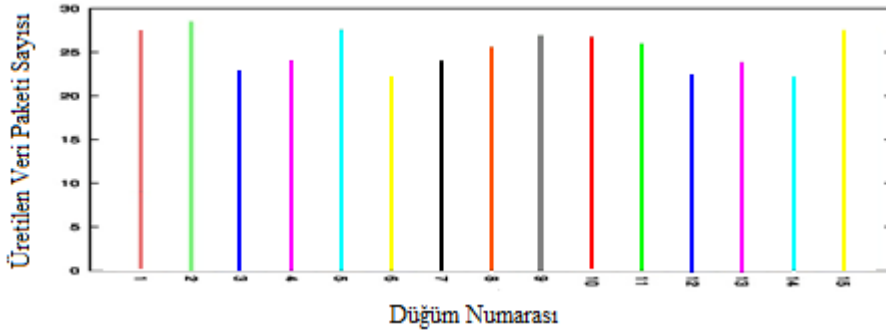
### 5.2.2 Senaryo B - Izgara Topolojisi Çok Kaynak Senaryosu

Daha önceki senaryo A'da sadece tek bir kaynak düğümü 1800 saniyelik bir benzetim süresince yaklaşık olarak 29 adet veri paketi üretmiş ve bunu ara düğümler vasıtasıyla toplayıcı düğüme iletmisti. Bu durumda veri trafiği hızı çok yüksek olmamakla birlikte toplayıcı düğüme en uzak noktada olan köşe düğümünün veri paketlerini başarılı bir şekilde iletip iletemediği gözlemlendi. Şimdiki senaryoda ise tek bir kaynak düğümü yerine toplayıcı düğüm haricindeki tüm düğümler veri paketi üretmekte ve iletmektedirler. Yani ağda bulunan tüm düğümler veri üretimi, transmisyonu ve yönlendirmesi görevini üstlenmişlerdir. Her bir düğümün veri paketi üretmesi veri trafiği hızını arttırarak daha kompleks yapıda bir ağ oluşturulmuştur. "Poisson dağılımı" olasılık kuramı ve istatistik bilim kollarında bir ayrık olasılık dağılımı olup, bir olayın belli bir sabit zaman birim aralığında meydana gelme sayısının olasılığını ifade eder. Her bir düğüm poisson dağılımına göre 75 saniyede ve 45 saniyelik bir sapma ile veri paketi üretmektedirler. Bu durumda her bir düğüm 30 ile 120 sn arasında değişen veri üretim hızlarına sahiptirler. Böylece 1800 saniye içerisinde her bir düğümün üretmiş olduğu paket sayısı birbirinden farklı olmaktadır. Üretilen veri paketleri sayısı ilerleyen bölümlerde grafik üzerinde gözlemlenebilecektir. Bu bölümde

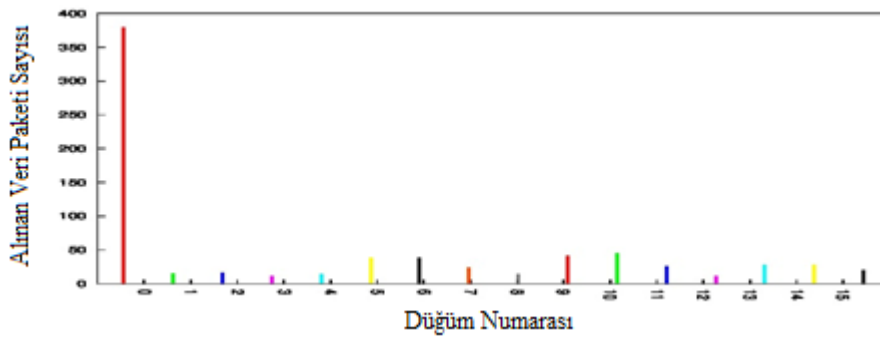
değişken veri paketi üretim hızının yanı sıra, grid topoloji üzerinde ağda bulunan toplam düğüm sayısı 16,36,64,100,196,256 şeklinde arttırılarak denemeler yapılmıştır. Şimdi bu denemelere ait sonuçların herbirini tek tek inceleyebiliriz.

### 5.2.2.1 16 Düğüm Çalışması

Bu senaryoda her düğüm ortalama 26 veri paketi üretmiştir. Bu toplamda  $26 \times 15 = 390$  paket üretilmesi demektir (Bkz. Şekil 5.6). Ayrıca “0” numaralı toplayıcı düğüm yaklaşık 390 veri paketi almıştır (Bkz. Şekil 5.7). Bu bize %99'a yakın bir PDR oranı verir. PDR, ağda üretilen toplam paket sayısının toplayıcı tarafından başarılı olarak alınan paket sayısına oranı olarak hesaplanır.



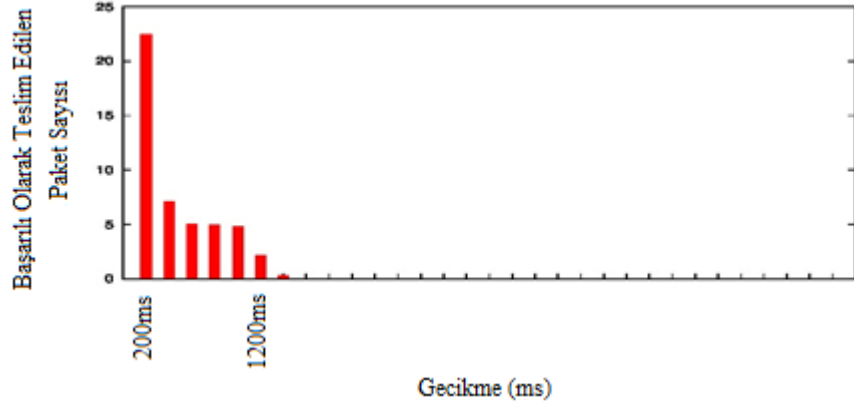
Şekil 5.6 Uygulama katmanında üretilen paketler



Şekil 5.7 Alınan veri paketleri sayısı

AREA-MAC protokolünde uygulama seviyesindeki gecikmeyi en çok etkileyen parametre kontrol aralığı parametresidir. Çünkü düğümler her bir kontrol aralığı süresi sonunda uyanır, kanal taraması yapar ve uygun koşullar oluştuğu takdirde, örneğin kuyruğunda herhangi bir veri paketi varsa bunu iletmek

için bir dizi kısa işaret paketleri göndermeye başlar. Dolayısıyla her düğüm neredeyse 1000ms olan kontrol aralığı süresi içerisinde veri paketlerini iletebilme imkanına sahip olur. Bu yüzden grafikte görüldüğü gibi gecikme genel olarak 0 ile 200ms arasında olmakla birlikte neredeyse tamamen 1000 ms altındadır (Bkz.Şekil 5.8).

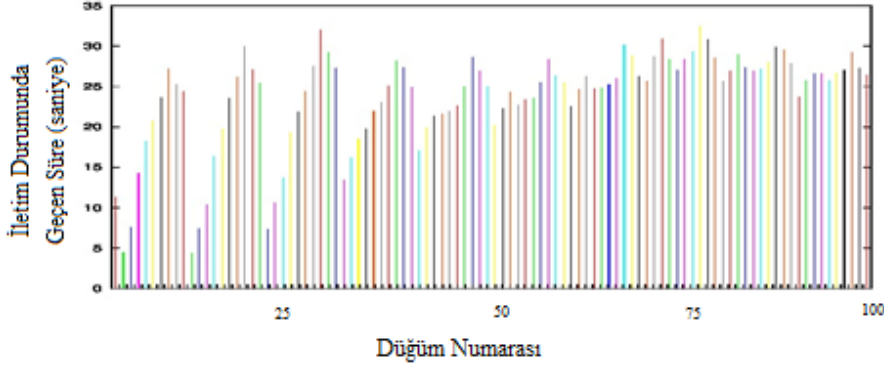


Şekil 5.8 Uygulama seviyesindeki gecikme

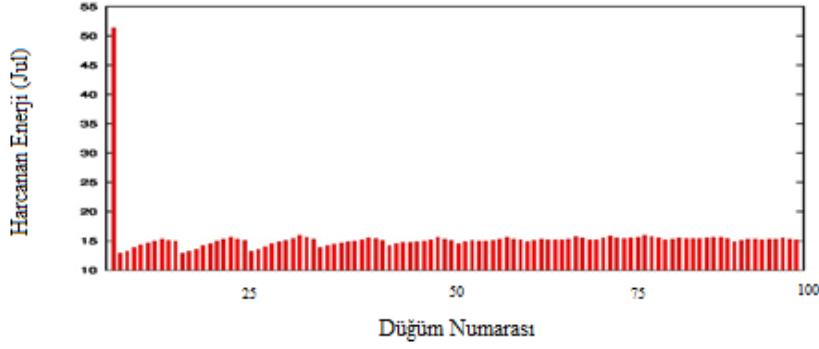
### 5.2.2.2 100 Düğüm Çalışması

Bu bölümde düğüm sayısı biraz daha arttırılmış ve 99 kaynak düğümü kullanılmıştır. Toplayıcı düğümün haberleşme menzili içerisinde olan düğümler daha az işaret paketi göndermiş, daha az süre TX durumunda kalmışlar ve daha az enerji tüketmişlerdir (Bkz Şekil 5.9, 5.10).

Bir önceki senaryo ile kıyaslayacak olursak enerji tüketimindeki farklılıklar ihmal edilebilecek seviyelerde olsada görülen o ki ağda bulunan düğüm sayısı arttıkça toplamda üretilen veri paketleri sayıları artmış ve dolayısıyla veri trafiği artmış ve enerji seviyelerindeki bu farklılıklar giderek daha belirgin hale gelmiştir. Fakat yinede buraya kadar genel olarak enerji tüketimlerinin adil bir biçimde gerçekleştiğini söyleyebiliriz.

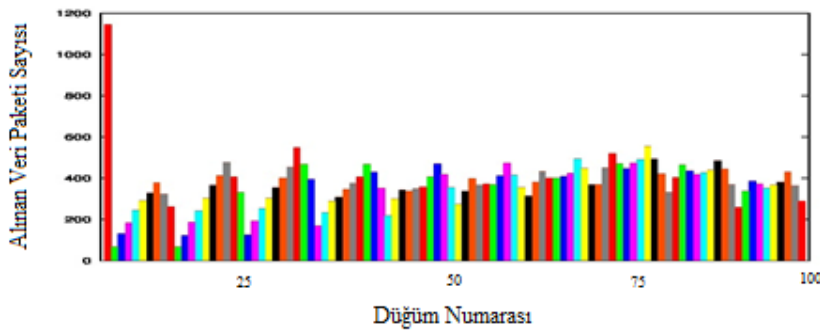


Şekil 5.9 İletimde geçirilen süre

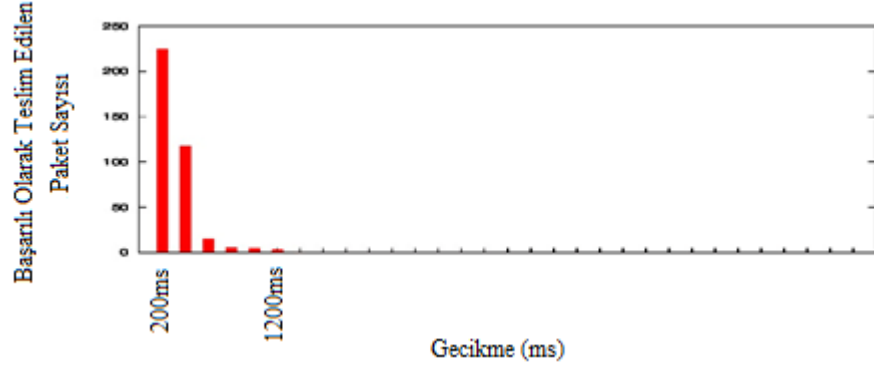


Şekil 5.10 Harcanan enerji

Bu çalışmada her düğüm ortalama 26 veri paketi üretmiştir ve ağda 99 adet kaynak düğümü olduğuna göre ortalama  $26 \times 99 = 2574$  adet veri paketi üretilmiş demektir. Ancak 0 numaralı toplayıcı düğüm neredeyse sadece 1150 adet veri paketi alabilmiştir. Buda bize yaklaşık olarak %44 değerinde bir PDR oranı verir. Görüldüğü gibi ağda bulunan düğüm sayıları arttıkça PDR oranı ciddi bir biçimde azalmaktadır (Bkz Şekil 5.11). Gecikme açısından ise application seviyesindeki gecikme 1000ms olan kontrol aralığı süresinin altına neredeyse hiç düşmemiştir. (Bkz. Şekil 5.12)



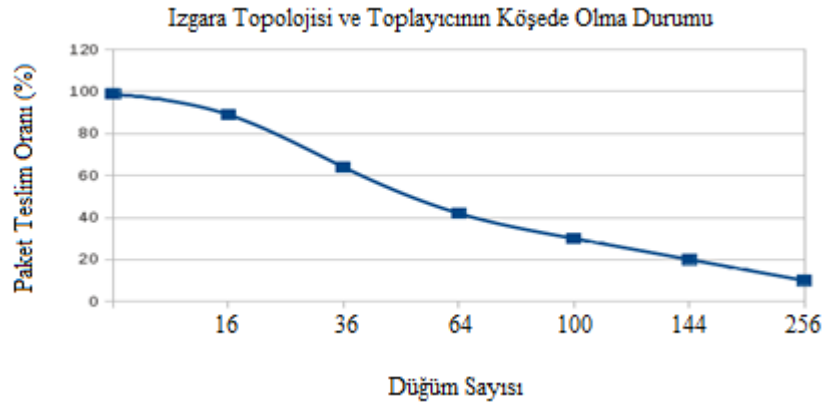
Şekil 5.11 Alınan veri paketi sayısı



Şekil 5.12 Uygulama seviyesindeki gecikme

Izgara topolojisi çoklu kaynak senaryosu ile ilgili 16 düğüm ve 100 düğüm ile gerçekleştirilen sonuçlara yer verildi. Ancak bu senaryo 16,36,64,100,144,196 ve 256 düğüm ile denemeler yapıldı. Son olarak bu senaryoda farklı sayıdaki düğümler ile elde edilen PDR oranları hesaplandı ve özellikle 64 düğümden itibaren bu oranda ciddi bir biçimde düşüş olduğu gözlemlendi.

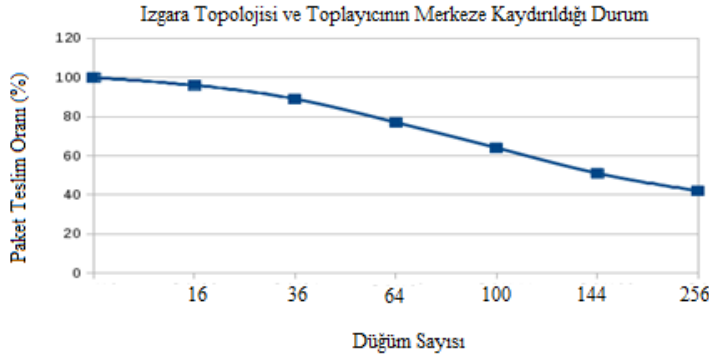
Bu senaryoda gecikme, enerji tüketimi, gönderilen işaret paketi sayısı değerleri AREA-MAC protokolü için yazılmış olan kodların doğruluğunu ispatlamakla birlikte Senaryo B için ölçeklenebilirliğin 64 düğümden sonra kötü sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır (Bkz. Şekil 5.13).



Şekil 5.13 Artan düğüm sayıları ile birlikte PDR yüzdesi.

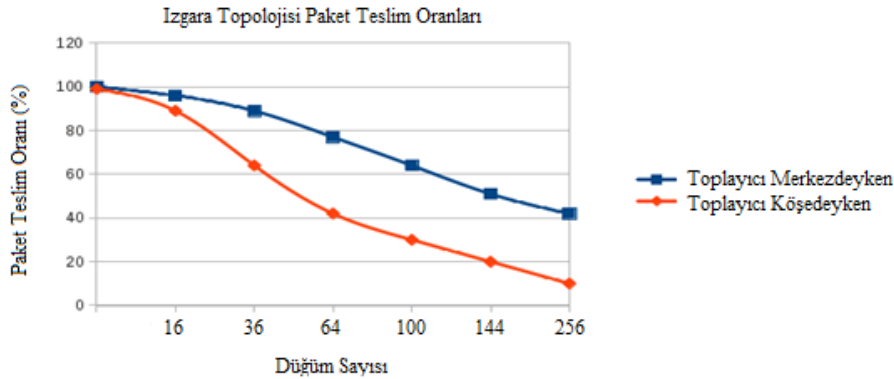
### 5.2.3 Senaryo C - Toplayıcının Merkezde Olma Durumu

Senaryo B’de ağdaki düğüm sayısı arttıkça PDR oranı hızlı bir şekilde azalmaktadır. AREA-MAC çalışmasında bu düşüşü ortadan kaldırmak için köşede bulunan toplayıcıyı (0,0) koordinatından ağın merkezine kaydırılmıştır. Azami 64 düğüm ile yapılan çalışmada PDR oranının önceki durum ile kıyaslandığında düşüşün çok fazla olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışmasında toplayıcı düğüm merkeze kaydırılarak benzetim denemeleri yapıldı. Bu bölümde bu denemeye ait sonuçlar verilmiştir (Bkz. Şekil 5.14).



Şekil 5.14 Düğüm sayısı ve PDR yüzdesi.

Toplayıcı düğümün merkeze kaydırılması bir önceki durum ile karşılaştırıldığında PDR oranında bir artış sağlamıştır. Fakat bu oran düğüm sayısı 100’den fazla olduğunda yine çok düşük seviyede gelmektedir. Aşağıdaki grafikte toplayıcı düğümünün PDR oranları gösterilmiştir (Bkz. Şekil 5.15).



Şekil 5.15 Karşılaştırmalı PDR yüzdesi.

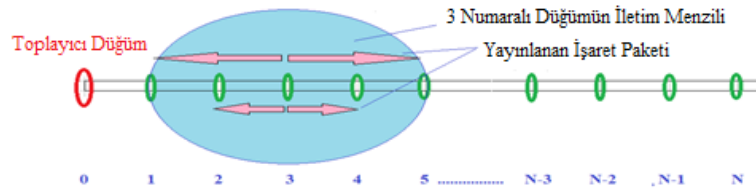
Toplayıcı düğüm merkeze kaydırılarak sadece haberleşme menzili içerisinde giren düğümlerin sayısı artırılmış ve böylece bu düğüme direkt olarak veri paketi gönderebilen düğümlerin sayısında bir yükselme durumu oluşmuştur. Dolayısıyla PDR oranında bir artış elde edilmiştir.

## 5.2.4 Çizgisel Topoloji Senaryoları

Bu bölümde AREA-MAC protokolünün çizgisel topoloji ile 7 farklı senaryo altında başarımlı analizi yapılmıştır. Her bir senaryoda enerji verimliliği ve PDR oranının artırılması ile birlikte gecikmenin düşürülmesi hedeflenmiştir. Son olarak elde edilen bulgular doğrultusunda her bir senaryoya ait PDR oranları farklı düğüm sayıları ile kıyaslamalı olarak verilmiştir.

### 5.2.4.1 N0 Senaryosu ve Toplayıcının Uçta Olma Durumu

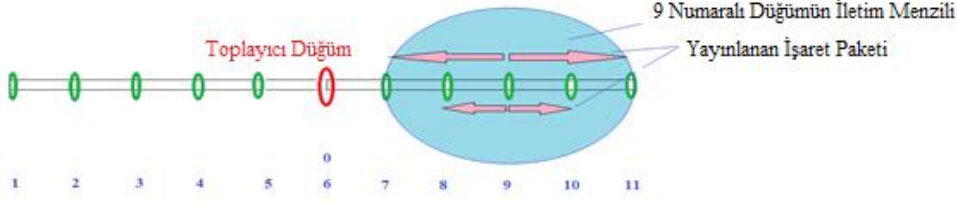
Bu senaryoda düğümler çizgisel bir şekilde eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Her düğüm en fazla iki atlama uzağındaki komşuları ile haberleşebilir ve veri akışı yayın tarzında gerçekleşmektedir. Bundan dolayı veri akışı toplayıcı düğümde sonlanmak üzere çift yönlü olabilir (Bkz. Şekil 5.16).



Şekil 5.16 N0 yönlendirme senaryosu

### 5.2.4.2 N0 Senaryosu ve Toplayıcının Ortada Olma Durumu

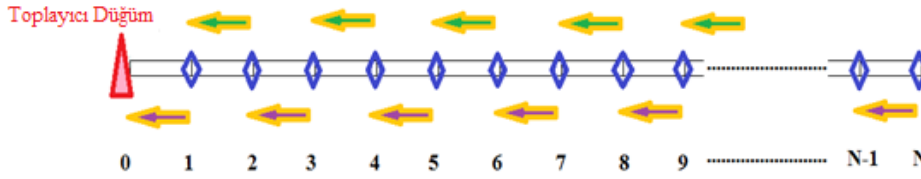
Bu senaryoda düğümler yine yayın tarzında çift yönlü olarak haberleşebilirler fakat toplayıcı düğüm merkeze kaydırılmıştır (Bkz. Şekil 5.17).



Şekil 5.17 N0 yönlendirme kaydırılmış toplayıcı düğüm senaryosu

### 5.2.4.3 N1 Senaryosu

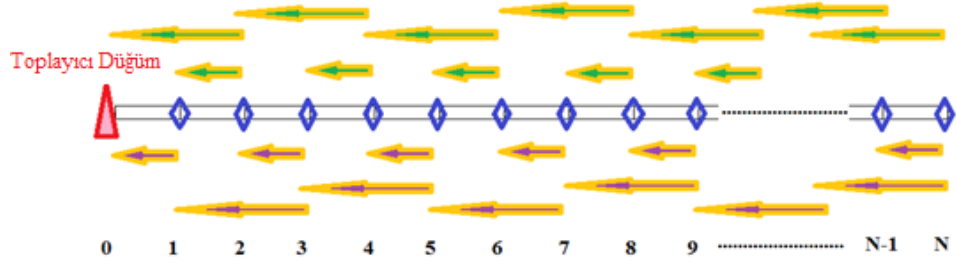
Bu senaryoda düğümler yalnızca toplayıcı düğümüne doğru birinci seviyedeki komşularıyla haberleşebilirler. Böylece çoklu atlamalı bir iletim gerçekleştirilmiş olur (Bkz. Şekil 5.18).



Şekil 5.18 N1 yönlendirme senaryosu

### 5.2.4.4 N1&N2 Senaryosu

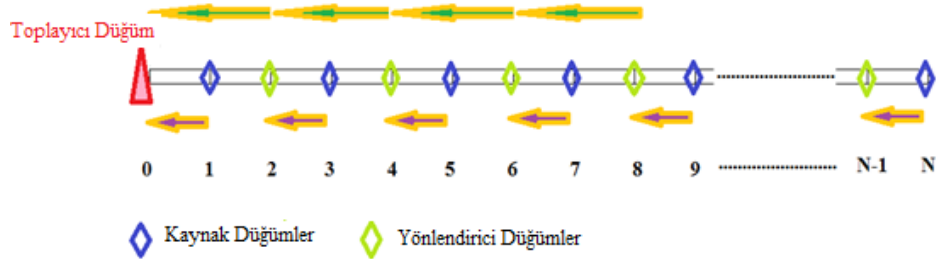
Bu senaryoda düğümler toplayıcı düğümüne doğru hem birinci seviyedeki hem de ikinci seviyedeki komşularına paket gönderip alabilirler. Bu yönlendirme senaryosu yayın tarzında gerçekleşir fakat gönderilen paketi yalnızca kendinden alt seviyedeki düğümler alabilirler (Bkz. Şekil 5.19).



Şekil 5.19 N1&amp;N2 yönlendirme senaryosu

#### 5.2.4.5 Yönlendirici Düğümler ve Senaryo 1

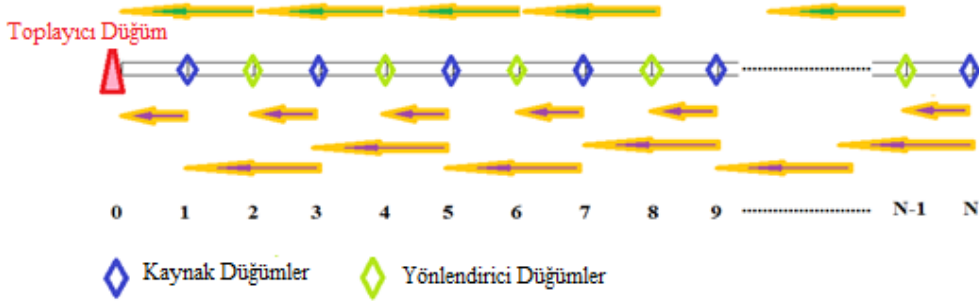
Bu senaryoda düğümler yine çizgisel topolojide eşit aralıklarla yerleştirilmişlerdir fakat her iki düğüm arasında bir yönlendirici (dummy) düğüm yerleştirilmiştir ve bu düğümlerin görevi yalnızca alınan paketleri toplayıcıya doğru yönlendirmektir. Yönlendirici düğümler uygulama seviyesinde veri paketi üretmezler. Ayrıca kaynak düğümleri birinci seviyedeki yönlendirici düğümlere veri gönderebilirken, yönlendirici düğümler ise kendi aralarında yani ikinci seviyedeki diğer yönlendirici düğümlere veri iletebilir (Bkz. Şekil 5.20).



Şekil 5.20 Yönlendirici düğümler ve senaryo 1

#### 5.2.4.6 Yönlendirici Düğümler ve Senaryo 2

Bu senaryo senaryo 1 ile benzerdir fakat aralarındaki tek fark kaynak düğümlerinin yönlendirici düğümlerin yükünü azaltmak için birinci ve ikinci seviye komşularına veri gönderebilmeleridir. Böylece tüm kaynak düğümleri veri yönlendirme görevine katkı sağlamış olurlar (Bkz. Şekil 5.21).



Şekil 5.21 Yönlendirici düğümler ve senaryo 2

### 5.2.4.7 Yönlendirici Düğümler ve Senaryo 3

Bu senaryoda yönlendirici düğümler sadece toplayıcı düğüme yakın olan yerlere yerleştirilmiştir ve ağın geri kalan kısmında tamamen kaynak düğümler bulunmaktadır. Yönlendirici düğümlere kadar tüm kaynak düğümleri N1&N2 yönlendirme tarzında çalışırken, toplayıcıya yaklaşınca yönlendirici düğümler üzerinden iletilen paketler ikinci seviyedeki komşular ile sağlanır. Bu şekilde toplayıcı düğüme yakın noktadaki aşırı paket yükünün hafifletilmesi planlanmıştır ( Bkz. Şekil 5.22).



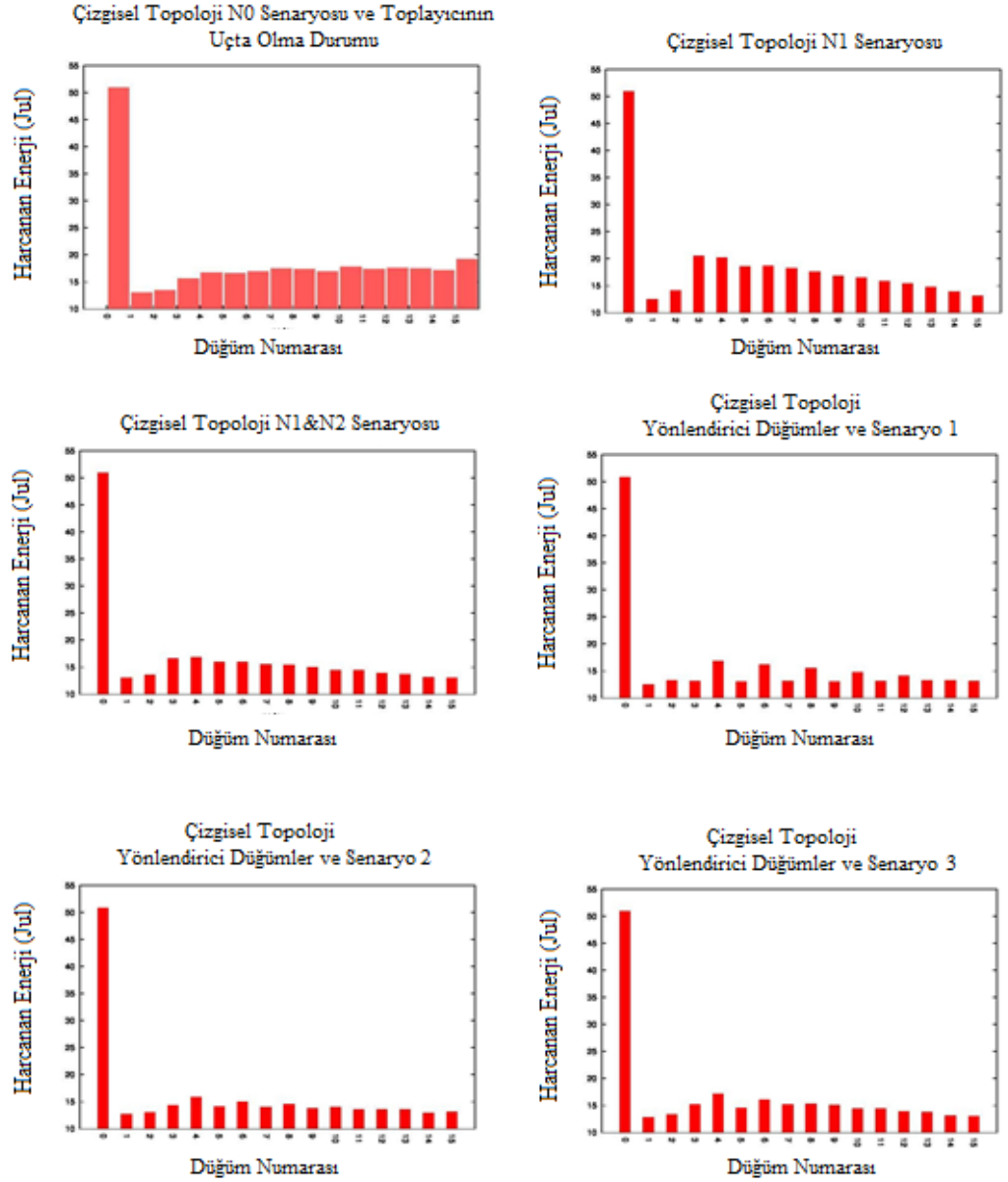
Şekil 5.22 Yönlendirici düğümler ve senaryo 3

### 5.2.5 Çizgisel Topoloji Bulguları

Bu bölümde yukarıda bahsedilen çizgisel topoloji senaryoları 16, 36 ve 64 gibi farklı düğüm sayıları ile incelenmiştir. Enerji tüketimi, gecikme, PDR oranı gibi başarımlar açısından analizler yapıldı.

### 5.2.5.1 16 Düğüm Çalışması – Harcanan Enerji

Her bir düğümün harcamış olduğu enerji 6 farklı senaryo için karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Bkz. Şekil 5.23). Tüm sonuçlarda en çok enerji tüketen 0 numaralı toplayıcı düğüm olmuştur fakat daha öncede belirtildiği gibi bu düğümün enerji kısıtlaması olmadığı göz önünde bulundurulacak olursa bu ihmal edilebilir bir durumdur.



Şekil 5.23 Karşılaştırmalı enerji tüketimi

“N0 yönlendirme” senaryosunda işaret paketleri yayın yapılarak gönderildiğinden bu paketi gönderen düğümün haberleşme menzili içerisindeki herhangi bir düğüm bunu alabilir. İşaret paketinide “preACK” ile ilk cevabı gönderebilen düğüm veri paketini gönderecek olan düğüm ile “İŞARET-GERİ BİLDİRİM-VERİ” (PREAMBLE-PREACK-DATA) hattını kurmuş olur. İşaret paketinin yayın şeklinde gönderilmiş olmasından dolayı veri paketi iletimi çift yönlü (toplayıcı düğüme doğru veya zıttı yönde) olabilir. İletimin sol tarafa yani toplayıcı düğüme doğru olması durumunda bazı paketlerin geri dönüşü olmayacaktır. Çünkü toplayıcı düğüm almış olduğu paketleri sevkmez. Eğer veri iletimi toplayıcı düğümün zıttı yönde gönderilirse, gönderilen her veri paketinin yönlendirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden bu senaryoda toplayıcı düğümden daha uzak olan düğümler daha fazla veri yönlendirecekleri için daha çok enerji harcayacaklardır.

“N1 yönlendirme” senaryosunda ise her bir düğüm işaret paketinin hedef adresine bir solundaki, yani 1-level komşusunun adresini yazar. Bu durumda veri iletimi toplayıcı düğüme doğru 1-level komşular üzerinden sağlanacağı için sol tarafa doğru yönlendirilen veri paketleri sayısı artar. Ayrıca her düğümün veri paketini sadece sol tarafındaki ilk düğüme aktaracak olması yayın (broadcast) senaryosuna göre daha fazla işaret paketi göndermesi gerektiği anlamına gelir.

“N1&N2 yönlendirme” senaryosunda harcanan enerji seviyeleri davranış olarak N1 yönlendirme senaryosuna benzer fakat burada her bir düğümün harcamış olduğu enerji miktarı diğerine göre daha azdır çünkü bu senaryoda her düğüm işaret paketinin hedef adresine sol tarafındaki 1-level ve 2-level komşularının adresini yazar. Bu yayın durumuna benzerdir fakat alıcı tarafında adreslere göre filtreleme yapıldığı için sadece ilgili düğümler geri bildirimde bulunurlar.

Bir sonraki “Yönlendirici düğümler ve Senaryo 1” senaryosunda ise yönlendirici düğümler kullanılmıştır. Bu düğümlerin adresleri ikinin katları şeklinde artmaktadır. Dolayısıyla 2,4,6,8...14 kadar olan düğümler yönlendirici düğüm olmuşlardır. Grafikten de görüldüğü gibi tek rakamlı kaynak düğümler yalnızca kendi ürettikleri veriyi ilettiklerinden neredeyse hepsi aynı seviyede enerji harcamışlardır. Yönlendirici düğümler ise toplayıcı düğüme doğru artan bir

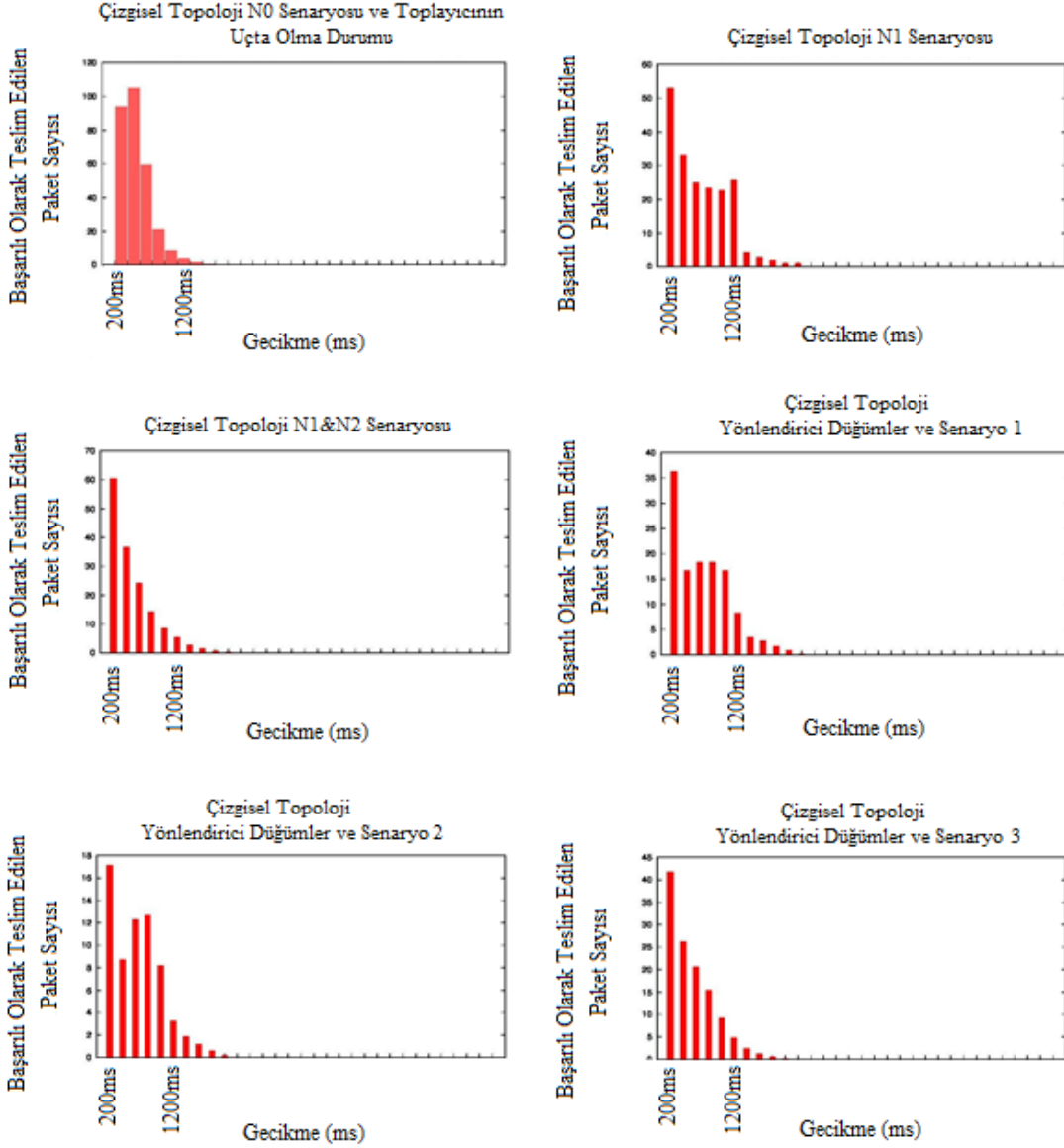
biçimde enerji tüketmişlerdir. 2 numaralı yönlendirici düğüm en çok veri ileten düğüm olmakla birlikte toplayıcı düğümün haberleşme menzili içerisinde olduğundan diğer yönlendirici düğümlere oranla daha az enerji harcamıştır.

“Yönlendirici düğümler ve Senaryo 2” senaryosunda yönlendirici düğümlerin yönlendirdikleri veri paketi sayısı azaltılmış daha adil ve dengeli bir iletim sağlanmaya çalışılmıştır. Grafiktende görüldüğü gibi hem kaynak düğümlerin hem de yönlendirici düğümlerin toplayıcı düğüme doğru tüketmiş oldukları enerji miktarları artmaktadır. Fakat yönlendirici düğümler sadece birbirlerine veri ilettikleri için yine diğer kaynak düğümlerine oranla daha fazla enerji harcamışlardır.

Son olarak “Yönlendirici düğümler ve Senaryo 3” senaryosunda tüm kaynak düğümleri veri paketi üretip 1-level ve 2-level komşularına iletir ve bu iletim toplayıcı düğüme yaklaştıkça sadece yönlendirici düğümleri tarafından 2-level komşusuna gönderilerek devam eder. Bu durumda harcanan enerji miktarı neredeyse N1&N2 yönlendirme senaryosu ile aynıdır.

#### **5.2.5.2 16 Düğüm - Gecikme**

Bu bölümde uygulama seviyesindeki gecikmeler incelenmiştir. N1 yönlendirme, yönlendirici düğümler ile yapılan senaryo 1 ve senaryo 2 genel olarak sadece 1-level ve 2-level komşulara veri gönderdiklerinden bir kontrol aralığı içerisinde hedef düğümün gönderilen işaret paketini yakalama olasılığı daha düşük olacağından daha fazla işaret paketi göndereceklerdir. Bu da veri paketlerinin kuyrukta (buffer) daha fazla beklemesine neden olduğundan bu senaryolarda gecikme diğerlerine göre daha fazladır (Bkz. Şekil 5.24).

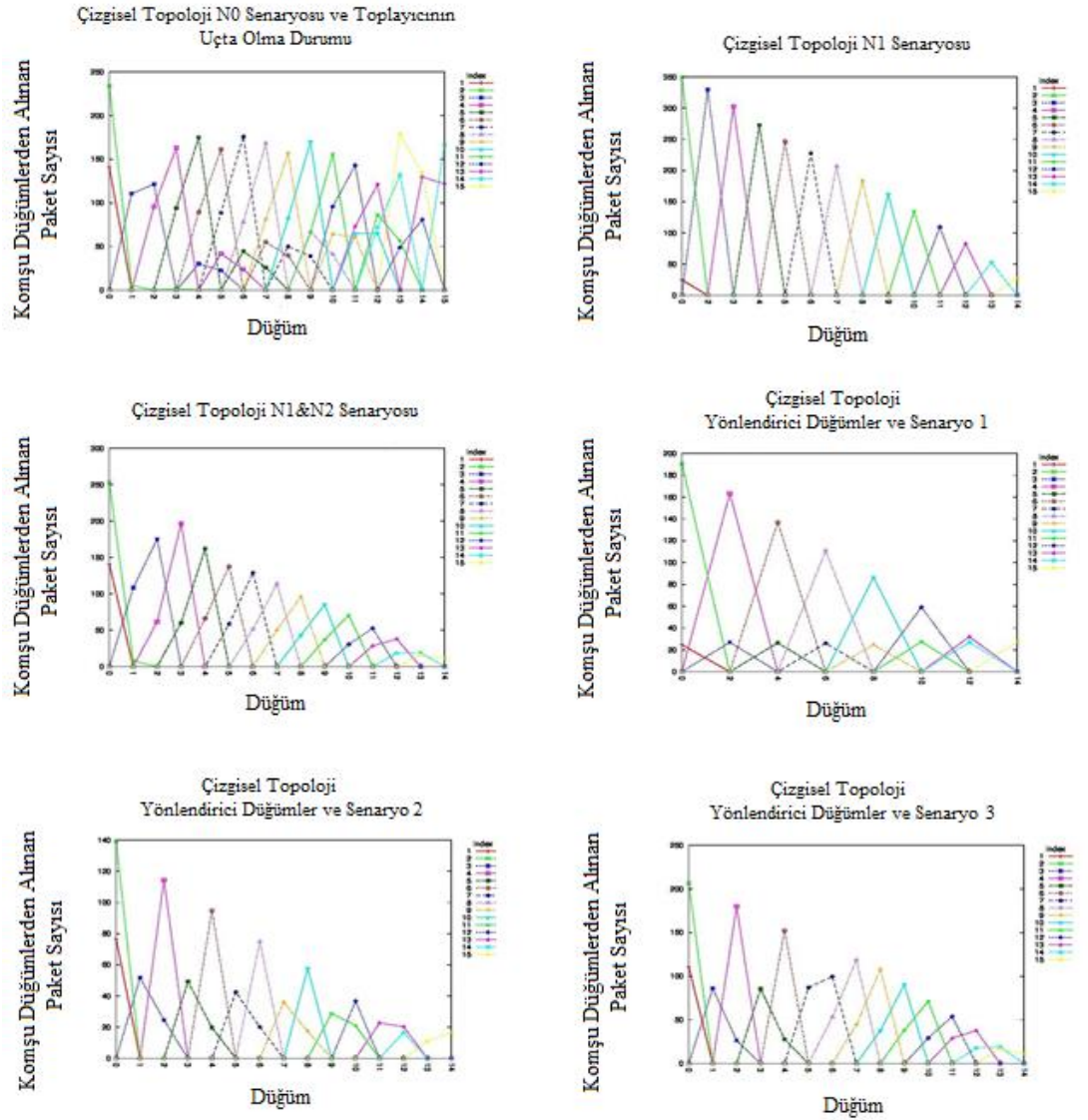


Şekil 5.24 Karşılaştırmalı gecikme

Gönderilen işaret paketine erken karşılık verebilme ihtimali N1&N2 yönlendirme ve yönlendirici düğümleri ile yapılan “Senaryo 3” de daha fazladır. Bu yüzden gecikmede diğerlerine kıyasla daha azdır. Aslında tam bir yayın senaryosu olan “N0 yönlendirme” için gecikmenin en az olması beklenir fakat burada her bir düğümün işaret paketine cevap verebilecek olan 4 düğüm bulunduğundan bunların aynı anda cevap verme olasılıklarında daha fazladır. Böylesi bir durumda “preACK” paketlerinin çarpışmalarında çok olacağından bu da gecikmenin artmasına sebep olabilmektedir.

### 5.2.5.3 16 Düğüm - Alınan Veri Paketleri

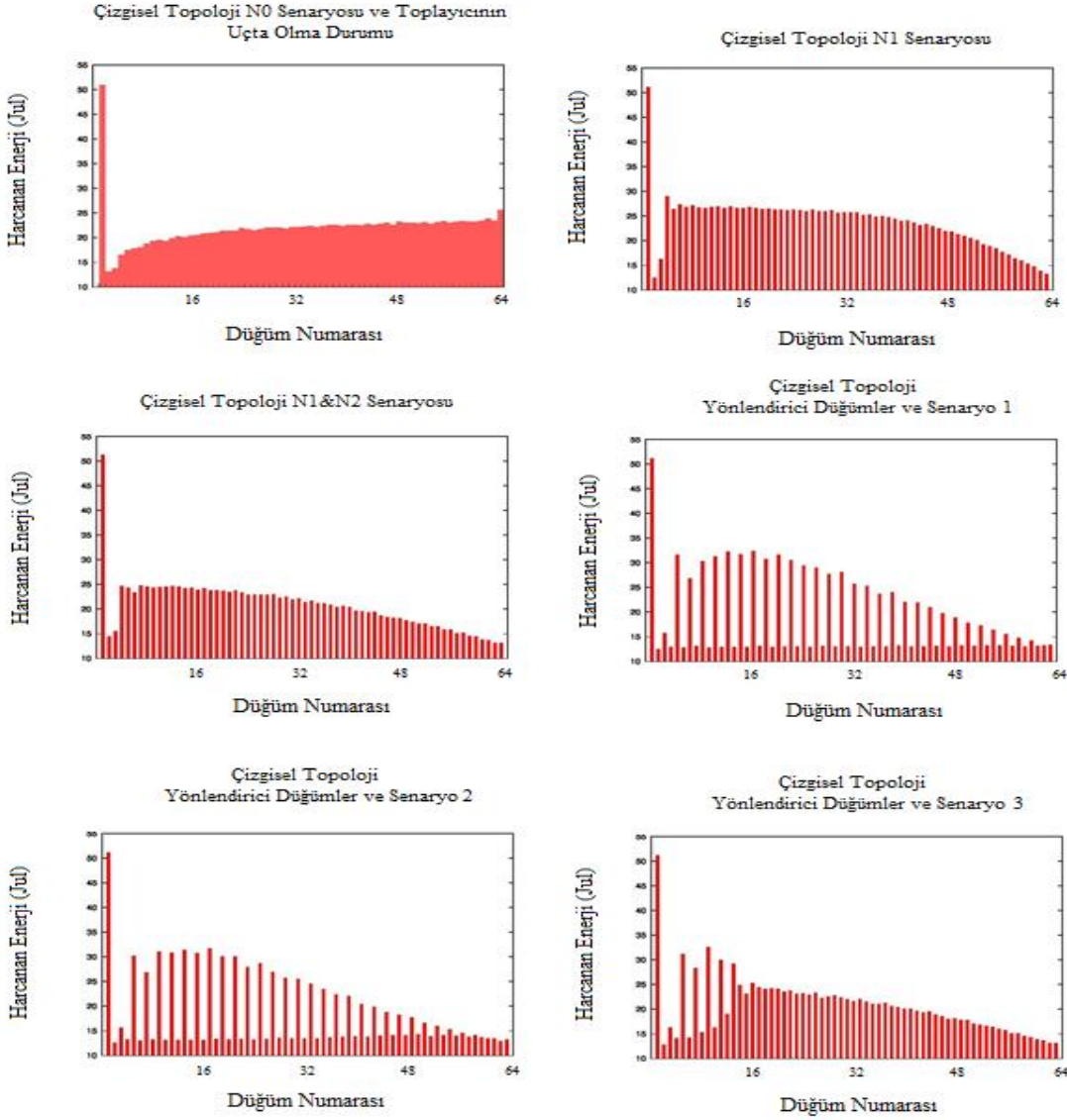
Burada her bir düğümün hangi komşularından ne kadar veri paketi aldıkları gösterilmiştir. Yayın senaryosunda her düğüm her komşusundan veri alabilmiş, N1 yönlendirmesi için ise sadece toplayıcı düğüme doğru bir önceki 1-level komşudan veri alınmıştır. Senaryo 1'de sadece yönlendirici düğümler veri paketi alırken “Senaryo 3” de ise 1,3 ve 5 numaralı düğümler yalnızca bir önceki 2-level komşularından veri almışlardır (Bkz. Şekil 5.25).



Şekil 5.25 Karşılaştırmalı alınan paketler

### 5.2.5.4 64 Düğüm Çalışması - Harcanan Enerji

Ağ'daki düğüm sayısı artırıldığından toplam üretilen veri paketi sayısı artmış ve en uç noktadaki düğümün toplayıcıya doğru veri paketi iletmesi için gereken atlama sayısı artmıştır. “N1 yönlendirmesi” ve “N1&N2 yönlendirme” senaryolarında belirli bir noktadan itibaren toplayıcı düğümüne doğru düğümlerin harcadığı enerji miktarı neredeyse aynı kalmıştır. Veri yönlendirmesi için fazladan gönderilen işaret paketleri enerji tüketiminin artmasına neden olmuş ve hedef olmayan komşu düğümlerin fazladan uyku durumuna girmelerine neden olmuştur (Bkz. Şekil 5.26).

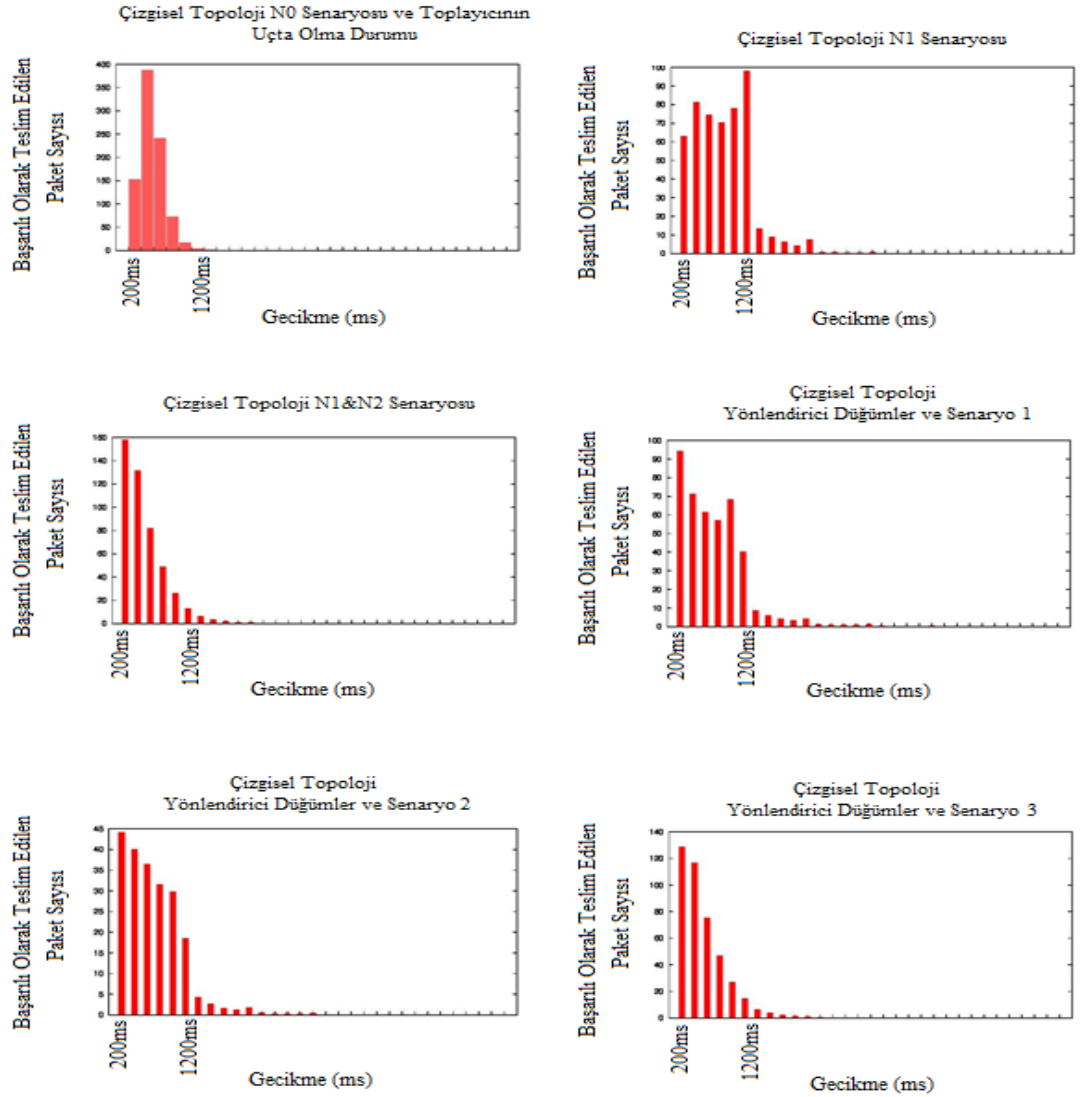


Şekil 5.26 Karşılaştırmalı enerji tüketimi

N1&N2 yönlendirme senaryosunda sabitleşme noktası biraz daha toplayıcıya yakın iken diğer senaryolarda yönlendirici düğümler kullanıldığından bu düğümlerin harcadığı enerji daha fazladır.

### 5.2.5.5 64 Düğüm - Gecikme

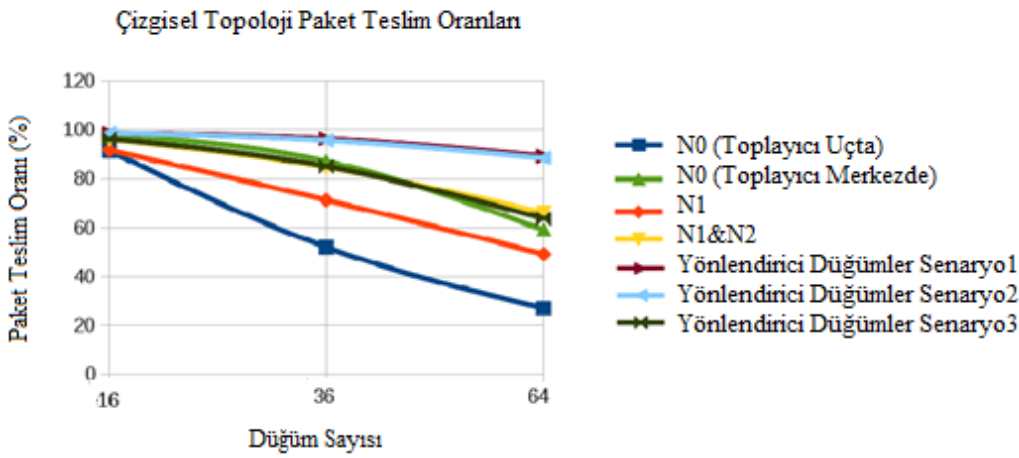
Daha önceki 16 düğüm çalışması ile kıyaslandığında yine 64 düğümlü çalışma içinde en az gecikmeye sahip olan N1&N2 yönlendirme senaryosudur. Bunun en büyük nedeni ise veriyi iletebilecek 2 komşuya sahip olduğu için gönderilen işaret paketine “preACK” ile cevap alınması ihtimalinin düşük olmasıdır (Bkz. Şekil 5.27).



Şekil 5.27 Karşılaştırmalı gecikme

Bir kontrol aralığı içerisinde ne kadar az işaret paketi gönderdikten sonra veri iletilirse gecikme o kadar az olur diyebiliriz. Diğer senaryolarda gönderilen işaret paketi sayıları fazla olduğundan gecikmede fazladır.

Çizgisel topoloji için önceki bölümlerde anlatılan 7 farklı senaryo için çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular incelenmiştir. Son olarak çizgisel topolojinin bu 7 senaryo altında PDR oranları karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Bkz. Şekil 5.28).



Şekil 5.28 Çizgisel topoloji için karşılaştırmalı PDR yüzdeleri.

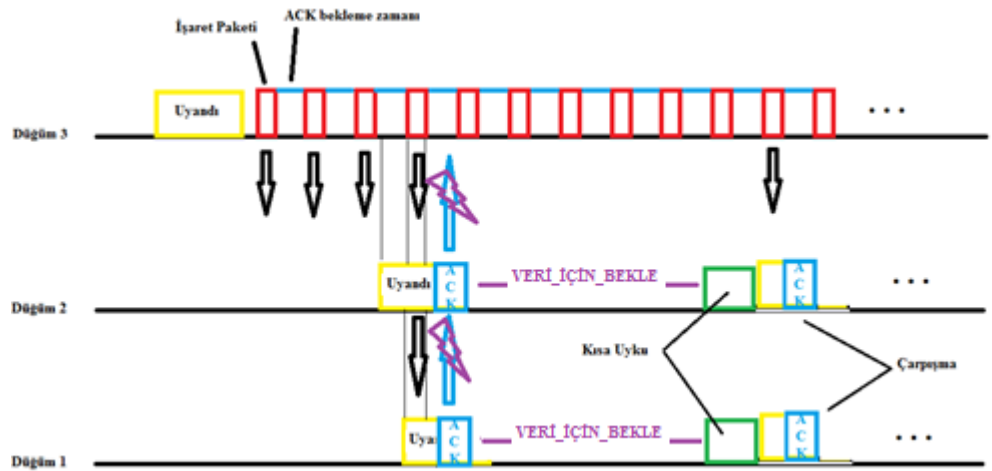
Çizgisel topolojide PDR oranı bakımından en iyi sonucu N1&N2 yönlendirme verirken, yönlendirici düğümlerin kullanıldığı “Senaryo 1” ve “Senaryo 2” senaryolarının daha yüksek değerler vermesinin nedeni ağ’da üretilen toplam paket sayısının neredeyse yarıya düşmüş olmasıdır. Çünkü bu senaryolarda yönlendirici düğümler paket üretmezler ve sadece veri yönlendirme görevini üstlenirler. Ağ’da üretilen toplam veri paketi sayısının artmasıyla birlikte her bir paket için hedef düğüme gönderilmesi gereken işaret paketleri sayısı da artar. Bu durum kanalın daha fazla kullanılmasına, çarpışmaların artmasına ve dolayısıyla bazı paketlerin çarpışmalar sebebiyle iptal edilmesine neden olur. Bu nedenle ağ’da üretilen toplam paket sayısı PDR oranını etkilemektedir.

Bu bölümde hem ızgara hem de çizgisel topoloji ile düğüm sayıları artırılarak deneysel çalışmalar yapılmış ve farklı senaryolar altında AREA-MAC protokolünün başarımlarını analiz edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde bu protokolün bazı eksik noktaları tespit edilmiş, enerji verimliliğinin artırılması, gecikmenin düşürülmesi ve PDR oranının artırılmasına yönelik bazı yaklaşımlar önerilmiştir.

### 5.3 Tespit Edilen Problemler ve Önerilen Çözümler

#### 5.3.1 Problem 1

Daha öncede bahsedildiği gibi AREA-MAC protokolü rastgele uyanan düğümlerden oluşan asenkron bir yaklaşımdır. Her düğüm başlangıçta kendisine rastgele bir uyuma, uyanma zamanı seçer ve uyandıktan sonra kuyruğundan herhangi bir verisi olan düğüm işaret paketi göndermeye başlar. Diğer düğümler ise uyandıktan sonra taşıyıcıyı dinleyerek kanal aktivitesini tespit etmeye çalışırlar. Gönderilen işaret paketinin hedef adresi kendi adresiyle aynı olan düğümler hemen ACK paketi ile cevap verirler, hedefte olmayan diğer düğümler ise bu işaret paketini alırlamaz uykuya geçerler. Fakat yayın şeklindeki yayılımlar için, rastgele uyuma uyanma yapısından dolayı bazı düğümler aynı anda uyanabilirler ve eğer gönderilen işaret paketi yayın şeklinde her iki düğüm içinde gönderilmiş ise, düğümler aynı anda “preACK” paketi gönderirler. Fakat bu paketler ortamda çarpışırlar ve alıcı tarafında enterferans nedeniyle paketler algılanamaz (Bkz. Şekil 5.29).



Şekil 5.29 Problem 1 ACK paketleri çarpışması



### 5.3.3 Problem 2

AREA-MAC protokolü adaptif bir görev süresi belirleme tekniği kullanır. Kuyruğunda birden fazla verisi olan düğüm ilk veri paketini gönderirken “moreToFollow” parametresini “1” yapar. Bu şekilde ilk veri paketini alan düğüm bu paketten sonra gönderilecek olan başka veri paketleri olduğunu anlar ve bir NACK paketi gönderir. NACK paketini alan düğüm ise ilk paketin başarılı bir biçimde gönderildiğinden emin olduktan sonra ikinci paketi gönderir. Bu yaklaşım ile her paket için önceden işaret paketi gönderiminin önüne geçilmiş olur. AREA-MAC ard arda gönderilen bu paket sayısını 2 olarak kabul etmiştir. AREA-MAC ile uygulama katmanından gelen paketler kısa bir süre içinde hemen iletildikleri için bu protokolü kullanan düğümlerin çok nadiren kuyruklarından 2’den fazla veri paketi barındıracağı düşünülmektedir. Bu durum ızgara topolojisi için geçerlidir çünkü ızgara topolojisinde düğümlerin genellikle veri gönderimi için müsait olan birden fazla komşusu bulunmaktadır. Ancak çizgisel topolojide düğümlerin en çok iki komşusu olabileceğinden (Bkz. “N1&N2” yönlendirme senaryosu), özellikle toplayıcı düğüme yaklaştıkça kuyrukta biriken paket sayısının artması söz konusudur.

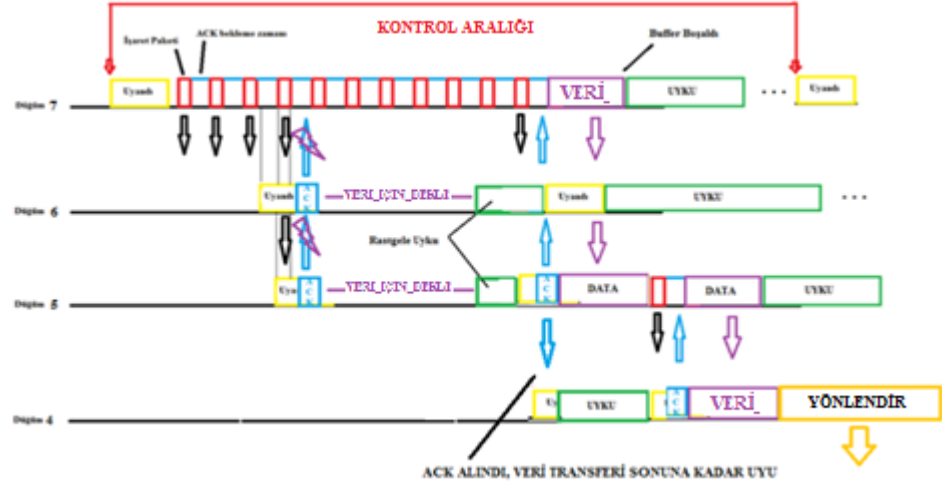
### 5.3.4 Önerilen Çözüm (Ç2)

Kuyrukta biriken paketlerin sayısı arttıkça gecikmeler artmakta ve her iki paket için önceden gönderilmesi gereken işaret paketleri enerji tüketimini de arttırmaktadır. Bunun için daha adaptif bir veri transferi modeli geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında AREA-MAC protokolü için kuyrukta biriken paketlerden aynı anda birden fazla gönderilmesine imkan tanımak için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca her benzetim öncesinde ard arda azami olarak gönderilmesi gereken paket sayısını kolayca belirlemek için dinamik olarak konfigüre edilebilen bir “paketLimit” parametresi tanımlanmıştır.

### 5.3.5 Problem 3

Problem 1’de ACK çarpışmasına maruz kalan düğümlerden birinin daha erken uyanmasıyla bu sorunun çözülmesi önerilmişti. Düğümlerden biri erken uyandığından veri transferine başlar ancak diğer paket geç uyandığı için bir süre





Şekil 5.32 Uyku zamanının işaret ve “preACK” paketlerine göre belirlenmesi .

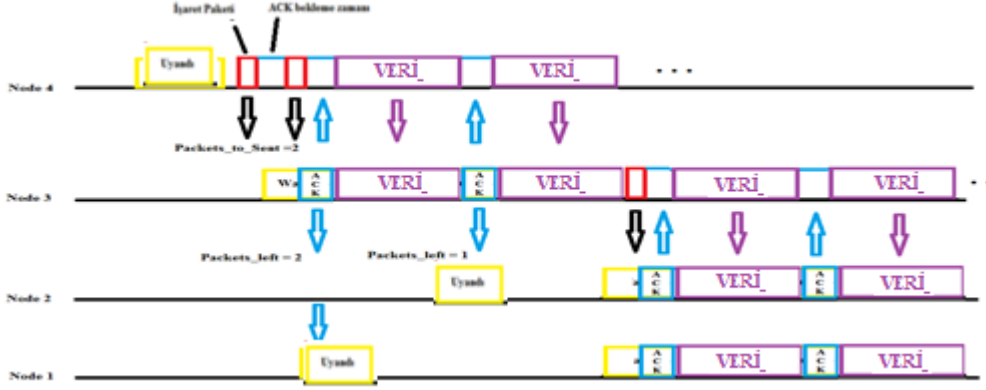
### 5.3.7 Problem 4

Problem 3’ün çözümünde önerilen ACK paketinin içeriğine göre adaptif bir şekilde uyuma ve uyanma yaklaşımındaki göz önünde bulundurulması gereken bir diğer noktada şudur: Düğümler ACK paketini aldıktan sonra kaç adet veri paketi gönderildiğini bilemezlerse tahmininden daha erken veya geç uyanabilir. Ayrıca düğüm ACK paketini sadece çarpışma sonrasında değil normal uyanma periyodu içerisinde de alabilir. Bu yüzden her ACK paketinin aynı zamanda ACK gönderiminden itibaren yapılacak olan veya kalan veri transferi sayısını belirten bir parametreye sahip olması gerekir. Ancak bu bilginin ilk işaret paketi alındıktan sonra gönderilecek olan ilk ACK paketinin içine yerleştirilmesi söz konusu değildir çünkü bu bilginin ACK gönderimi öncesinde düğüme bildirilmesi gerekmektedir.

### 5.3.8 Önerilen Çözüm(Ç4)

4 yollu el sıkışması (four-way-handshake) tekniğine benzer şekilde işaret paketlerinin içerisine, kuyrukta bekleyen veri paketi sayısına göre ve ard arda gönderilecek olan paket limitine göre belirlenecek olan bir bilgi yerleştirilirse düğüm işaret paketiyle bu bilgiye sahip olmuş olur. Daha sonra bu bilgiyi göndereceği ACK paketinin içine yerleştiren düğüm bir sonraki veri transferi için komşularını uyarmış olur ve böylece komşu düğümler ne zaman uyanması

gerektiğini net bir şekilde bilir. Böylece daha adaptif, daha dengeli ve daha güvenilir bir iletim sağlanır (Bkz. Şekil 5.33).

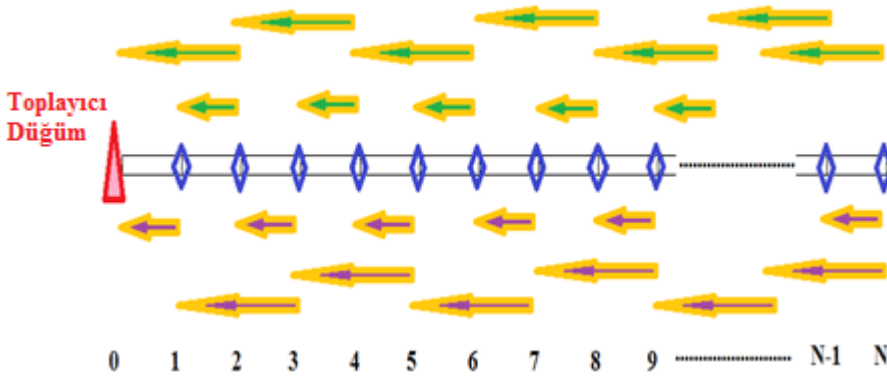


Şekil 5.33 İşaret ve “preACK” paketleri içerisinde yayınlanan bilgiye göre uyanma.

Buraya kadar önerilen çözümler doğrultusunda tasarlanan protokole ait matematiksel bir ağ modeli ve enerji modeli oluşturulmuştur.

### 5.3.9 Ağ Modeli

Önerilen çözümler doğrultusunda bu tez çalışmasında kullanılan TDA çoklu atlamalı çizgisel bir ağıdır (Bkz. Şekil 5.34).



Şekil 5.34 N adet düğümünden oluşan çoklu atlamalı çizgisel ağ.

Kaynak düğümleri tarafından üretilen veri paketleri toplayıcı düğüme ulaştırılmak için çoklu atlamalı ağ üzerinden komşularına iletilirler. Tüm veri paketleri için sonlanma noktası toplayıcı düğümdür. Ağda bulunan tüm düğümler eşit aralıklarla yerleştirilmiştir ve her düğüm 1-hop veya 2-hop komşuları ile haberleşebilir. Herhangi bir  $i$ 'inci düğüm tarafından gönderilen veri paketinin  $x$ 'inci düğüm tarafından alınması formül 5.1'de ki gibi tanımlanmıştır.

$$\text{Alıcı düğüm kimlik no} = \begin{cases} 0 & , i = 0 \\ (i - 1)ve(i - 2) & , i \geq 2 \end{cases} \quad (5.1)$$

Ağ içerisindeki algılayıcı düğüm sayısı  $N$ 'dir ve ağdaki algılayıcılar kümesi formül 5.2'de ki gibidir.

$$S = \{s_i, i \in \{1 \dots N\}\} \quad (5.2)$$

Ağ bulunan bir  $s_i$  düğümü veri paketlerini  $s_{i-1}$  düğüme  $r_i$  kadarlık bir iletim mesafesinden gönderir. Böylece buna karşılık gelen azami iletim mesafesi, örneğin 2-hop komşusuna olan mesafesi formül 5.3'de ki gibidir.

$$r_{maksimum} = \{2r, i \in \{1 \dots N\}\} \quad (5.3)$$

Herhangi bir  $s_i$  düğümünün üst seviye komşularından kimlik numarası  $s_i$  düğümünün kimlik numarasından 1 küçük olanlara  $s_i$ 'nin birinci seviye (1-hop) komşuları denir. Aynı şekilde herhangi bir  $s_i$  düğümünün üst seviye komşularından kimlik numarası  $s_i$  düğümünün kimlik numarasından 2 küçük olanlara  $s_i$ 'nin ikinci seviye (2-hop) komşuları denir.

Bir  $s_i$  düğümü ile  $s_{i-1}$  düğümü arasındaki mesafeye göre, çizgisel gözlem bölgesi  $L$ 'nin toplam uzunluğu formül 5.4'de verilmiştir.

$$L = \sum_{i=1}^N r_i \quad (5.4)$$

Tüm düğümler eşit aralıklarla yerleştirildiğine göre gözlem bölgesinin toplam uzunluğu formül 5.5’de ki gibi olur.

$$L = r * (N - 1) \quad (5.5)$$

### 5.3.10 Enerji Modeli

Düğümler zamanının büyük bir kısmını uyku modunda geçirir ve kanalın meşgul olup olmadığını kontrol etmek için kısa süreliğine uyanırlar. Eğer bir düğüm kanalda işaret paketi bulursa  $T_{rx}$ kadar süren bir alıcı sürecine başlar. Eğer düğüm göndermesi gereken bir veri paketine sahipse öncelikle  $T_{cs}$  süresi kadar kanalda taşıyıcıyı dinler. Kanalı boş bulması durumunda  $T_{tx}$  kadar süren bir iletim işlemine başlar.

Alternatif olarakda eğer kanalda herhangi bir işaret paketi bulamazsa veya iletecek herhangi bir paketi yoksa tekrardan  $T_{sl}$  süresi kadar uyku moduna girer.

Düğümün birim zamanda harcadığı toplam enerji miktarı  $E_t$ , sırasıyla kanal örnekleme, taşıyıcı algılama, paketleri alma, paketleri gönderme, boş durumda bekleme, uyuma, radyo anahtarlama ve paketlerin işlenmesi için harcanan enerjinin toplamından oluşur. Böylece bir düğüm tarafından her bir durum içinde harcanan toplam enerji miktarları formül 5.6’da gösterildiği gibidir.

$$\begin{aligned} E_t &= P_{sa}T_{sa} + P_{cs}T_{cs} + P_{rx}T_{rx} + P_{tx}T_{tx} + P_{idle}T_{idle} + P_{sl}T_{sl} + P_{sw}T_{sw} + P_{pr}T_{pr}. \\ &= P_{sa}T_{sa} + P_{cs}T_{cs} + P_{rx}[(L_{pr} + L_{dt} + L_{ack}) * T_{bt}] + P_{tx}[(L_{pr} + L_{dt} + L_{ack}) * T_{bt}] + P_{idle}T_{idle} + P_{sl}T_{sl} + P_{sw}T_{sw} + P_{pr}T_{pr}. \\ &= P_{sa}T_{sa} + P_{cs}T_{cs} + \sum_{i=1}^{N_{Rx}} \frac{P_{rx}L_i}{R} + \sum_{i=1}^{N_{Tx}} \frac{P_{tx}L_i}{R} + P_{idle}T_{idle} + P_{sl}T_{sl} + P_{sw}T_{sw} + P_{pr}T_{pr}. \\ &= \sum_{i=1}^{N_{Rx}} \frac{V_{tr}I_{rx}L_i}{R} + \sum_{i=1}^{N_{Tx}} \frac{V_{tr}I_{tx}L_i}{R} + V_{tr}(I_{idle}T_{idle} + I_{sl}T_{sl} + I_{cs}T_{cs}) + P_{sw}T_{sw} + P_{pr}T_{pr} + P_{sa}T_{sa} + \end{aligned} \quad (5.6)$$

Formül 5.6'da  $P_x$ ,  $I_x$  ve  $T_x$  sırasıyla güç, elektrik akımı ve alıcı-vericinin x durumunda geçirdiği zaman aralığını temsil eder. Ayrıca  $V_{tr}$  çalışma voltajı,  $L_i$  ise gönderilen veya alınan i'inci paketin uzunluğunu ve  $R$  veri iletim hızını temsil etmektedir.

### 5.3.11 LINE-MAC

AREA-MAC protokolünün çizgisel topoloji ile yapılan benzetim çalışmaları sonucunda tespit edilen problemler ve bu problemlerin ortadan kaldırılması için geliştirilen 4 çözüm önerisi doğrultusunda bu tez çalışmasında "LINE-MAC" (Linear Topology Energy Efficient Medium Access Control) adında yeni bir protokol tasarlanmıştır. Bu bölümde LINE-MAC protokolünün çalışma yapısı kısaca özetlenmiş ve protokol algoritması verilmiştir.

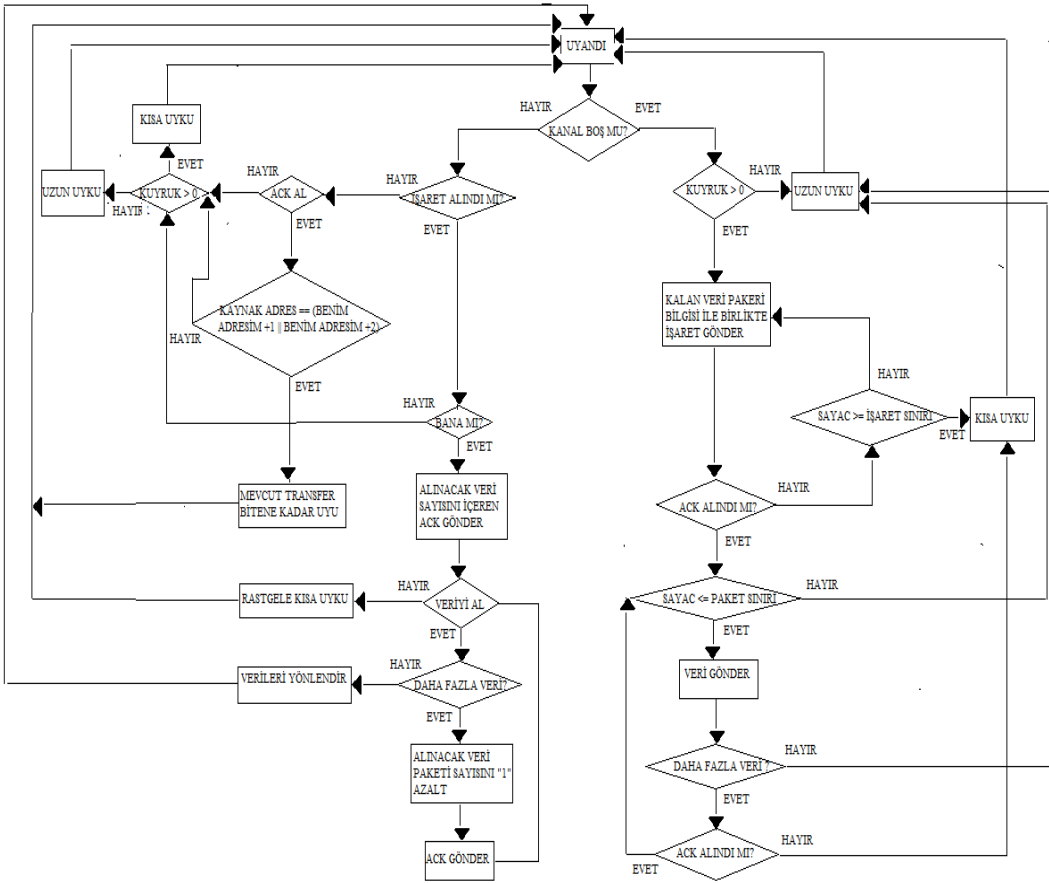
LINE-MAC, düğümlerin *VERİ İÇİN BEKLE (WAIT\_FOR\_DATA)* zamanlayıcıları sona erdiğinde rastgele belirlenen kısa bir süre için uyku durumuna girmelerini sağlar. Bu özellik ile aynı anda gönderdikleri "preACK" paketleri çarpışan ve veri beklemekte olan düğümlerden birisinin diğerine göre daha erken uyanmasını ve kanalda gönderilen ilk işaret paketini almasını sağlar. Bu sayede "preACK" paketlerinin çarpışmasından kaynaklanan kısır döngü engellenmiş olur.

Çizgisel topolojideki TDA'larda toplayıcı düğüme yaklaştıkça yönlendirilen veri paketlerinin sayısı artmaktadır. Bu durum düğümlerin enerji tüketimlerinde dengesiz bir dağılım oluşturmakta ve toplayıcı düğüme yakın olan düğümlerin kuyruklarında biriken paketlerin uzun gecikmelere maruz kalmasına neden olmaktadır. LINE-MAC, trafik koşullarına ve yüküne uyumlu bir biçimde her düğüme ard arda gönderebileceği azami paket sayısını belirleme imkanı sunar. Bu sayı "*paketSınırı*" ("*packetLimit*") parametresi ile belirlenir.

LINE-MAC, kanalı dinlemek için uyanan her düğüme, kablosuz ortamdaki işaret paketlerinin kaynak ve hedef adreslerini kontrol etmenin yanısıra "preACK" paketlerinde bu adreslerini kontrol etmesini sağlar. Bu özellik sayesinde "preACK" paketlerinin içinde yer alan bu bilgiler ışığında kablosuz kanalda o anda gerçekleşen iletimin hangi düğümler arasında gerçekleştiği öğrenilir.

Böylece düğüm, kanalda iletilecek olan veri paketlerinin bir sonraki hedef noktası olup olamayacağına karar verir ve uyuma süresini bu bilgiye uyumlu bir biçimde ayarlar. Bu özellik düğümlerin erken uyuma problemlerini ortadan kaldırırken, gecikmeleri azaltmakla birlikte her bir veri paketi için gönderilmesi gereken işaret paketlerinin sayısını azaltarak enerji verimliliği sağlar.

LINE-MAC, düğümlere işaret paketlerinin içerisine ard arda gönderilmek istenen paket sayısına ait bilgi yerleştirmelerini sağlar. Bu bilgi hedef düğümler tarafından “preACK” paketleri ile birlikte tekrar yayınlanır. Böylece hedef olmayan diğer komşu düğümler mevcut iletim hakkında bilgilendirilir ve uyuma/uyanma zamanlarını ayarlarlar. Bu özellik sayesinde LINE-MAC kullanan düğümler kanaldaki mevcut veri iletimi ile uyumlu bir biçimde uyanırlar. Böylece gecikmeler azaltılırken aynı zamanda enerji verimliliği sağlanmış olur. LINE-MAC protokolünün paket alma ve gönderme işlemlerini detaylı olarak gösteren akış şeması aşağıdaki verilmiştir (Bkz. Şekil 5.35).



Şekil 5.35 LINE-MAC protokolü çalışma yapısı ve akış şeması.

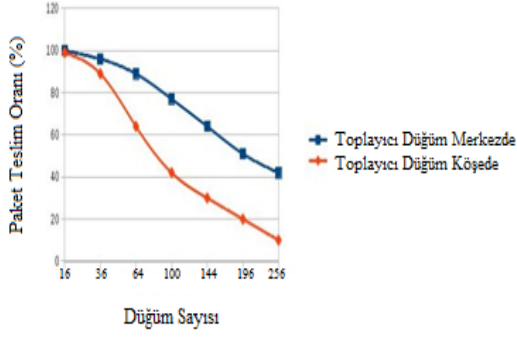
### 5.3.12 Başarım Değerlendirmesi

Buraya kadar AREA-MAC protokolünün farklı senaryolar ve topolojiler altında değişen düğüm sayıları ile yapılan benzetim çalışmalarına yer verildi. Bu çalışmalar sonucunda tespit edilen bazı problemler ve bu problemlerin çözümü için önerilerde bulunuldu. Önerilen çözümler doğrultusunda tasarlanan LINE-MAC protokolünün çalışma yapısı kısaca özetlendi ve protokol akış şeması verildi. Bu bölümde LINE-MAC çizgisel topolojide 64 düğüm ile N1&N2 yönlendirme senaryosu için çalıştırılmış ve elde edilen bulgular AREA-MAC ile karşılaştırılmıştır.

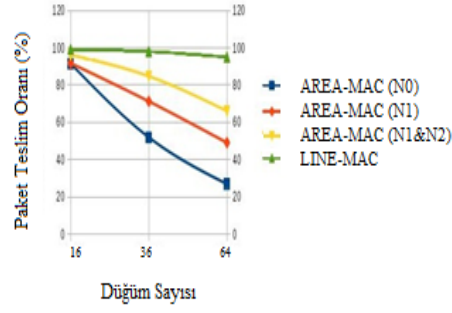
Paket teslim oranı, enerji tüketimi ve gecikme gibi üç önemli parametre incelenmiştir. İlk olarak paket teslim oranı karşılaştırması için ızgara topolojisinde olduğu gibi çizgisel topolojide veri paketleri 75 saniyede bir 45 saniyelik sapma ile üretilmektedir. Böylece her düğüm ortalama olarak 25-30 paket üretmektedir. PDR oranı AREA-MAC ızgara topojisi için 64 düğümün üzerindeki ağlarda gözle görülür bir düşüş göstermektedir (Bkz. Şekil 5.36(a)). Çizgisel topoloji için düğümler eşit aralıklarla çizgisel bir tarzda yerleştirilmiştir. N0 sınırsız yayını, N1 düğümlerin yalnızca 1-hop uzağındaki komşularına paket göndermek veya almak istediği durumları ve son olarak N1&N2 ise 1-hop ve 2-hop uzaktaki komşularla iletişim kurulduğu durumları temsil etmektedir.

Önerilen çözümler doğrultusunda PDR oranı %95'in üzerinde kalırken diğer tüm durumlar için ağda bulunan düğüm sayısı arttıkça lineer bir biçimde düşmektedir (Bkz. Şekil 5.36(b)). Önerilen protokolda ardışık olarak gönderilecek olan paket sayısı trafik koşullarına göre adaptif bir biçimde belirlenmektedir ve çizgisel topolojilerde bu sayı oldukça önemlidir.

a) Izgara Topolojisi Paket Teslim Oranları



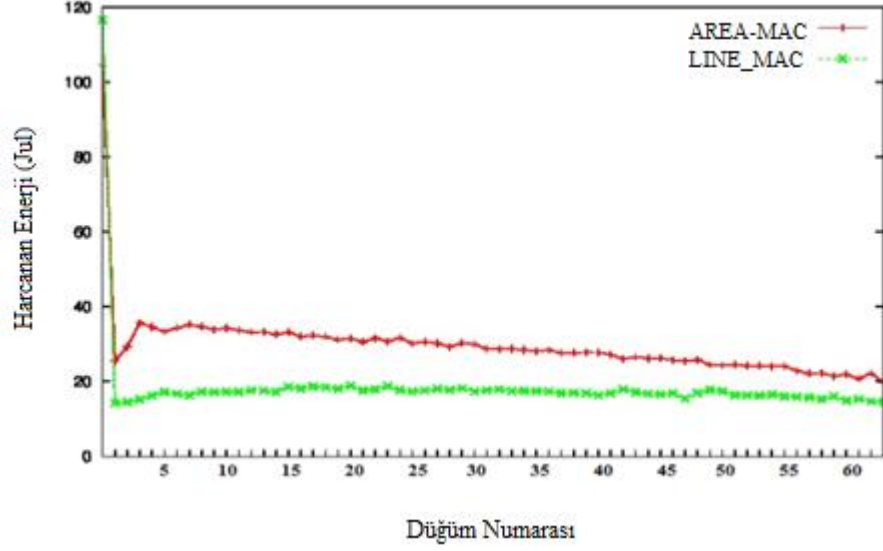
b) Çizgisel Topoloji Paket Teslim Oranları



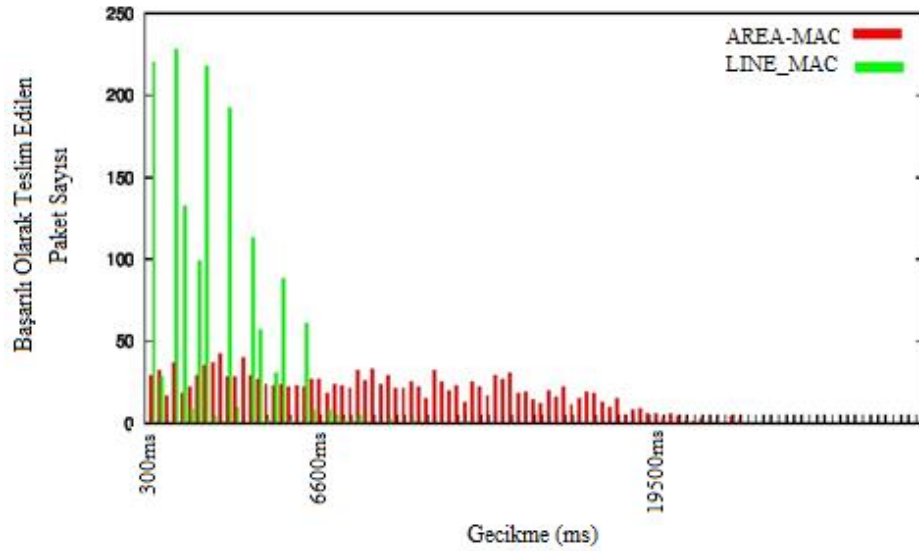
Şekil 5.36 (a) AREA-MAC ızgara topolojisi için PDR başarımı (b) Önerilen protokolün ve AREA-MAC'ın PDR karşılaştırması.

İkinci olarak önerilen protokolün enerji verimliliği incelendi ve her bir düğümün ortalama enerji tüketimi verildi (Bkz. Şekil 5.37). AREA-MAC kullanan düğümlerde toplayıcı düğüme yaklaştıkça harcanan enerji miktarı artmaktadır çünkü bu yöne doğru ağda yönlendirilen veri paketlerinin sayıları artmaktadır. Ancak önerilen protokolü kullanan düğümler toplayıcı düğüme olan yakınlıktan bağımsız olarak aynı miktarda enerji tüketmişlerdir. Önerilen protokol ile fazladan duyulan “preACK” paketlerinin avantajı kullanılmış ve enerji tüketimi açısından daha verimli bir protokol oluşturulmuştur.

Üçüncü önemli parametre olarak başarılı olan her bir iletme ait gecikme performansı ölçülmüştür. Eğer bir paket başarılı bir biçimde alınmış fakat kabul edilemez bir gecikme değeri ile gelmiş ise yararsız olabilir. Önerilen protokol ile AREA-MAC'ın karşılaştırmalı gecikme dağılım grafiği histogram şeklinde verilmiştir ve her bir histogram buketi 300 ms karşılık gelmektedir (Bkz. Şekil 5.38).



Şekil 5.37 LINE-MAC ve AREA-MAC'ın enerji verimi karşılaştırması.



Şekil 5.38 LINE-MAC ve AREA-MAC'ın gecikme karşılaştırması.

Önerilen protokol ile ardışık olarak gönderilecek olan veri paketleri sayısı trafik koşullarına göre adaptif bir biçimde arttı ve böylece gecikmelerin önemli ölçüde azaltıldığı sonucu alındı. Ayrıca fazladan duyulan “preACK” paketlerin kullanımı düğümlerin kendinden önceki komşularının iletimlerini analiz ederek onlarla uyumlu bir biçimde uyanmalarını sağlamıştır. Bu çözüm sayesinde düğümlerin erken uyuma problemleri de ortadan kaldırılmıştır. Önerilen çözümler ile elde edilen bulgular enerji tüketimi ve gecikme bakımından daha verimli bir yaklaşım öne sürüldüğünü kanıtlamıştır.

## 6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Telsiz Duyarga Ağları için enerji verimliliği çok önemlidir. Çünkü çoğu zaman bu ağların, verilen bir görevi uzun bir süre insan müdahalesine gerek kalmadan sürdürmeleri gerekir. Fakat bu ağlarda kullanılan düğümler genellikle sınırlı enerjiye sahiptirler. Bu yüzden ağ yaşam süresinin uzaması her bir düğümün mümkün olduğunca az miktarda enerji tüketmesine bağlıdır. Ayrıca bazı TDA uygulamalarında enerji verimliliğinin yanında gecikmenin minimum düzeylerde olması beklenir. Düğümler birbirleri ile haberleşmek için paketleri kablosuz ortamda ilettiklerinden çoklu atlamalı kanal üzerinde zamana ve ortama bağlı olarak değişen farklı başarımlar elde edebilirler. TDA'ların bu doğası onların kullanılacakları uygulamaya göre tasarlanmalarını gerektirir. Bu tez çalışmasında günümüzde giderek daha popüler olmaya başlayan ve Nesnelerin İnterneti konsepti ile birlikte yavaş yavaş hayatımızın her alanına giren Telsiz Duyarga Ağlarında enerji verimliliği ve gecikme problemleri üzerine yoğunlaşıldı. Kanal oylama tabanlı bir MAC protokolü olan AREA-MAC model olarak seçilmiş ve bu modelin farklı topolojiler altında farklı koşullarda benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve başarımlar sonuçları incelenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde 4 adet problem tespit edilmiş ve bu problemlerin çözümü önerilerde bulunulmuştur. Elde edilen bulgular sonucunda LINE-MAC protokolünün enerji verimliliğini arttırdığı, gecikmeleri azaltarak ağ da üretilen paketlerinde büyük oranda toplayıcıya iletilmesini sağladığı tespit edilmiştir.

İlerideki çalışmalarda, bu tez çalışmasında tasarlanan LINE-MAC protokolünü, çizgisel topolojideki TDA'lar için tasarlanmış olan enerji verimliliği yüksek ve paket gecikmeleri asgari seviyeye getirilmiş olan başka protokoller ile daha detaylı karşılaştırılması planlanmaktadır. İleride yapılması planlanan bu çalışmanın başarımlar değerlendirmesinin ise benzetim araçlarının yanısıra gerçek düğümler ile yapılması planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmad M., Dutkiewicz E and Huang X.,** 2011, Energy Efficient Cooperative MAC Protocols in Wireless Sensor Networks, Wireless Sensor Networks, Suraiya Trannum (Ed.), ISBN: 978-953-307-325-5.
- Akyildiz I., Su W., Shankarasubnamian Y and Cayirci E.,** 2002, A survey on sensor networks, IEEE Communication, 102-114 pp.
- Akyildiz I. F and Vuran M.,** 2010, Wireless Sensor Networks. John Wiley and Sons Ltd, 2010.
- Arisha K., Youssef M and Younis M.,** 2002, Energy-aware TDMA-based MAC for Sensor Networks, Proc. IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking (IMPACCT 2002), New York City (USA).
- Bachir A., Mischa D., Watteyne T and Leung K. K.,** 2010, MAC Essentials for Wireless Sensor Networks. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 12(2):222-248
- Bhardwaj M., Garnett T and Chandrasakann A. P.,** 2001, Upper bounds on the lifetime of sensor networks, in Communications, ICC 2001 IEEE International Conference on, 785-790 pp
- Bhattacharyya D., Kim T and Pal S.,** 2010, A comparative study of Wireless Sensor Networks and Their Routing Protocols, Sensors, 10506 – 10523
- Bhuse V and Gupta A.,** 2005 Anomaly Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks. Western Michigan University, Kalamazoo, MI-49008 Report.
- Buettner M., Yee G., Adreson E and Han R.,** 2006, X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty cycled wireless networks. In 4<sup>th</sup> ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Boulder, CO, 307-320 pp.
- Caneva D and Montessoro P.,** 2010, “A Synchronous and Deterministic MAC Protocol for Wireless Communication on Linear Topologies,” International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2010, 925-933 pp.
- Castalia.,** 2013, <http://castalia.research.nicta.com.au/index.php/en/> (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Changsoo O., Thadakamall H., Raghavan U., Kumara S., SangGook K., Xiang Z and Bukkapatnam S.,** 2007, Optimal Transmission Power in Self-Sustainable Sensor Networks for Pipeline Monitoring. In Automation Science and Engineering CASE 2007. IEEE International Conference on , 591-596 pp.
- Chen C. W and Wang Y.,** 2008, Chain-Type Wireless Sensor Networks for Monitoring Long Range Infrastructures: Architecture and Protocols. Int.J.Distrib. Sen. Netw., 287-314 pp.
- Chen F., Hao L and Lili Q.,** 2011, LC-MAC: An Efficient MAC Protocol for the Long-Chain Wireless Sensor Networks, in Communications and Mobile Computing (CMC) Third Conference , 495-500 pp.
- Chipcon Radios,** <http://focus.ti.com/analog/docs>. (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)
- Dargie W and Polleabauer C.,** 2010, Fundamentals of Wireless Sensor Networks, Theory and Practice. John Wiley and Sons Ltd.
- Dolay.,** 2013, <http://e-bergi.com/2009/Mayis/Kablosuz-Sensor-Aglari> (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)
- El-Hoiydi A and Decotignie J.,** 2004, WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks. In Ninth IEEE Symposium on Computers and Communication, ISCC04, 244-251 pp.
- Ephremides A and Mowafi O.,** 1982, Analysis of a Hybrid Access Scheme for Buffered User Probabilistic Time Division, IEEE Transactions on Software Engineering, 52-61 pp.
- Ersöz A.,** [http://innova.com.tr/blog/yazi.asp?ID=120&baslik=Teknolojide-yeniden-devrim-zamani\\_-Nesnelerin-Interneti](http://innova.com.tr/blog/yazi.asp?ID=120&baslik=Teknolojide-yeniden-devrim-zamani_-Nesnelerin-Interneti) (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)
- Garg V.,** 2007, Wireless Communication and Networking. Elsevier-Morgan Kaufmann Publishers.
- GenetLab.,** [http://na5b.myftp.org/TB2L/telsiz\\_duyarga\\_aglari.pdf](http://na5b.myftp.org/TB2L/telsiz_duyarga_aglari.pdf) (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)
- Haarsten J.,** 2000, The Bluetooth Radio System, IEEE Personal Communications, Vo.7, N.1, 28-36 pp.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Heinzelman W., Chandrakasan A and Balakrishnan H.,** 2002 An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 1(4).
- Hong L and Xu S.,** 2010, Energy-Efficient Node Placement in Linear Wireless Sensor Networks, In Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA) International Conference, 104-107 pp.
- Howitt I and Wnag J.,** 2004, Energy balanced chain in distributed sensor networks, In Wireless Communications and Networking Conference. WCNC. 2004 IEEE, 1721-1726 pp.
- IEEE 802.11.,** 1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- IEEE 802.15.4.,** 2006, MAC and PHY Specifications for LR-WPANs. <http://ieee802.org/15/pub/TG4.html> (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)
- Jawhar I., Mohamed N and Shuaib K.,** “A framework for pipeline infrastructure monitoring using wireless sensor networks,” Wireless Telecommunications Symposium, 2007. WTS 2007, 26-28 April 2007 1-7 pp.
- Karl H and Willig A.,** 2006, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. John Wiley and Sons Ltd.
- Klues K., Hackmann G., Chipara O and Chenyang L.A.,** 2007, A Component Based Architecture for Power Efficient Media Access Control in Wireless Sensor Networks. In the 5<sup>th</sup> International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'07).
- Kredo B and Mohapatra P.,** 2007, Medium Access Control in Wireless Sensor Networks. Computer Networks, 51(4):961-994
- Kumar P., Gunes M., Mushtaq Q and Schiller J.,** 2010, Performance Evaluation of AREA-MAC : A Cross-Layer Perspective. In the Fifth References 213 International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking(ICMU 2010), Seattle, USA.
- Kumar P., Gunes M., Mushtaq Q and Blywis B.,** 2009, A real time and energy efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks. International Journal of Ultra Wideband Communications and Systems ( IJUWBCS), 1(2):128-142.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kyung S., Jea Jun Y and Do Hyun K.,** 2007, Collision Warning System on a Curved Road Using Wireless Sensor Networks. In Vehicular Technology Conference, VTC-2007 Fall. IEEE 66<sup>th</sup>, 1942-1946 pp.
- Labrador M. A and Wightman P. M.,** 2009, Topology Control in Wireless Sensor Networks. Springer Science and Business Media B.V.
- Langendoen K. G.,** 2008, Medium access control in wireless sensor networks, Nova Science Publishers. Inc ., May 2008, 535-560 pp.
- Langendoen K and Reijers N.,** 2003, Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison” Computer Networks, 43(4).
- Li J., Lazarou G.,** 2004, A bitmap assisted energy efficient MAC scheme for Wireless Sensor Networks. Proc. International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004), Berkeley (USA), 56-60 pp.
- Lee E., Jwa Woo J and Kim H.,** 2013, “MFT-MAC: A Duty-Cycle MAC Protocol Using Multiframe Transmission for Wireless Sensor Networks,” International Journal of Distributed Sensor Networks, Article ID 858765, 6 pages, 2013.
- Li M and Liu Y.,** 2009, Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks. ACM Trans. Sen Netw., 1-29 pp.
- Li Y., Shue C. C., Song Y and Wang Z.,** 2007, Real-Time QoS support in wireless sensor networks: a survey. In 7<sup>th</sup> IFAC International Conference on Fieldbuses and Networks in Industrial and Embedded Systems, Toulouse, France.
- Majumder K and Sarkar Kumar S.,** 2010, “Clustered Chain based Power Aware Routing (CCPAR) Scheme for Wireless Sensor Networks”, International Computer Science and Engineering 2010, 2953-2963.
- MPR2400 Radio,** [http://www.willow.co.uk/html/mpr2400-micaz\\_zigbee.html](http://www.willow.co.uk/html/mpr2400-micaz_zigbee.html) (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)
- Ndoye M., Jacquet F., Misson M and Niang I.,** 2013, “Evaluation of RTS/CTS with unslotted CSMA/CA algorithm in linear sensor networks”, NICST’13, New and Smart Information Communication Science and Technology to Support Sustainable Development, 18-20 September 2013, Clermont Ferrand, France.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Omnet++** , 2013, <http://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html> (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013).
- Ping D and Suixiang G.**, 2008, Adjustment of Transmission Radius in Linear Wireless Sensor Networks. In Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. WiCOM'08. 4<sup>th</sup> International Conference on 1-4 pp.
- Polastre J., Hill J and Culler D.**, 2004, Versatile low power media access for wireless sensor networks. In 2<sup>nd</sup> ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems ( SenSys 2004), Baltimore, MD, 95-107 pp.
- Pottie G. J and Kaiser W. J.**, 2000, Wireless integrated network sensor. Communications of the ACM, 43:51\_58
- Rajendran V., Obraczka K and Garcia-Luna-Aceves J.J.**, 2003, Energy Efficient Collision Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In ACM SenSys, Los Angeles, CA.
- RFM TR Radio**, <http://www.rfm.com/products/data/tr3000.pdf> (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2013)
- Rghunathan V., Schurgers C., Park S and Srivastava M. B.**, 2002, Energy Aware Wireless Microsensor Networks, IEEE Signal Processing Magazine, 19(2): 40-50
- Rhee I., Warrier A., Aia M and Min J.**, 2005, Z-MAC: a Hybrid MAC protocol for Wireless Sensor Networks. Proc. ACM SenSys S Diego (USA).
- Santi P.**, 2005, Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. ACM Computing Surveys, 37(2):164-194
- Schurgers C., Tsiatsis V., Ganeriwal S and Srivastava M.**, 2002, Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space, IEEE transactions on Mobile Computing 1(1):70-80.
- Shokri R., Yazdani N and Khonsari A.**, 2007, Chain-Based Anonymous Routing for Wireless Ad Hoc Networks, in Consumer Communications and Networking Conference CCNC 2007, 4<sup>th</sup> IEEE, 2007 , 297-302 pp.
- Stankovic J., Abdelzaher T., Lu C., Sha L and Hou J.**, 2003, Real-time communication and coordination in embedded sensor networks. IEEE 1002-1022 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Stojanov I., Nachman L., Madden S., Tokmouline T and Csail M.,** 2007, PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitorig. In Information Processing in Sensor Networks. IPSN 2007.6<sup>th</sup> International Symposium on, 264-273 pp.
- Sun Y., Gurewitz O and Johnson D. B.,** 2008, A receiver initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks. In SenSys'08.
- Sunhee Y., Wei Y., Heidemann J., Littlefield B and Shahabi C.,** 2011, SWATS: Wireless sensor networks for steamflood and waterflood pipeline monitoring. Network IEEE, 50-56 pp.
- Tolle G., Polastre J and Szewczyk R.,** 2005, A macroscope in the redwoods. In 3<sup>rd</sup> ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), San Diego, CA, USA.
- Van Dam T and Langendoen K.,** 2003, An Adaptive Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In 1<sup>st</sup> ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys), 171-180 pp.
- Yadav R., Varma S and Malaviya N.,** 2008, Optimized Medium Access Control for Wireless Sensor Network, IJCSNS 334-338 pp.
- Ye W., Heidemann J and Estrin D.,** 2004, Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. IEEE/ACM Trans. Net., 12(3):493-506.
- Ye W., Heideman J and Estrin D.,** 2002, An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, IEEE INFOCOM, 1567-1576 pp.
- Zimmerling M., Dargie W and Reason J. M.,** 2008, Localized power aware routing in linear wireless sensor networks, presented at the proceedings of the 2<sup>nd</sup> ACM international conference on Contextawareness for self-managing systems Sdney Australia.
- Zheng J and Jamalipour A.,** 2009, Wireless Sensor Networks, A Networking Perspective. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Wang S. Y.,** 2003, Optimizing the packet forwarding throughput of multihop wireless chain networks. Computer Communications 1515-1532 pp.

**ÖZGEÇMİŞ**

Ad Soyad : Eren DEMİR

Doğum tarihi : 06.11.1985

Doğum yeri : Bursa

Adres : Atatürk mah. Fehmi Yiğın Cad. No:22/1 Bornova/İzmir

Telefon :(+90) 507 742 1734

E-mail : [erendemir33@gmail.com](mailto:erendemir33@gmail.com)

Eğitim :

- 2004–2008 Çankaya Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
- 1999–2003 İçel Mersin Anadolu Lisesi

İş Tecrübeleri :

- 2011–halen Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü - Araştırma Görevlisi
- 2009-2010 Yazıcı Ltd.Şti / Ankara - Mühendis
- 2007-2008 ASELAN A.Ş. /Ankara – Stajyer
- 2006-2007 DHMİ Esenboğa /Ankara – Stajyer.