

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

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN ÖNCELİK
TABANLI YENİ BİR YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ
TASARIMI VE BAŞARIM ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Aytaç KAYA

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin EKİZ

Ocak 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

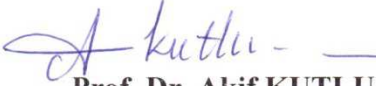
KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN ÖNCELİK TABANLI
YENİ BİR YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ TASARIMI VE
BAŞARIM ANALİZİ


DOKTORA TEZİ


Aytaç KAYA


Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ


Bu tez 30/01/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Akif KUTLU
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Hüseyin EKİZ
Üye


Yrd. Doç. Dr. Ahmet ZENGİN
Üye


Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÖZÇELİK
Üye


Yrd. Doç. Dr. Tuncay AYDOĞAN
Üye

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışmasında danıőmanlıęımı yapan Prof. Dr. Hüseyin EKİZ hocama, tezimin her aşamasında desteklerini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ahmet ZENGİN hocama, benim bu günlere gelmemde çok fazla emeği bulunan anne ve babama, beni sürekli motive eden her zaman maddi manevi desteğini esirgemeyen eőime teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvi
SUMMARY	xvii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	3
1.2. Tez Çalışmasının Amacı, İzlenen Çalışma Yöntemi ve Katkıları	6
1.3. Tez Organizasyonu	8

BÖLÜM 2.

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR.....	10
2.1. Giriş.....	10
2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağların Tarihi.....	11
2.3. Kablosuz Algılayıcı Düğüm Yapısı	12
2.4. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda İletişim Mimarisi.....	16
2.4.1. Protokol yığını	16
2.4.2. Fiziksel katman	18
2.4.3. Veri bağı katmanı.....	18
2.4.4. Ağ katmanı.....	20
2.4.5. Ulaşım katmanı	21
2.4.6. Uygulama katmanı	21
2.5. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Uygulama Alanları.....	21

2.5.1. Askeri uygulamalar	22
2.5.2. Çevre algılaması ve izleme	22
2.5.3. Felaketten korunma ve kurtarma	23
2.5.4. Tıbbi hizmetler	23
2.5.5. Akıllı yapılar	23
2.5.6. Üretim süreçleri	25
2.6. Kablosuz Algılayıcı Ağların Üstünlükleri	26
2.7. Kablosuz Algılayıcı Ağların Olumsuzlukları	27
2.8. Gelecekte Algılayıcı Düğümler ve Ağlar.....	28

BÖLÜM 3.

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ	29
3.1. Giriş.....	29
3.2. Yönlendirme Protokollerinin Tasarım Kısıtları	29
3.3. Yönlendirme Bileşenleri	33
3.4. Yönlendirme Protokollerinin Sınıflandırılması	35
3.4.1. Ağ yapısına göre sınıflandırma.....	35
3.4.2. Protokol işleyişine göre sınıflandırma	36
3.4.3. Yol belirlemesine göre sınıflandırma.....	37
3.5. Konum Tabanlı Yönlendirme	38
3.5.1. İşaretsiz (Beaconless) konum tabanlı yönlendirme	40
3.5.2. SIF protokolü	43
3.5.3. Boşluk bölgesi.....	46
3.5.4. Konum belirleme	47
3.5.5. Konum hatalarının yönlendirmeye etkisi.....	51
3.6. Servis Kalitesi Tabanlı Yönlendirme.....	52
3.6.1. Kablosuz algılayıcı ağlarda servis kalitesi desteği.....	53
3.6.2. Kablosuz algılayıcı ağlarda servis kalitesi desteği zorlukları	54

BÖLÜM 4.

ÖNCELİK TABANLI YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ VE KARŞILAŞTIRILMASI	56
4.1. PRIMAR Protokolü	57

4.2. CAR Protokolü.....	59
4.3. QBRP Protokolü	62
4.4. MDML Protokolü	63
4.5. RRR Protokolü.....	65
4.6. Revize Edilmiş RRR Protokolü	65
4.7. PDAR Protokolü	69
4.8. PISA Protokolü	71
4.9. MMSPEED protokolü.....	72
4.10. Mevcut Protokollerin Karşılaştırılması ve Yetersizlikleri	75
4.10.1. Karşılaştırma ölçütleri.....	75
4.10.2. Konu ile ilgili incelenen çalışmaların eksiklikleri	77

BÖLÜM 5.

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ MODELLEME VE BENZETİM ARAÇLARI	81
5.1. Giriş.....	81
5.2. Benzetim Aracı	81
5.2.1. Omnet++ tümleşik geliştirme ortamı.....	84
5.3. Mixim Modeli	86
5.3.1. Mixim fiziksel katman	87

BÖLÜM 6.

İŞARETSİZ ÖNCELİK TABANLI YENİ BİR YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ

TASARIMI	93
6.1. Giriş.....	93
6.2. PBBR Protokolü Varsayımları.....	93
6.3. PBBR Protokolü Özellikleri.....	94
6.4. PBBR Protokolünün Çalışma Mantığı.....	94
6.4.1. Aday olamayacak düğümlerin tespit edilmesi	99
6.4.2. Aday düğümlerin hesaplamaları	102
6.4.2.1 Mesafe etkisi	102
6.4.2.2 Kuyruk etkisi.....	106
6.4.2.3 Enerji etkisi	107
6.4.2.4 İDGO etkisi.....	108

6.4.2.5 İBO etkisi	109
6.4.2.6 Rastgelelik etkisi	110
6.5. PBBR Protokolü Yönlendirme Yönetim Aktiviteleri	110
6.5.1. Boşluk bölgesi yönetimi	110
6.5.2. Çekişme süreci yönetimi	111
6.5.3. Tıkanıklık yönetimi	113
6.5.4. Hareketlilik yönetimi	114
6.6. Paket Çerçeve Yapıları	115
BÖLÜM 7.	
PBBR PROTOKOLÜ BAŞARIM ANALİZİ	118
7.1. Giriş	118
7.2. Benzetim Parametreleri	118
7.3. Paket Teslim Oranı	121
7.4. Ortalama Paket Gecikmesi	127
7.5. Enerji Tüketimi	132
7.6. Yönlendirme Yüğü	134
7.7. Kapsama Alanı	137
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	139
8.1. Sonuçlar	139
8.2. Tartışma ve Öneriler	142
KAYNAKLAR	144
EKLER	151
ÖZGEÇMİŞ	159

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ACK	: Acknowledgement
ADC	: Analog Digital Converter
ADP	: Alıcı Duyuru Paketi
AoA	: Angle of Arrival
AUP	: Alıcıya Ulaşan Paket
AUPBKP	: Alıcıya Ulaşan Veri Paketi Başına Kullanılan Kontrol Paket Sayısı
AUPBTE	: Alıcıya Ulaşan Paket Başına Tüketilen Enerji
BA	: Baz istasyonu Adresi
BGR	: Blind Geographic Routing
BLR	: Beaconless Routing
CAR	: Congestion Aware Routing
CBF	: Contention Based Forwarding
CDMA	: Code Division Multiple Access
CRC	: Cyclic Redundancy Check
CSMA	: Carrier Sense Multiple Access
CTS	: Clear to Send
ÇK	: Çerçeve Kontrol
DARPA	: Defense Advanced Research Agency
DIFS	: Distributed Coordination Function InterFrame Spacing
DN	: Dilim Numarası
DÖ	: Düşük Öncelikli
DSN	: Distributed Sensors Net
ETX	: Expected Transmission Count
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
FIFO	: First In First Out
FL	: Frame Length
GERAF	: Geographic Random Forwarding

GO	: Güvenilirlik Olasılığı
GPS	: Global Position System
GPSR	: Greedy Perimeter Stateless Routing
GUI	: Graphical User Interface
HA	: Hedef Adres
IDE	: Integrated Development Environment
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGF	: Implicit Geographic Forwarding
IR	: Infrared
İBO	: İletim Başarı Oranı
İDGO	: İleri Düğüme Gönderme Oranı
KA	: Kendi Adresi
MAC	: Medium Access Control
MCFA	: Minimum Cost Forwarding Algorithm
MDML	: Minimum Delay Maximum Lifetime
MF	: Mobility Framework
MMSPEED	: Multipath Multi SPEED
ÖB	: Öncelik Bilgisi
SFD	: Start of Frame Delimiter
SIFS	: Short InterFrame Spacing
SN	: Sıra Numarası
P2P	: Peer to Peer
PBBR	: Priority Based Beaconless Routing
PDAR	: Priority Based Dynamic Adaptive Routing
PDU	: Protocol Data Unit
PISA	: Priority-Based Routing for Solar-Powered
PRIMAR	: Prioritize Multipath Routing
PS	: Preamble Sequence
PSGR	: Priority-Based Stateless Geo-Routing
PTO	: Paket Teslim Oranı
PTX	: Paket tutucu düğümün X konumu
PTY	: Paket tutucu düğümün Y konumu
QBRP	: Quality of Service Based Routing Protocol

RF	: Radio Frequency
RRR	: Random Re-Routing
RRSI	: Received Signal Strength Indicator
RSS	: Received Signal Strength
RTS	: Request to Send
SIF	: State-free Implicit Forwarding
SNR	: Signal Noise Ratio
SOSUS	: Sound Surveillance System
TDMA	: Time Division Multiple Access
TDoA	: Time Difference of Arrival
TGO	: Uçtan uca Ulaşılabilirlik Olasılığı
ToA	: Time of Arrival
UOPG	: Uçtan uca Ortalama Paket Gecikmesi
US	: Ultra Sound
YÖ	: Yüksek Öncelikli
YS	: Yaşam Süresi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Algılayıcı alanına dağıtılmış algılayıcı düğümler [10].....	10
Şekil 2.2.	1985’lerdeki DSN parçaları [11].....	12
Şekil 2.3.	Tipik bir algılama düğümü [13]	13
Şekil 2.4.	Algılayıcı teknolojisinin süreç içerisindeki gelişimi (kısmi örnek)	14
Şekil 2.5.	Hesaplama ve saklama kapasitesine göre KAA düğümlerinin sınıflandırılması [14]	15
Şekil 2.6.	Algılayıcı ağ protokol yığını [10].....	18
Şekil 2.7.	Kablosuz algılayıcı ağlarda MAC protokolleri [16]	19
Şekil 3.1.	Yönlendirme protokolü bileşenleri [27].....	33
Şekil 3.2.	Kablosuz algılayıcı ağlarda yönlendirme protokollerinin sınıflandırılması [26]	35
Şekil 3.3.	SIF potansiyel aktarma alanı ve düğümleri.....	44
Şekil 4.1.	PRIMAR protokolünde yolların oluşturulması [1]	57
Şekil 4.2.	CAR protokolünde yüksek ve düşük öncelikli trafiğin yönlendirilmesi [2]	60
Şekil 4.3.	RRR ile paket aktarma [6].....	66
Şekil 4.4.	RRR protokolü saptırmasız yönlendirme [6]	67
Şekil 4.5.	RRR protokolü saptırma ve durağanlık ile yönlendirme [6].....	68
Şekil 4.6.	Geliştirilmiş RRR protokolünde paket aktarma [6]	69
Şekil 4.7.	PDAR protokolü yönlendirme tablosu oluşturma [7]	70
Şekil 4.8.	Hedef düğüme doğru i düğümünden j düğüme ilerleme hızı.....	72
Şekil 5.1.	Sıralı kartlar ile gerçekleşen olaylar arasında gezinme	85
Şekil 5.2.	Radyo durumları arasında anahtarlama ve zamanlama [74]	87
Şekil 5.3.	Boyut bilgileri [74].....	88
Şekil 5.4.	Fiziksel katman sınıf diyagramı [74]	90
Şekil 6.1.	PBBR el sıkışması	96
Şekil 6.2.	PBBR el sıkışma süreci akış şeması.....	97

Şekil 6.3.	Veri paketi iletim tekrarı akış şeması	98
Şekil 6.4.	Hedefe doğru ilerleme yönleri.....	100
Şekil 6.5.	Negatif ilerleme bölgesindeki düğümlerin üst ve alt olarak ayrıştırılması.....	100
Şekil 6.6.	Aday olamayacak düğümlerin belirlenmesi.....	101
Şekil 6.7.	Pozitif ilerleme bölgesinin açığı ve mesafeye göre dilimlenmesi.....	103
Şekil 7.1.	Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)	121
Şekil 7.2.	Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)..	122
Şekil 7.3.	Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı).....	123
Şekil 7.4.	Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)	124
Şekil 7.5.	Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretim hızı).....	125
Şekil 7.6.	Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)	125
Şekil 7.7.	Farklı paket üretme hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)	127
Şekil 7.8.	Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz).....	128
Şekil 7.9.	Farklı düğüm hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)	129
Şekil 7.10.	Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı).....	130
Şekil 7.11.	Farklı düğüm yoğunluklarında UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretim hızı).....	130
Şekil 7.12.	Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)	131

Şekil 7.13. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)	132
Şekil 7.14. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)	133
Şekil 7.15. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı).....	134
Şekil 7.16. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısının değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)	135
Şekil 7.17. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı).....	136
Şekil 7.18. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı).....	137

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	UC Berkeley tarafından geliştirilmiş olan kablosuz algılayıcı düğümlerin karşılaştırılması [12].....	15
Tablo 2.2.	Algılayıcı düğümlerin karışıklığı azaltılmış sınıflandırması [13].....	16
Tablo 3.1.	Uygulama gereksinimleri [52]	53
Tablo 4.1.	Öncelik tabanlı protokollerin karşılaştırması.....	78
Tablo 5.1.	Yaygın olarak kullanılan benzetim yazılımları ve özellikleri [59]	82
Tablo 6.1.	PBBR protokolünün fiziksel katman paket formatı.....	115
Tablo 6.2.	PBBR protokolünün paket türü kodları	116
Tablo 6.3.	PBBR protokolünün MAC katmanı RTS paketi formatı.....	116
Tablo 6.4.	PBBR protokolünün MAC katmanı CTS paketi formatı.....	117
Tablo 6.5.	PBBR protokolünün MAC katmanı veri (DATA) paketi formatı	117
Tablo 6.6.	PBBR protokolünün MAC katmanı ACK paketi formatı.....	117
Tablo 7.1.	MMSPEED protokolüne ait benzetim parametre değerleri.....	119
Tablo 7.2.	CC2420 radyo alıcısının parametre değerleri	120
Tablo 7.3.	Deney gruplarının düğüm ile ilgili parametreleri	120
Tablo 7.4.	Benzetimde kullanılan PBBR protokolüne ait parametre değerleri....	120
Tablo 7.5.	Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)	122
Tablo 7.6.	Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)	123
Tablo 7.7.	Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretim hızı).....	123
Tablo 7.8.	Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretim hızı).....	124
Tablo 7.9.	Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)	125

Tablo 7.10. Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)	126
Tablo 7.11. Farklı paket üretme hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz).....	128
Tablo 7.12. Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)	128
Tablo 7.13. Farklı düğüm hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)	129
Tablo 7.14. Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı).....	130
Tablo 7.15. Farklı düğüm yoğunluklarında UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)	131
Tablo 7.16. Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretme hızı).	131
Tablo 7.17. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz).....	132
Tablo 7.18. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)	133
Tablo 7.19. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)	134
Tablo 7.20. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısının değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz).....	135
Tablo 7.21. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretme hızı)	136
Tablo 7.22. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)	137

Tablo 7.23. Farklı paket üretim hızları için süre dolduğunda yaşayan düğüm sayıları (90 düğüm ve düğümler hareketsiz).....	138
Tablo 7.24. Farklı düğüm hareket hızları için süre dolduğunda yaşayan düğüm sayıları (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)	138
Tablo 7.25. Farklı düğüm sayıları için süre dolduğunda yaşayan düğüm sayıları (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı).....	138

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Yönlendirme Protokolü, Öncelik Tabanlı, Coğrafik Yönlendirme, Omnet++

Gelişen teknolojiyle birlikte boyutu küçük ve hata oranı düşük, işlem gücü ve iletim becerileri yüksek, üzerinde birden fazla algılayıcı barındırabilen uygun fiyatlı algılayıcı düğümler tasarlanabilmektedir. Algılama, hesaplama ve iletim yapabilen yüzlerce hatta binlerce algılayıcı düğüm bir araya gelerek kablosuz algılayıcı ağları oluşturur.

Kablosuz algılayıcı ağlar düşük maliyetli ve çok işlevsel düğümlerden oluştuğundan genelde ulaşılması güç ve geniş alana sahip bölgelerde yapılan uygulamalarda öne çıkmaktadır. Enerji kaynakları sınırlı olan düğümlerin, bakım veya düzenleme yapılmaksızın uzun süre algılama ve iletim yapabilmeleri önemlidir.

Kablosuz algılayıcı ağların en önemli problemlerinden birisi yönlendirmedir. Kendine özgü karakteristiklerinden dolayı kablosuz algılayıcı ağlara özel protokoller tasarlanması gerekmektedir. Yüzlerce düğümden oluşan kablosuz algılayıcı ağlar, birim zamanda çok fazla sayıda veri üretirler. Büyük miktarda üretilen verinin iletilmesi esnasında oluşacak tıkanıklık gibi durumlardan dolayı önemsiz veriler alıcıya teslim edilirken daha önemli verilerin alıcıya zamanında ya da hiç ulaştırılamaması ciddi bir problemdir. Yüksek öncelikli veriler yüksek paket teslim oranı ve beklenen düşük gecikme ile iletilemediğinde, doğal felaketler gibi acil tedbir üretilmesi gereken uygulamalarda hem maddi hem de manevi kayıplar yaşanır.

Bu tez çalışmasında, kablosuz algılayıcı ağlarda veri önceliği kaynak düğüm tarafından belirlenen, yüksek öncelikli verilere daha iyi hizmet sağlarken tüm verilerin alıcıya teslim edilmesini hedefleyen “İşaretsiz Öncelik Tabanlı Yönlendirme – PBBR” (Priority Beaconless Based Routing) adı verilen yeni bir yönlendirme protokolü tasarlanmıştır. Tasarlanan “PBBR” protokolünün “Omnet++” benzetim aracı kullanılarak başarımı incelenmiştir. “PBBR” protokolü yönlendirme ek yükü, paket teslim oranı ve uçtan uca ortalama paket gecikmesi açısından yüksek başarımla elde etmektedir. Bunlar dışında “PBBR” protokolü daha az bellek kapasitesi kullanmakta, veri üretilen sahanın genişliğini daha uzun süre korumakta ve her bölgeden veriyi hedef alıcıya ulaştırmaktadır.

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A NEW PRIORITY – BASED ROUTING PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

SUMMARY

Keywords: Wireless Sensor Networks, Routing Protocol, Priority Based, Geographic Routing, Omnet++

By means of developing technology, it is possible to design sensor nodes with suitable prices, in small sizes, with low fault rates, containing more than one sensor and with high processing and transmitting capabilities. Wireless networks are built through thousands of combined sensor nodes which can sense, calculate and transmit.

As wireless sensor networks are low cost and composed of multi-functional nodes, they are usually used in wide regions where access is difficult. It is important that they are able to sense and transmit for a long time without having any maintenance or adjustment with limited energy sources.

One of the most important problems of wireless sensor networks is routing problem. Special protocols for the wireless sensor networks are required to be designed because of its own characteristics. Wireless sensor networks consisted of hundreds of nodes generate a great deal of data at a unit time. Because of situations like blockage while transmitting the huge generated data, not being able to deliver more important data in time or unable to deliver the data at all may emerge as a serious problem while insignificant data are delivered to the receiver. When high priority data with high packet delivery rates and the low expected delay cannot be transmitted, both material and spiritual losses are experienced in cases such as natural disasters which need urgent measures.

In this thesis, a new routing protocol PBBR” (Priority Beaconless Based Routing) was designed which was determined by the source node wireless sensor networks and aimed delivering all data to the receiver as well as providing a better service for high priority data. The performance of the designed "PBBR" protocol was analyzed by simulation tool “Omnet ++”. PBBR protocol gives much better results according to routing additional load, packet delivery rate and end to end average packet delay. In addition to these, "PBBR" protocol uses less memory capacity, maintains the width of the area where the data are generated for a longer period and transmits data from each region to the target receiver.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yaşadığımız bilgi çağında geçmişe kıyasla her gün daha fazla bilgi üretilmekte ve karar verme süreçlerinde bu bilgilere talep artmaktadır. Artan bilgi taleplerini karşılamada tasarımcılar bilgiye daha kolay ve doğru zamanlama ile erişim sağlayacak daha gelişmiş özelliklerde donanımlar tasarlamaya çalışmaktadır. Tasarlanmakta olan ürünler, gelişen teknolojilerle birlikte daha ergonomik ve daha uygun maliyetle üretilmektedir. Ürünlerin ucuz maliyetli ve ergonomik üretilebilmesi kullanımlarının yaygınlaşmasına yol açmıştır. Özellikle taşınabilirliği artırarak kullanım kolaylığı getiren kablosuz teknolojiler günümüzde milyarlarca kişinin kullandığı ürünler olmuştur.

Günümüz teknolojileri yardımıyla bir kablosuz düğüme, nem, ısı, basınç vb. değerleri ölçen birden fazla algılayıcı eklenerek kablosuz algılayıcı düğümler üretilmektedir. Üzerinde bir ya da daha fazla algılayıcı barındıran yüzlerce kablosuz algılayıcı düğümün bir araya getirilmesiyle oluşturulan “kablosuz algılayıcı ağlar - KAA”, askeri alanlardan sağlığa, akıllı evlerden otomasyon sistemlerine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmakta ve kullanım alanları her geçen gün artmaktadır.

Bir ya da daha fazla sayıda algılayıcı, işlemci, veri hafıza birimi, veri gönderme / alma birimi ve enerji biriminden oluşan kablosuz algılayıcı düğümler, uygun maliyetle üretildiğinden, uygulama alanından kapsamlı bilgi toplayabilen ve işleyebilen kablosuz algılayıcı ağ uygulamaları düşük maliyetlerle gerçekleştirilebilmektedir. Ancak kablosuz algılayıcı düğümlerin işlemci becerileri, veri hafıza birimleri, pil enerjileri, gönderme / alma güçleri, veri iletim hızları düşüktür. Kablosuz algılayıcı ağlar için geliştirilecek uygulamalarda ve kullanılacak protokollerde kablosuz algılayıcı düğümlerin kısıtlı kaynakları dikkate alınmalıdır. Örneğin, birçok uygulamada kablosuz algılayıcı düğümlerin enerji kaynakları

yenilenemeyebilir ve düğümler işlevsiz kalabilir. Düğümlerin işlevsiz kalmaması için önerilecek en temel yöntem, kullanılacak protokollerin enerji etkin olmasıdır.

Kablosuz algılayıcı ağlarda, yüzlerce kablosuz algılayıcı düğümün ürettiği veriler bir ya da birkaç tane az sayıda alıcıya teslim edilir. Kablosuz algılayıcı düğümler nihai hedef alıcıya doğrudan ulaşabilecek enerji ve iletim kaynaklarına sahip olmadıklarından, veri paketlerini nihai hedef alıcıya komşu düğümler üzerinden aktararak teslim ederler. Üretilen verilerin nihai hedef alıcıya olabildiğince kayıpsız ve düşük gecikme ile gönderilmesi gerektiğinden verinin aktarılacağı uygun düğümün belirlenmesi önem arz eder. Paketlerin nihai hedef alıcıya teslim edilmesi sürecinde uygun düğümlerin belirlenmesi görevini yönlendirme protokolleri gerçekleştirir.

Kaynak düğüm olarak ifade edilen kablosuz algılayıcı düğümler, üzerinde barındırdığı algılayıcılar vasıtasıyla çevresindeki ilgili değerleri toplayarak veri üretirler. Kablosuz algılayıcı ağlarda, kullanılan kablosuz algılayıcı düğüm sayısına orantılı olarak üretilen veri miktarı artacaktır. Üretilen veri miktarı arttıkça tüm veri paketlerinin nihai hedef alıcıya teslim edilmesi mümkün olamayabilir. Üretilen verilerin kaynak düğüm tarafından önemlerine göre en az iki gruba ayrıştırıldığı uygulamalarda, veriler önemlerine göre farklı teslim gereksinimlerine sahiptir. Bu tür uygulamalarda, bir kablosuz algılayıcı ağın, nihai hedef alıcıya önemi düşük olan “düşük öncelikli” veri paketlerini teslim ederken; önemi yüksek olan “yüksek öncelikli” veri paketlerini teslim edememesi ya da daha yüksek gecikme ile teslim etmesi önemli bir problemdir. Problemin çözümü için yüksek öncelikli veri paketleri düşük öncelikli veri paketlerine göre daha düşük gecikme ve paket kayıp oranı ile iletilmelidir.

Veri paketlerinin önceliklerine göre farklı teslim gereksinimlerini karşılayan ve “öncelik tabanlı yönlendirme protokolü” olarak ifade edilen protokoller giderek önem kazanmaktadır. Kablosuz algılayıcı ağlar için oldukça yeni ve bakir olan bu konu, yapılan çalışmanın çıkış noktasını oluşturmuştur. Çalışmada, kablosuz algılayıcı ağ uygulamasının yapıldığı sahanın zaman içerisinde daralmasını yavaşlatacak, kısıtlı donanım kaynaklarını daha verimli kullanacak ve üretilen tüm

verilere önceliklerine göre farklı teslim gereksinimlerini karşılayacak bir yönlendirme protokolü tasarımı hedeflenmiştir. Konunun genişliğini anlamak bakımından bir sonraki başlıkta mevcut öncelik tabanlı yönlendirme protokollerinin özetleri / özellikleri verilmiştir.

1.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Huang ve Fang gerçekleştirdikleri çalışmada, verilerin önceliklerine göre teslim gereksinimlerini karşılayabilmek için kaynak ile alıcı arasında birden fazla yol kullanan “öncelikli çok yollu yönlendirme” (Prioritize Multipath Routing - PRIMAR) protokolünü geliştirmişlerdir. PRIMAR protokolünde; her düğüm her veri önceliği seviyesi için uygun yollar içeren yönlendirme tablosu tutar. Her düğümde her veri önceliği seviyesi için bir topoloji katmanı tutulur. Böylece verinin önceliğine göre sadece o katmandaki topoloji dikkate alınır. Veri trafiği arttığında, tıkanıklık ve paket kaybını önlemek adına trafiği hafifletmek için borç yol mekanizması çalıştırılarak diğer elverişli ve kapasiteli yollar kullanılır. Düğüm, kullanılan yolda bir problem oluşması durumunda veri paketini yayınlar ve paketin çoklu kopyası ağa yayılır. Bir düğümün yönlendirme tablosunda herhangi bir değişiklik olduğunda, bu değişiklik tüm diğer düğümleri sırasıyla etkiler. Tüm düğümlerin etkilenmemesi için bir gecikme eşiği değeri belirlenir. Bu eşikten küçük değişimlerde mevcut yollarla idare edilirken; trafik hafiflediğinde yol güncellemeleri ve tablo değişimleri yapılır [1].

Kumar ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, veri teslimi için “tıkanıklık farkında yönlendirme” (Congestion Aware Routing - CAR) yönlendirme protokolünü geliştirmişlerdir. CAR protokolü, minimum mesafe kapsayan ağaç yapısı kullanır ve yapıda düğümler çoklu ebeveyn kullanarak yükün dengeli dağılmasını sağlar. Kardeş – ebeveyn düğümler, tıkanık alan keşfi yapılarak tıkanık alanın dışındakiler ve içindikiler olarak ayrıştırılır. Tıkanık alan düğümleri yüksek öncelikli veriye hizmet ettiğinden düşük öncelikli veriler en uygun seçeneğe kıyasla kötü yollardan yönlendirilir. Tıkanık alan kullanılmadığında yok edilir. Yüksek öncelikli veriye daha iyi hizmet için “CAR+” ve “CAR++” kullanılırken; bunların dengeli kullanımı için “dinamik CAR” çalıştırılır [2].

Boukerche ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, alt ağlara bölünen ağda küme başı düğümlerin kapsadıkları düğümlere ait bilgiyi kendi içinde topladığı “servis kalitesi temelli yönlendirme” (Quality of Service Based Routing Protocol - QBRP) protokolünü geliştirmişlerdir. Her alt ağın alıcısı topladığı bilgileri kullanarak yolları kalitesine göre sıralar ve düğümlere gönderir. Kendi yönlendirme tablolarını oluşturan düğümler, kontrol paketlerinde ek olarak kendi enerji vb. bilgilerini gönderirler [3].

Jafarian ve Jaseemuddin gerçekleştirdikleri çalışmada, her veri önceliği seviyesi için ayrı kuyruk kullanan “minimum gecikme maksimum yaşam ömrü” (Minimum Delay Maximum Lifetime - MDML) protokolünü gerçekleştirmiştir. MDML protokolünde, önce yüksek öncelikli kuyruktaki paketler, bu paketler bittiğinde ise düşük öncelikli kuyruktaki paketler iletilir. Yüksek öncelikli veri paketi gönderen bir düğüm, karşılığında paketin alındığını belirten “kabul” (Acknowledgement - ACK) paketini alamadığında tüm komşularına bu veri paketini yayınlar. MDML protokolü, kuyruk gecikmelerini yok kabul ederek yol maliyetinde atlama sayısı, bağlantı kalitesi ve kalan enerji bilgilerini kullanır. Bağlantı kalitesinin ölçümü beklenen iletim sayısı tahmini ile yapılır. Yollar belirlenen bir sürede periyodik olarak güncellenir [4].

Gelenbe ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, veri paketlerinin alıcıya atlama sayısına dayalı yönlendirildiği “rastgele yeniden yönlendirme” (Random Re Routing - RRR) protokolünü geliştirmişlerdir. RRR protokolü dört parçadan oluşur: yol keşfi, komşu tablo güncelleme, paketlere öncelik tahsisi ve paketlerin önceliğine dayalı yol seçimi. Her düğüm i_1 - i_H komşu düğümlerini alıcıya atlama sayısına göre derecelendirir. i_1 ; en yakın iken i_H ; en uzaktır. Trafik eşik değerinden yüksekse nadir olay paketleri i_1 - i_K komşulara aktarılırken, rutin paketler geriye kalan i_{K+1} - i_H komşularına aktarılır [5].

Hey ve Gelenbe gerçekleştirdikleri çalışmada, düğümlerin komşularını hedefe ilerleme mesafelerine göre en iyi, pozitif ve negatif olarak listelediği “revize edilmiş RRR” protokolünü geliştirmişlerdir. Revize edilmiş protokolda, yüksek öncelikli veri paketleri en iyi komşuya aktarılırken düşük öncelikli veri paketleri pozitif komşular arasında bölünerek aktarılır. Çalışmada nihai hedef alıcının merkezde olduğu ve

kaynak / aktaran düğüm tarafından halkalar şeklinde çevrildiği bir kablosuz algılayıcı ağ düşünülmüştür. Düğümler, komşularının ilettiği veri paketlerini dinler ve kendisinden daha fazla yüksek öncelikli veri paketi aktaran komşularının koordinatlarını ortalayarak o noktaya ters yönde düşük öncelikli paketlerini aktarmayı dener. Böylece yüksek öncelikli veri trafiğinden uzaklaşarak iletişimde çarpışmalara neden olmaz ve gecikmelerin artmasının önüne geçilir. Düşük öncelikli veri trafiğine bir miktar durağanlık verilerek yüksek öncelikli veri trafiği sahasının dışında aynı yönde devam etmeleri sağlanır [6].

Chen ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, yüksek öncelikli veri paketlerinin her zaman “en kısa yol” boyunca gönderildiği “öncelik temelli dinamik uyarlamalı yönlendirme” (Priority based Dynamic Adaptive Routing - PDAR) protokolünü geliştirmişlerdir. PDAR protokolünde, kuyruktaki yüksek öncelikli veri paketleri başarılı gönderilene veya düşürülene kadar düşük öncelikli veri paketleri bekletilir. Tıkanıklık tahmin stratejisine göre, bir düğüm meşgul olduğunu anladığında komşularını bilgilendirir. Bilgilenen komşu düğümler, düşük öncelikli veri paketlerini diğer düğümler üzerinden gönderirler. Böylece meşgul düğümün kapasitesi tamamen yüksek öncelikli veri paketlerine ayrılır [7].

Kandasamy ve Krishnan gerçekleştirdikleri çalışmada, her öncelik seviyesine ayrı servis kalitesi sağlayacak uyarlanabilir alt bir algoritma seçen “öncelik temelli yol seçme algoritması” (Priority-based Path Selection Algorithm - PISA) protokolünü geliştirmişlerdir. PISA protokolünde, bir düğüm gecikme hassas olan yüksek öncelikli veri paketi aldığı anda PISA-I; minimum enerji tüketimli düşük öncelikli veri paketi aldığı anda PISA-II ve yüksek öncelikli en kritik veri paketi yönlendirmede PISA-III algoritmasını çalıştırır. Potansiyel ilerleme değerlerine göre yollar yüksekten başlayarak sırasıyla en iyi, ikinci ve üçüncü yol olarak sınıflanır. PISA-I algoritması, kaynak düğümden veriyi göndereceği hedef düğümü seçerken kaynaktan alıcıya doğru düğümlerin potansiyel ilerleme değerini kullanır. Düğümler hesaplama yaparken, komşularına ilerleme değeri ile birlikte komşularının da komşularına maksimum potansiyel ilerleme değerini kullanır. PISA-III, PISA-I algoritmasına ek olarak çoklu yol kullanımı sağlar [8].

Felemban ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, veri paketlerinin güvenilir ve zamanında aktarılması için farklılaştırılmış servis kalitesi sağlamaya çalışan “çoklu yol çoklu hız” (Multipath Multi SPEED - MMSPEED) protokolünü geliştirmişlerdir. MMSPEED protokolünde, veri paketleri öncelikli yol oluşturulmadan yerel olarak verilen yönlendirme kararı ile yönlendirilir. Kaynak düğüm veri paketinin içeriğine dayalı olarak uygun uçtan uca ulaşma zamanı ve istenilen ulaşılabilirlik olasılığını seçer. Düğümler, komşularının hedefe doğru ilerleme hızı, paket kayıp oranı ortalaması ve düğüm güvenilirlik olasılığı bilgilerini bir tabloda tutarken; farklı hız ihtiyacı olan veri paketleri için ayrı bir kuyruk kullanır. Bir düğüm veri paketi göndermek istediğinde istenilen ulaşılabilirlik olasılığını elde etmek için uçtan uca gecikmeye uygun hız gereksinimini karşılayan düğümler arasından çoklu aktarma düğümlerini belirler. Gönderilecek veri paketinin birer kopyası bu çoklu aktarma düğümlerine yayın yoluyla gönderilir. Kopya veri paketleri ağı farklı bölgelerine yönlendirilerek hedefe ulaşma olasılığı yükseltilir. Veri paketinin hız gereksinimi her düğümde yeniden hesaplanır. Ortam erişimi hakkını elde ederken MAC katmanında veri paketi önceliğine göre geri çekilme aralığı belirlenerek öncelikli verilere avantaj sağlanır [9].

Yukarıda sayılan tüm çalışmalar Bölüm 4’te detaylı olarak açıklanmakta ve belirli ölçütlere göre karşılaştırılmaktadır. Çalışmalar hakkında özet olarak, mevcut protokollerin, bellek kullanımı ve uygulama sahasının her bölgesinden elde edilen verilerin alıcıya ulaştırılması hususunu dikkate almadığı söylenebilir.

1.2. Tez Çalışmasının Amacı, İzlenen Çalışma Yöntemi ve Katkıları

Kablosuz algılayıcı ağlar küçük ve düşük maliyetli düğümlerden oluştuğundan, çoğunlukla ulaşılması güç ya da maliyetli ve geniş bölgelerde gözetleme yapılan uygulamalarda öne çıkmaktadır. Yanardağ faaliyetleri, orman yangınları, değerli maddeleri taşıyan boru hatları gibi geniş her an ulaşılması güç olan bölgelerde gözetleme yapılması gereken uygulamalarda bilginin doğru ve zamanlı iletilmesi son derece önemlidir. Bilginin tamamının iletilmemesi ya da belirlenen sürede iletilmemesi doğal felaketler gibi durumlarda alınacak tedbirleri geciktirir ve sonuç olarak hem maddi hem de manevi kayıplar yaşanır.

Yüzlerce kablosuz algılayıcı düğümden oluşan kablosuz algılayıcı ağlar düğüm sayısına orantılı olarak büyük miktarda veri üretirler. Üretilen verilerin nihai hedef alıcıya ulaştırılması esnasında oluşacak tıkanıklık ve benzeri diğer durumlardan dolayı düzenli üretilen daha önemsiz sıradan veriler alıcıya teslim edilirken daha önemli verilerin alıcıya teslim edilememesi ya da yüksek gecikme ile teslim edilmesi ciddi bir problemdir. Örneğin, kablosuz algılayıcı düğümlerin rastgele dağıtıldığı bir ormanda, beklenen ısı değeri üreten bölgelerdeki veriler alıcıya ulaştırılırken, ısının çok yükselerek yangın başlattığı bir bölgedeki verilerin alıcıya geç ulaştırılması ya da hiç ulaştırılmaması durumunda yangına müdahale gecikir.

Bu tez çalışmasının amacı, kablosuz algılayıcı ağlarda veri önceliği kaynak düğüm tarafından belirlenen, yüksek öncelikli verilere daha iyi hizmet sağlarken tüm verilerin alıcıya teslim edilebilmesini hedefleyen “işaretsiz öncelik tabanlı yönlendirme” (Priority Beaconless Based Routing - PBBR) protokolünü tasarlamak, benzetim yoluyla tasarımını gerçekleştirmek ve başarımını incelemektir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak literatürde sunulan mevcut protokoller belirli ölçütler ışığında karşılaştırılarak olumlu ve olumsuz yönleri tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen yöntemler ve bu çalışmayı klasik eşleniklerinden ayıran katkılar özetle şunlardır:

1. Sisteme ek yük getirmeden ve yüksek başarımla daha öncelikli verilerin güvenilir olarak aktarılmasını sağlayan tasarım gerçekleştirilmiştir.
2. Yüksek öncelikli veriler başta olmak üzere tüm verilerin alıcıya teslim edilebilmesi amacıyla boşluk yönetimini sağlayan tasarım gerçekleştirilmiştir.
3. Veri üretilen algılama alanını daraltmadan ve ağ yaşam süresini maksimize ederek uygun servis kalitesi sağlayan tasarım gerçekleştirilmiştir.
4. Tasarlanan protokolde, yönlendirme protokolünün bellek ve işlemci gücü kullanımını azaltılarak uygulamalarda farklı kablosuz algılayıcı düğümün kullanılabilmesine imkân sağlanmıştır.

5. Tasarılan protokol Omnet++ benzetim yazılımıyla modellenmiş ve Omnet++ tabanlı uygulamaların hizmetine sunulmuştur.

1.3. Tez Organizasyonu

Tez organizasyonu aşağıda özetlenen sekiz bölümden oluşmaktadır:

Bölüm 1: Giriş: Bu bölümde tez çalışmasına konu olan problemin tanımı, çalışmanın amacı, literatürde bu problemin çözümü üzerine yapılan çalışmaların özeti, tez çalışmasını literatürde yapılan çalışmalardan ayıran temel özellikler ile tez organizasyonu hakkında bilgi sunulmaktadır.

Bölüm 2: Kablosuz Algılayıcı Ağlar: Bu bölümde tez konusunun temel çalışma alanını oluşturan kablosuz algılayıcı ağlar hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Algılayıcı düğümlerinin yapısı, kablosuz algılayıcı ağ mimarisi, kablosuz algılayıcı ağ tasarımını etkileyen faktörler ve kablosuz algılayıcı ağ uygulama alanları bu bölümde anlatılan konuları oluşturmaktadır.

Bölüm 3: Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Yönlendirme Protokolleri: Kablosuz algılayıcı ağlarda kullanılan yönlendirme protokollerinin tasarım kısıtları ve yönlendirme bileşenleri sunularak yönlendirme protokolleri sınıflandırılmaktadır. Bölümün devamında, tasarlanan PBBR protokolünün alt yapısını oluşturan “konum tabanlı yönlendirme” ile ilgili olumlu ve olumsuz unsurlar hakkında bilgi verilmektedir.

Bölüm 4: Öncelik Tabanlı Yönlendirme Protokolleri: Bu bölümde, mevcut öncelik tabanlı yönlendirme protokolleri incelenmekte ve belirlenen ölçütlere göre karşılaştırılmaktadır.

Bölüm 5: Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Modelleme ve Benzetim Araçları: Bu bölümde, modelleme / benzetim kavramları üzerinde durulmakta, günümüzde yaygın olarak kullanılan bilgisayar tabanlı benzetim yazılımlarının olumlu ve olumsuz

yönleri özetlenmekte, “Omnet++” benzetim ortamı ve “Mixim” modeli kısaca tanıtılmaktadır.

Bölüm 6: İşaretsiz Öncelik Tabanlı Yeni Bir Yönlendirme Protokolü “PBBR”: Bu bölümde, tasarlanan PBBR protokolünün varsayımları, özellikleri, çalışma mantığı ve paket yapısı anlatılmaktadır. Çalışma mantığı kapsamında aday düğümlerin tespit edilmesi ve hesaplamalarına yer verilmektedir. Devamında yönlendirme yönetim aktiviteleri başlığı altında boşluk, iletim ortamı, tıkanıklık ve hareket yönetimi ile ilgili protokolün kullandığı mekanizmalar ve yararları anlatılmaktadır.

Bölüm 7: PBBR Protokolü Başarım Analizi: Bu bölümde, farklı ağ yapıları ve şartları altında konum tabanlı “serbest durum kesin aktarma” (State-free Implicit Forwarding - SIF) protokolü, öncelik tabanlı “MMSPEED” protokolü ve tasarlanan “PBBR” protokolünün benzetimleri yapılmaktadır. Her üç protokolden benzetim yoluyla elde edilen başarım sonuçları karşılaştırılmaktadır. Yapılan karşılaştırmaların olumlu ya da olumsuz sonuçlarının nedenleri irdelenmektedir.

Bölüm 8: Sonuçlar ve Öneriler: Bu bölümde, yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar genel hatlarıyla değerlendirilerek çalışmanın bilime sağlayabileceği katkılar tartışılmaktadır. Daha sonra yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunmaktadır.

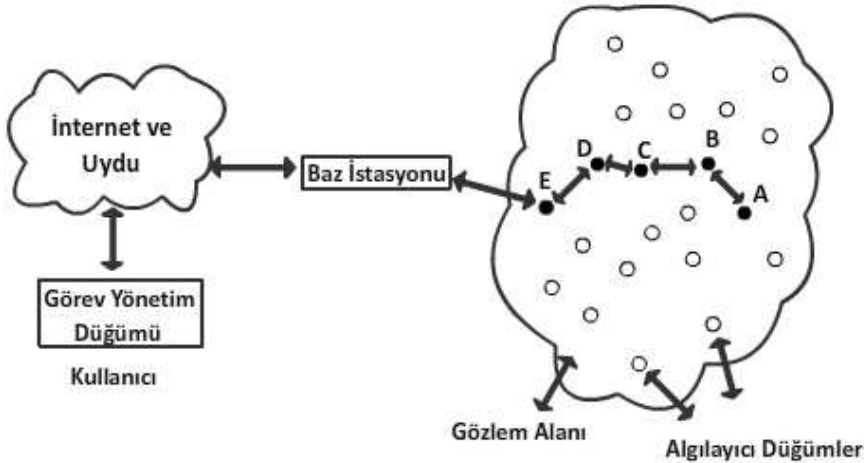
Ek-A: Kablosuz Algılayıcı Ağlara Yönelik Omnet++ Tabanlı Benzetim Modelinin Tasarımı: Bu bölümde, kablosuz algılayıcı ağlara yönelik olarak geliştirilen Omnet++ tabanlı benzetim modelinin tasarım detayları ve kullanım şekli açıklanmaktadır. Bu model, tez kapsamında geliştirilen yöntemlerin başarım analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

BÖLÜM 2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

2.1. Giriş

Gelişen teknolojiyle birlikte düşük maliyetli, küçük boyutlu, az güç tüketen, çok fonksiyonlu kablosuz algılayıcı düğümlerin teknik ve ekonomik olarak üretimi mümkün olmuştur. Algılama, veri işleme ve kendi aralarında haberleşme yapan kablosuz algılayıcı düğümler bir araya gelerek kablosuz algılayıcı ağları oluşturmaktadırlar. Kablosuz algılayıcı ağların (KAA) ayırt edici en önemli özellikleri olarak; her zaman her yerde kullanılabilirlik, hataya karşı tolerans, geliştirilmiş doğruluk oranı ve düşük maliyet sayılabilir.

Kablosuz algılayıcı düğümlerinin düşük maliyetli olması, normal şartlarda erişimin zor olduğu coğrafik bölgelere kolaylıkla yerleştirilebilmeleri vb. özellikleri kablosuz algılayıcı ağlarının çok çeşitli alanlarda kullanılabilmelerini mümkün kılmaktadır. Kablosuz algılayıcı ağı; Şekil 2.1’de gösterildiği gibi gözlem alanında bulunan kablosuz algılayıcı düğümlerden, baz istasyonu olarak ifade edilen nihai hedef alıcı ve görev yönetim düğümünden meydana gelmektedir [10].



Şekil 2.1. Algılayıcı alanına dağıtılmış algılayıcı düğümler [10]

Kablosuz algılayıcı düğümler, bilgi toplamak için yerleştirildikleri gözlem alanından elde ettikleri verileri komşu algılayıcı düğümler üzerinden nihai hedef alıcıya iletmekle görevlidirler. Nihai hedef alıcı ise; ağdan gerekli olan bilgileri alan ve ağa kontrol bilgilerini göndermekle sorumlu olan merkezi kontrol noktası olması yanında diğer ağlarla bağlantıyı sağlayan, güçlü veri işleme / saklama yeteneğine sahip ve kullanıcı ile arabirim sağlayan bir erişim noktasıdır. Nihai hedef alıcı olarak kullanılabilen dizüstü bilgisayar veya iş istasyonuna bilgiler, radyo frekans, uydu veya internet ile iletilebilir.

2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağların Tarihi

Kablosuz algılayıcı ağlar ile yapılan ilk projelerin askeri alanlarla ilgili olduğu görülür. Kablosuz algılayıcı ağlar, teknolojideki yeni gelişmelerle birlikte yeni avantajlar sağlamakta ve hayatın tüm alanlarında kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır.

Kablosuz algılayıcı ağlar ile yapılan ilk projelerden bazıları aşağıda sunulmuştur [11]:

1950 “Ses Gözetleme Sistemi ” (Sound Surveillance System - SOSUS): Soğuk savaş sırasında Amerikan donanması tarafından, Rus denizaltılarının izlenmesi için Atlantik ve Pasifik okyanuslarına kurulmuş ve kullanılmıştır. Günümüzde okyanus dibindeki titreşimler ve okyanus canlılarının izlenmesi için aktif olarak kullanılmaktadır.

1978 “Dağıtık Algılayıcı Ağ” (Distributed Sensors Net - DSN): Şekil 2.2’de parçaları gösterilen DSN bileşenleri, akustik algılayıcılar, kaynak paylaşımlı bir ağ üzerinde çalışan işlemleri birleştiren üst seviye iletişim protokolleri, bilgi işleme teknikleri, yer bulma algoritmaları ve dağıtık sistemler üzerinde çalışan dinamik olarak değiştirilebilen dağıtık yazılımlardır.

1980 “Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı” (Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA): Program kapsamında dağıtık akustik izleme

problemi örnek uygulama olarak seçilmiştir. Bu uygulamanın farklı kısımları farklı üniversiteler ve kuruluşlar tarafından geliştirilmiştir.



Şekil 2.2. 1985'lerdeki DSN parçaları [11]

2000'li yıllarda özellikle mikro-elektromekanik sistemler, telsiz iletişim ve düşük güç tüketimli mikro denetleyicilerde yaşanan gelişmeler, telsiz algılayıcı ağların ilk düşünüldüğü gibi çok sayıda ufak algılayıcı düğümden oluşması fikrini uygulanabilir hale getirmiştir. Yaşanan teknolojik gelişmeler algılayıcı düğümlerin küçülmesini sağlamanın yanı sıra maliyetlerinin de düşmesine neden olmuştur. Böylece 1990'lı yılların sonlarına kadar çok büyük bütçeli askeri güvenlik uygulamalarında kullanılan ve oldukça maliyetli olan kablosuz algılayıcı ağlar sivil araştırmacılar tarafından birçok uygulama alanında kullanılmaya başlanmıştır [12].

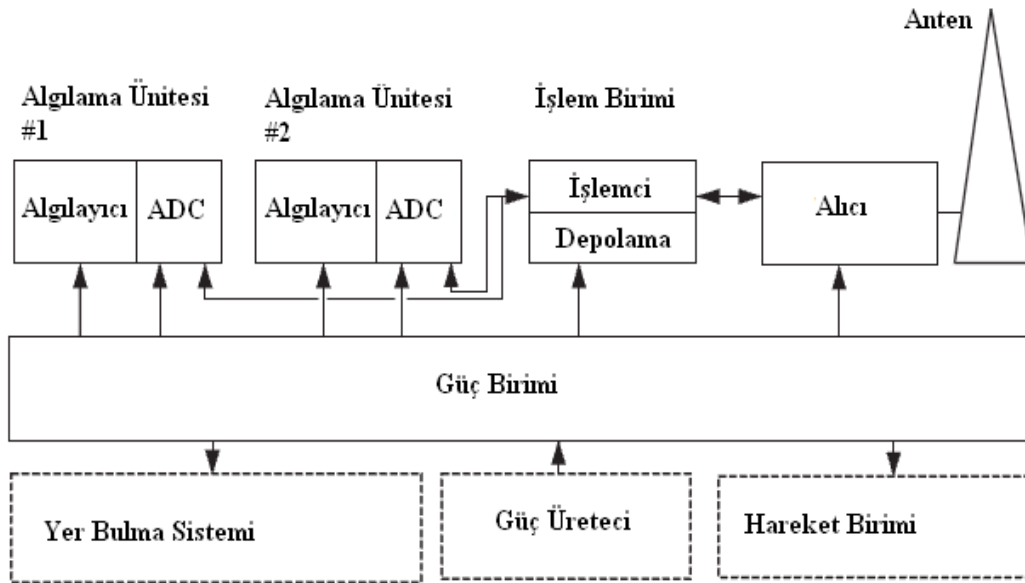
2.3. Kablosuz Algılayıcı Düğüm Yapısı

Kablosuz algılayıcı ağlar, Şekil 2.3'de temel bileşenleri gösterilen yüzlerce kablosuz algılayıcı düğümden oluşur. Bir kablosuz algılayıcı düğüm, dört temel donanım alt sistemine sahiptir [13]:

- Güç sistemi: Güç üretici ve güç biriminden oluşan güç sistemi uygulamaya bağlı olarak birkaç saatten birkaç ay ya da yıla kadar sistemi desteklemelidir.

- Hesaplama ve depolama sistemleri: Veri işleme, geçici - kısa süreli depolama, şifreleme, ileri hata düzeltme, sayısal modülasyon ve sayısal iletim yapmak için kullanılırlar. Hesaplama birimi / sistemi, 8-bit mikro denetleyicilerden 64-bit mikro işlemcilere hesaplama aralığına sahip iken depolama birimi, 0.01 - 100 GB kapasite gerektirir.
- Algılayıcı dönüştürücü sistemi: Algılayıcı ve “analog dijital çevirici” (Analog Digital Convertor - ADC) elemanlardan oluşan algılayıcı dönüştürücü sistem, kablosuz algılayıcı düğümler ile çevre arasındaki arayüzdür. Temel çevre algılayıcıları hız, nem, ışık, manyetik akı, sıcaklık, basınç, ses, vb. özelliklere duyarlı elemanları içerir.
- İletişim sistemi: Alıcı ve anten elemanlarından oluşan iletişim sistemi, noktadan noktaya ve noktadan çoklu noktaya tek atlama, düğümler arası çoklu atlama, radyo bağlantısı kurulabilme gibi özelliklere sahip olmalıdır.

Kablosuz algılayıcı düğümler, uygulamanın ihtiyaçlarına göre Şekil 2.3’de gösterilen kendi konumunu bulmasını sağlayan yer bulma sistemi ve düğümün konum değiştirmesini sağlayan hareket birimi içerir.

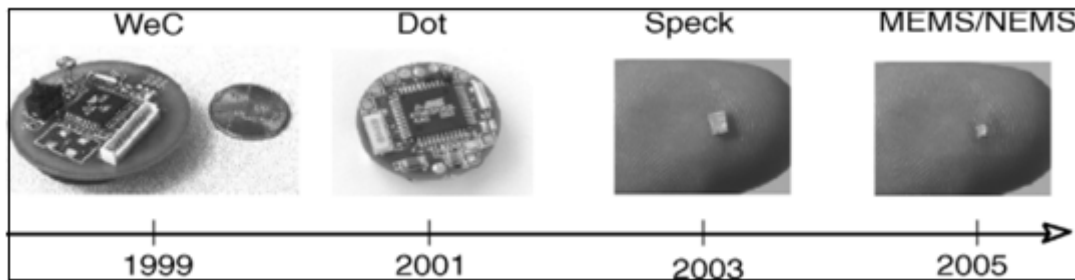


Şekil 2.3. Tipik bir algılama düğümü [13]

Algılayıcılar genel olarak beş temel yazılım alt sistemine sahiptir [13]:

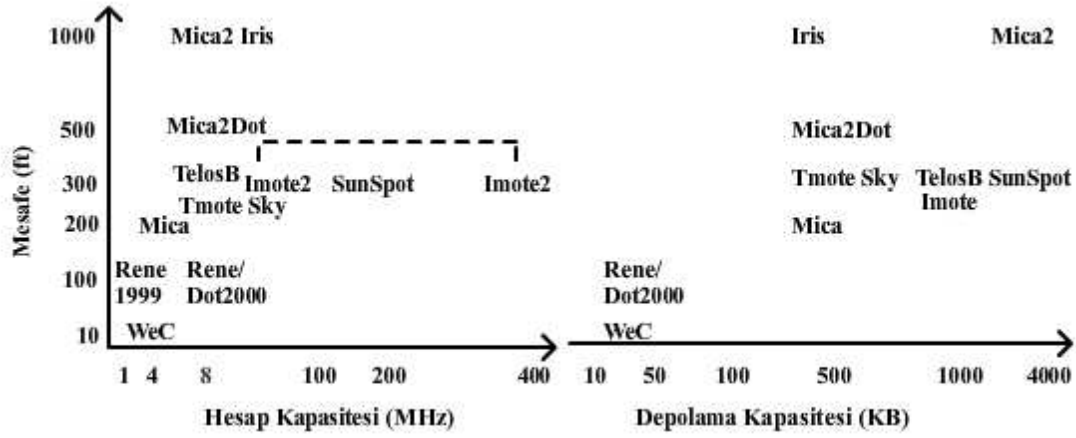
- İşletim sistemi mikro kod: Bu çok sayıda ve çeşitli fonksiyonları desteklemek için bütün yüksek - düzey düğüm yazılım modülleri tarafından kullanılan ortak mikro koddur.
- Algılayıcı sürücüler: Bunlar algılayıcı alıcılarının basit fonksiyonlarını yöneten yazılım modülleridir.
- İletişim işlemcileri: Bu kod yönlendirme, paket tamponlama ve gönderme, topoloji sürdürme, ortam erişim kontrol, şifreleme, ileri hata düzeltme, vb. iletişim fonksiyonlarını yönetir.
- İletişim sürücüler: Fiziksel katman ve kodlama ile ilgili olan bu yazılım modülü, saat ve eşleme, sinyal kodlama, bit kurtarma, bit sayma, sinyal düzeyleri ve modülasyon içeren radyo kanal iletim bağlantısının ayrıntısını yönetir.
- Veri işleme mini - uygulamaları: Bunlar sayısal, veri - işleme, sinyal değeri saklama veya ağ süreci için düğüm düzeyini destekleyen diğer basit uygulamalardır.

1990'lı yıllardan günümüze kadar fiziksel anlamda küçülürken; becerileri ve performansı artmakta olan algılayıcı düğümlerin tarihsel gelişimi Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4. Algılayıcı teknolojisinin süreç içerisindeki gelişimi (kısmi örnek) [13]

Şekil 2.5’de görüldüğü üzere üretilen düğümlerin hesaplama kapasiteleri 400Mhz ve saklama kapasitesi 4MB seviyelerine kadar ulaşmaktadır.



Şekil 2.5. Hesaplama ve saklama kapasitesine göre KAA düğümlerinin sınıflandırılması [14]

Kablosuz algılayıcı düğümlerin özelliklerinin listelendiği Tablo 2.1’e bakıldığında, üretilen düğümlerin program belleği, veri belleği, veri aktarım hızları ve işlemci beceri - performanslarının zaman içerisinde artmakta olduğu görülür.

Tablo 2.1. UC Berkeley tarafından geliştirilmiş olan kablosuz algılayıcı düğümlerin karşılaştırılması [12]

Algılayıcı Düğüm Türü ve Yılı	WeC 1998	Rene 1999	Rene2	Dot 2000	Mica 2001	Mica2Dot 2002	Mica2 2002	Telos 2004
Mikro denetleyici								
Türü	AT90LS8535		ATMega163			ATmega128		TIMSP430
Program Belleği(KB)	8		16			128		60
Veri Belleği (KB)	0.5		1			4		2
Aktif Güç (mW)	15		15		8		33	3
Uyku Gücü (µW)	45		45		75		75	6
Uyanma Süresi (µS)	1000		36		180		180	6
İletişim Birimi								
Alıcı/Verici		TR1000			TR1000	CC1000		CC2420
Veri Aktarım Hızı		10			40	38.4		250
Alım Gücü (mW)		9			12	29		38
Gönderim Gücü(mW)		36			36	42		35
Güç Tüketimi								
Min. Çalışma gerilimi	2.7		2.7		2.7			1.8
Toplam harcanan güç		24			27	44	89	41

Tablo 2.2'ye bakıldığında, nanoskobik boyutlara kadar küçük boyutları olan, batarya ömrü saatlik değerlerden yıllara kadar devam edebilen, hareket kabiliyeti eklenebilen kablosuz algılayıcı düğümlerin karışıklığı azaltılmış sınıflandırılmasına göre 768 alternatif düğüm türetilbildiği görülür.

Tablo 2.2. Algılayıcı düğümlerin karışıklığı azaltılmış sınıflandırması [13]

Kablosuz Algılayıcı Düğüm					
Boyutu	Hareketliliği	Gücü	Hesaplama ve Depolama Kapasitesi	Algılama Becerileri	İletişim Cihazları ve Protokolleri
Büyük	Hareketli	Kendinden şarjlı	Üst-uç işlemci ve depolama	Çoklu mod Fiziksel	Dinamik yönlendirmeli çoklu atlama
Küçük	Statik	Batarya Saatler-günler	Orta ölçek işlemci ve depolama	Çoklu mod Kimyasal-Biyolojik	Statik yönlendirmeli tek atlama
Mikroskobik		Batarya Haftalar-aylar	Düşük-uç işlemci ve depolama	Tek fonksiyon Fiziksel	
Nanoskobik		Batarya Yıllar		Tek fonksiyon Kimyasal-Biyolojik	

2.4. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda İletişim Mimarisi

Kablosuz algılayıcı düğümler genelde uygulama alanına rastgele dağıtılır. Bu dağıtılmış düğümlerin her birinin veriyi toplayıp nihai hedef alıcıya yollama yetenekleri vardır. Veri çoklu atlama ile nihai hedef alıcıya gönderilir. Altyapısız bir ortama rastgele atılan düğümler kısa bir süre sonra kendi aralarında nihai hedef alıcıya ulaşabilecekleri bir ağ oluştururlar. Nihai hedef alıcı, görev yönetici düğümler internet ya da uydu aracılığı ile haberleşebilir. Kablosuz algılayıcı düğümlerin tasarımı birçok etken tarafından etkilenmektedir. Bunlar; hata toleransı, ölçeklenebilirlik, üretim maliyetleri, çalıştırma ortamı, algılayıcı ağ topolojisi, donanım kısıtlamaları, iletim ortamı ve güç tüketimidir [10].

2.4.1. Protokol yığını

Bir kablosuz algılayıcı düğüm, Şekil 2.6'da gösterilen yönetim düzlemi ve katmanlardan oluşan iki boyutlu protokol yığını ile ifade edilebilir. Yönetim düzlemi

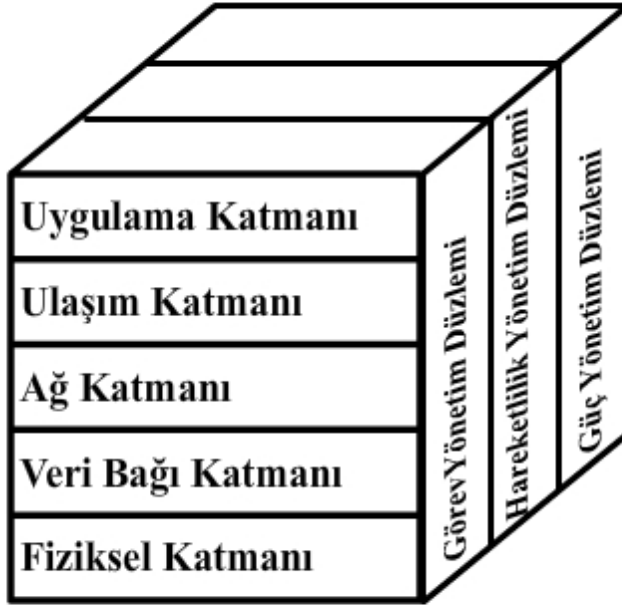
hareketlilik, görev ve güç yönetimi bileşenlerini içerirken; katman düzlemi fiziksel katman, veri bağı katmanı, ağ katmanı, ulaşım katmanı ve uygulama katmanı bileşenlerini içerir. Bu protokol yığını gücü ve yönlendirme bilincini birleştirir, kablosuz ortam aracılığı ile gücü verimli bir şekilde kullanarak haberleşmeyi sağlar ve kablosuz algılayıcı düğümlerin birbirleriyle ortak çalışmalarını daha verimli hale getirir [10].

Fiziksel katman basit fakat dayanıklı modülasyon, iletim ve alım tekniklerini adresler. Ortamın gürültülü ve düğümlerin hareketli olmasından ötürü, “ortam erişim kontrol” (Medium Access Control - MAC) protokolü güç faktörünü göz önünde tutmalı ve komşu düğümlerin yayınları ile çarpışmayı en aza indirebilmelidir. Ağ katmanı ulaşım katmanı tarafından kendisine sağlanan verinin yönlendirilmesinden sorumludur. Ulaşım katmanı kablosuz algılayıcı ağ uygulamasının gereksinim duyması halinde veri akışının güçlendirilmesine yardım eder. Algılama görevlerine bağlı olarak, farklı tiplerde uygulama yazılımları, uygulama katmanı üzerine kurulup kullanılabilir. Bunlara ek olarak güç, hareketlilik ve görev yönetim düzlemleri algılayıcı düğümleri arasındaki gücü, hareketleri ve görev dağılımını izler. Bu düzlemler algılama görevinin koordineli bir şekilde gerçekleştirilmesi için düğümlere yardımcı olur ve toplam güç tüketimini azaltır [10].

Güç yönetim düzlemi bir kablosuz algılayıcı düğümün güç kullanımını yönetir. Örnek olarak; kablosuz algılayıcı düğüm, komşu düğümden mesaj aldıktan sonra alıcı devresini kapatabilir. Bu kopyalanmış mesaj alımını engeller. Aynı zamanda, kablosuz algılayıcı düğümün güç seviyesi azaldığında, komşu düğümlere mesaj yönlendirmelerine katılamayacağını bildirir. Geriye kalan güç algılamaya ayrılır. Hareketlilik yönetim düzlemi, kablosuz algılayıcı düğümlerin hareketlerini tespit edip kaydeder, böylece kullanıcıya dönüş yolu her zaman korunmuş olur ve kablosuz algılayıcı düğüm komşu düğümlerinin kim olduğunu izleyebilir [10].

Kablosuz algılayıcı düğümün komşu düğümlerini bilmesi sayesinde, düğümler güç ve görev kullanımını dengeleyebilir. Görev yönetim düzlemi, belirli bir bölgedeki algılama görevlerini dengeler ve zamanlamasını yapar. Belirli bir bölgedeki kablosuz algılayıcı düğümlerin tamamının aynı anda algılama görevini yerine getirmesi gerekli

değildir. Bu doğrultuda güç seviyelerine bağlı olarak bazı düğümler algılama görevini diğer düğümlere göre daha fazla yerine getirirler. Bu yönetim düzlemleri, kablosuz algılayıcı düğümlerin etkin bir güç kullanımı ile birlikte çalışmaları veriyi hareketli kablosuz algılayıcı ağ içerisinde yönlendirebilmeleri ve kaynakları düğümler arasında paylaştırabilmeleri için gereklidir [10].



Şekil 2.6. Algılayıcı ağ protokol yığını [10]

2.4.2. Fiziksel katman

Her algılayıcı için donanım ve yazılım kaynaklarının dağıtıldığı fiziksel katman sinyal gönderme ve alma, kanal seçimi, taşıyıcı frekansın üretilmesi ve modülasyon işlerinden sorumludur. Fiziksel katmanın tasarım amacı en büyük bağlantı kapasitesini elde etmede enerji tüketimini minimize etmektir.

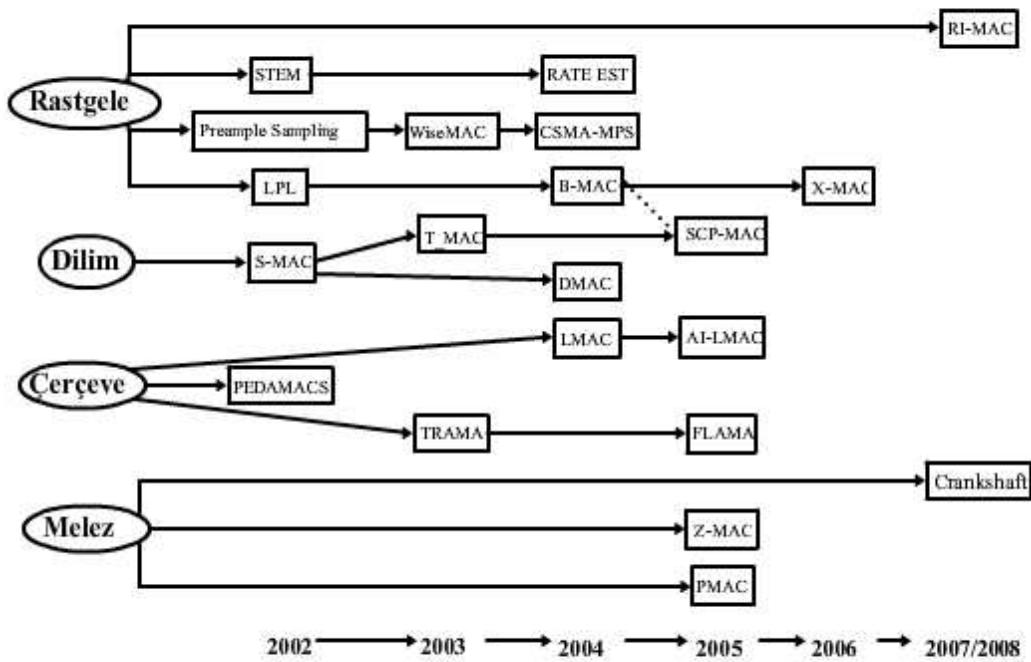
2.4.3. Veri bağı katmanı

Veri bağı katmanı veri çerçevesinin algılanması, erişim ortamı ve hata kontrolünden sorumludur. İletişim ağlarında noktadan noktaya ve çoklu noktaya güvenilir bağlantılar kurulmasını garanti eder.

Ortam erişiminin iki amacından ilki binlerce düğümden oluşan kablosuz algılayıcı ağ alt yapısının oluşturulması ve böylece düğümler arasında veri iletimi için iletişim bağlarının kurulmasıdır. Ortam erişiminin ikinci amacı ise kablosuz algılayıcı düğümler arasında iletişim kaynaklarının adil ve etkin paylaşımını sağlamaktır.

MAC protokolleri için tasarımında özellikle enerji tüketimini azaltmak için çarpışma, dinleme, boşa dinleme ve kontrol paketleri sayılarının azaltılmasına dikkat edilmelidir [15].

Geliştirilen MAC protokolleri rastgele tabanlı, slot tabanlı, çerçeve tabanlı ve melez olmak üzere dört grupta sınıflandırılabilir [16]. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, literatürde kablosuz algılayıcı ağlar için geliştirilmiş olan birçok MAC protokol çalışması bulunmaktadır [17] [18] [19] [20].



Şekil 2.7. Kablosuz algılayıcı ağlarda MAC protokolleri [16]

Mevcut protokollerden yaygın olarak bilinen, tercih edilen ve öncü olan rastgele tabanlı protokollerde WiseMAC [18] ve B-MAC [19], slot tabanlı protokollerde S-MAC [17], çerçeve tabanlı protokollerde L-MAC [20] ve melez protokollerde Crankshaft [16] protokolleri mevcuttur.

Rastgele tabanlı sınıfta düğümler uyku / uyanıklık ve çalışma oranlarını hiçbir kısıtlama olmaksızın kendileri rastgele belirler. Bu belirleme esnasında diğer düğümlerle koordine olunması ya da eşleme yapılması gerekmez [16].

Dilimli erişim protokolleri düğümlerin senkronize edilmelerini gerektirir. Düğümler genel zaman bilgisi kullanılarak senkronize edilir. Bu organizasyon uyku / uyanıklık döngü sıralamasıyla düğümlerin kolektif olarak tekrarlamasına izin verir. Bu düğümler aktif periyot içerisinde kanal için çekişme yaparlar. Önce ortamı dinler kanal meşgul değilse ortam kullanım hakkını elde eder ve iletimini gerçekleştirir. Kanal meşgul ise rastgele bir süre bekleyerek süre bitiminde ortamı yeniden dinler. Kanal boş olana kadar belirli sayıda ortamı dinler ve kanal boş olduğunda iletimini gerçekleştirir [16].

Çerçeve tabanlı protokoller “zaman bölümlenmeli çoklu erişim” (Time Division Multiple Access - TDMA) kullanırlar. Bu protokollerde zaman çerçevelere bölünür ve her çerçevede dilimlere bölünür. Bir çerçeve boyunca, her düğüme iletim hakkı sağlayabildiği tekil bir dilim tahsis edilir. Böylece iletişimde çarpışma kaynaklı sıkıntıları yaşamaz. Tahmin edilebilir planlama gecikmesi ile yüksek yüklü ağlarda ağ çıkışını artırır. Ancak düğümler ile nihai hedef alıcılar arasındaki katı bir zaman eşleme ihtiyacı, düğümlerin yoğun olduğu ağlarda gönderim sırasının beklenmesi nedeniyle gecikmenin çok fazla artması ve düğümlerin hareketli olduğu ortamda iletim haklarının dağıtılmasından kaynaklanan sıkıntılar bu protokollerin en büyük olumsuzluklarından [15].

2.4.4. Ağ katmanı

Bilinen kısıtlamalar yüzünden çok atlamalı ve özel kablosuz yönlendirme protokollerine ihtiyaç vardır. Alışılmış ad-hoc yönlendirme teknikleri çoğu zaman kablosuz algılayıcı ağların gereksinimlerini karşılayamaz.

Kablosuz algılayıcı ağların ağ katmanı aşağıdaki kurallara göre tasarlanır [10]:

- Gücünün verimli kullanımı her zaman önemli bir kısıtlamadır.

- Kablosuz algılayıcı ağlar çoğu zaman veri merkezlidir.
- Veri toplama / çoğullama sadece kablosuz algılayıcı düğümlerin ortak gayretini engellemediği müddetçe kullanışlıdır.
- İdeal bir kablosuz algılayıcı ağ özellik temelli adresleme ve yer bilincine sahiptir.

2.4.5. Ulaşım katmanı

Ulaşım katmanı özellikle kablosuz algılayıcı ağlara internet veya diğer harici ağlar aracılığı ile erişilebilmesi planlandığında gereklidir. Literatürde ulaşım katmanı ya da şemaları ile ilgili fazla çalışma bulunmamaktadır [10]. Farklı kablosuz algılayıcı ağ uygulamaları için bu çalışmaların sayısının artırılması gerekmektedir.

2.4.6. Uygulama katmanı

Kablosuz algılayıcı ağlarda farklı amaçlar için uygulamalar geliştirilmektedir. Uygulama katmanı uygulamanın türüne göre istenilen görevleri yerine getirecek katmandır.

2.5. Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Uygulama Alanları

Kablosuz algılayıcı ağların güvenilirlik, kendi kendini organize etme, esneklik, ölçeklenebilirlik ile kurulum kolaylıkları sebebiyle mevcut ve olası uygulamaları geniş bir çeşitlilik kazanmaktadır. Aynı zamanda neredeyse tüm çevre ortamlarında uygulanabilir, özellikle mevcut kablolu ağların çalışmasının imkânsız olduğu ya da kullanılamayacağı durumlarda kullanılabilirler [21].

Kablosuz algılayıcı ağlarda uygulama alanlarından bazıları: Askeri uygulamalar, çevre algılaması ve izleme, felaketten korunma ve kurtarma, tıbbi hizmetler, akıllı ev, yapı otomasyon, bilimsel araştırmalar, etkileşimli çevreleme, nezaret gözetim, endüstriyel otomasyon, boru hatlarının izlenmesi, hassas tarım, yer altı maden bulma çıkarma çalışmaları şeklinde sıralanabilir.

2.5.1. Askeri uygulamalar

Kablosuz algılayıcı ağlar askeri komuta, kontrol, iletişim, hesaplama, istihbarat, nezaret, keşif ve hedef tespit sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olmaktadır [21].

2.5.2. Çevre algılaması ve izleme

Belirli bir coğrafi alana yayılan yüzlerce ya da binlerce, ufak, ucuz, kendini-ayarlayabilir kablosuz algılayıcılar çevre izleme ya da çevre kontrolü işlemlerinde geniş yelpazeli uygulamalarda kullanılabilir. Bu uygulamalar arasında en önemlileri ekosistem izleme, büyük binalarda yerel iklimleme izleme ve yangın tespit uygulamalarıdır [21].

Bilimsel araştırmalar: Etkin bir şekilde yerleştirilmiş ve otomatik işlem yapabilen kablosuz algılayıcı ağlar bilimsel araştırmaların daha yüksek, uzayın ve okyanusun derinlikleri gibi ileri ve derin ortamlara açılan yeni kapısıdır [21].

Etkileşimli çevreleme: Kablosuz algılayıcı ağlar mayın bilgisini toplama konusunda ümit vaat eden mekanizmalar üretmişlerdir. Ucuz ve küçük kablosuz algılayıcı düğümlerin yayılması ile küçük yaştaki çocukların eğitimi güçlendirmek için “akıllı anaokulları” tasarlanabilir, çocukları izleme ve aktivitelerini yönlendirme işlemleri için kablosuz algılayıcı ağlar kullanılabilir [21].

Nezaret-gözetim uygulaması: Anlık ve uzaktan gözetim kablosuz algılayıcı ağlardan esinlenerek geliştirilen önemli uygulamalardan biridir. Örneğin; çok sayıda akustik ağ algılayıcı ile belirlenen hedeflerin tespiti ve takibi belirli güvenlik ölçütlerinin uygulandığı alanlarda kullanılabilir. Kablosuz algılayıcı ağlar bu gibi amaçlarla binalara, yerleşim alanlarına, hava alanlarına, tren istasyonlarına, vb. yerlere yerleştirilerek ziyaretçilerin tanınması ve anlık olarak ana komuta merkezine iletilmesi gibi görevleri yerine getirebilir. Benzer şekilde duman algılayıcıları evlere, otel odalarına, okullara yerleştirilerek olası kaza, yangın ve felaketlerin fark edilerek en hızlı biçimde gerekli müdahalenin yapılmasını mümkün kılar [21].

2.5.3. Felaketten korunma ve kurtarma

Kablosuz algılayıcı ağlar acil durumlarda ya da felaket durumlarında yerleştirildikleri afet alanlarında etkili kullanılmaktadır. Dağıtılmış kablosuz algılayıcı ağlar aracılığı ile yapılan doğru ve zamanında yer tespiti, kurtarma operasyonlarında hayati önem taşır, yer tespitinin yanında ölü sayısı, potansiyel tehlikeler ya da acil durumun kaynağı, kimlik tespit işlemleri ve kurtarılmayı bekleyen insanların tespiti de hayati verilerdir [21].

Yanardağ aktivitelerinin izlenmesi: Yanardağ izleme uygulamalarında kullanılan diğer sistemlerin çok daha pahalı olması ve yönetilmesinin güç olması nedeniyle kablosuz algılayıcı ağlar ile sismik ve ses sınırı altı sinyaller toplanarak yanardağ aktiviteleri izlenebilir [22].

Boru hattı izlemesi: Gaz, su ve petrol boru hatları gibi çok uzun, yüksek değerli, yüksek riskli ve gerekli şartlarda erişimi zor boru hatlarında sürekli ve gözle fark edilemeyecek izleme uygulamalarını kapsar [22].

2.5.4. Tıbbi hizmetler

Kablosuz algılayıcı ağlar zamanında ve etkin sağlık hizmetlerinin sağlanması ile insanlık için daha sağlıklı bir çevrenin oluşturulmasında oldukça yardımcıdır [21].

2.5.5. Akıllı yapılar

Teknolojideki gelişmelerle birlikte çeşitli kablosuz algılayıcıların kişisel mobilya veya araçlara iliştilmesi mümkün kılınmıştır. Bu sayede otonom bir ağ oluşturulabilir. Kablosuz algılayıcı ağlar tüm insanlık için daha rahat ve akıllı yaşam alanlarının oluşturulmasında rol alabilir. Örneğin kablosuz algılayıcı ağlar gaz, elektrik, oda sıcaklığı gibi verileri kablosuz ağ aracılığı ile istenen noktaya iletebilir. Benzer şekilde, akıllı bir buzdolabı ailenin doktordan alınan diyet programına göre buzdolabının dökümünü tutup alışveriş listesini tutan bir sayısal yardımcıya alınacaklar listesini gönderebilir [21].

Ev kontrolünde algılama uygulamaları [23]:

- Evde herhangi bir yerden aydınlatma, ısıtma ve soğutma sistemlerinin esnek olarak yönetilebilmesini kolaylaştırır.
- Koruma, rahatlık ve güvenliği geliştirmek için çoklu ev sistemlerinin kontrolünü otomatikleştirir.
- Elektrik, su ve gaz kullanım verilerini detaylı olarak yakalayabilir.
- Doğal kaynakların tüketimini zekice optimize edebilir.
- Ev kontrol sisteminin kablosuz kurulum ve güncellemesine imkân verir.
- Tek bir kumanda ile birden fazla sistemi yapılandırılması ve çalıştırılmasına imkân verir.
- Olağandışı olaylar tespit edildiğinde otomatik bildirim alımını kolaylaştırır.
- Yapı otomasyonunda algılama uygulamaları [23]:
- Aydınlatma, ısıtma, soğutma ve güvenliğin merkezi yönetimi ve bütünleştirir.
- Koruma, esneklik ve güvenliği geliştirmek için çoklu sistemlerin kontrolünü otomatikleştirir.
- Optimize edilmiş yönetimler yoluyla enerji maliyetini azaltır.
- Gerçek tüketime dayalı adil kullanım maliyetlerini tahsis etmeye izin verir.
- Uyarlanabilir çalışma alanları oluşturmak için aydınlatma sistemlerinin hızlı bir yeniden yapılandırmasına izin verir.

- Minimum çaba ile alt yapı inşasının genişletilme ve güncellenmesine izin verir.
- Çoklu erişim kontrol noktasından veri bütünleştirmeye izin verir.
- Çevre korumasını geliştirmek için kablosuz izleme ağlarını yaygınlaştırmaya izin verir.

2.5.6. Üretim süreçleri

Kablosuz algılayıcı düğümler endüstriyel ve tarımsal üretim süreçlerinin iyi yönetilmesinde katkı sağlayarak verimliliği artırır, olası kazaların ve zararların önüne geçilmesinde ciddi katkılar sağlar.

Endüstriyel otomasyonda algılama uygulamaları [23]:

- Mevcut üretim ve süreç kontrol sistemlerini güvenilir bir şekilde genişletir.
- Kritik donanımların sürekli izlenmesi ile varlık yönetimini geliştirir.
- Optimize edilmiş üretim süreçleri ile enerji maliyetlerini azaltır.
- Verimsiz çalışma ve kötü performans donanımlarını tanımlamaya yardım eder.
- Kullanıcı müdahalesini azaltmak için uzak algılayıcılardan gelen veri toplama işini otomatikleştirmeye yardım eder.
- Önleyici bakım programları geliştirmek için detaylı veri sağlar.
- İşçi ve kamu güvenliğini güçlendirmek için izleme ağlarının yaygınlaşmasına yardım eder.

Hassas tarım: Geleneksel olarak, büyük bir çiftlikte iklim değişikliği, yabancı ot ve zararlılarla ilgili olaylara bütün alan homojen kabul edilerek müdahale edilir.

Çiftçiler, gübre, tarım ilaçları, bitki öldürücüler ve su kaynaklarını buna göre yönetirler. Gerçekte, geniş bir alanda toprak tipleri geniş mekânsal çeşitliliği, besin içeriği ve diğer önemli faktörlere sahiptir. Bu nedenle, tek tip alan gibi davranmak kaynak kullanımının etkisizliği ve verim düşüklülüğüne neden olur. Kablosuz algılayıcı ağların kullanımıyla her bölgeden daha doğru ölçüm değerleri alınarak etkin kaynak kullanımı sağlanır ve yüksek verim elde edilir [22].

2.6. Kablosuz Algılayıcı Ağların Üstünlükleri

Kablosuz bir ağda olması gereken hareket desteği, taşınabilme, yeniden kullanılabilme, kolay kullanım, ölçeklenebilme ve düşük maliyet özellikleri kablosuz algılayıcı ağlarda mevcut olan üstünlüklerdendir [24]:

- Hareketlilik: Hareketsiz düğümlerden oluşan bir kablosuz algılayıcı ağda yeterli sayıda hareket kabiliyetine sahip kablosuz algılayıcı düğüm kullanılarak verimlilik artırabilir. Hareketli düğümlerin konumları ihtiyaca göre değiştirilerek ağ topolojisi değiştirilir ve ağın toplam verimliliği artırılır.
- Taşınabilirlik: Kablosuz algılayıcı düğümler iletişim için aralarında kablo kullanılması gerekmediğinden mevcut ağ istenildiği an ciddi maliyetler olmaksızın kolaylıkla bir başka bölgeye taşınabilir.
- Yeniden kullanılabilirlik: Kablosuz algılayıcı düğümler, küçük uyarlamalarla farklı uygulamalarda farklı amaçlarla defalarca yeniden kullanılabilirler.
- Kolay kullanım: Kablosuz algılayıcı düğümler dinamik olarak kendi aralarında organize olabilme kabiliyetleri dolayısıyla yeniden ayarlama ya da yapılandırma yapılmaksızın değişen koşullarda çalışmalarını sağlıklı olarak yürütebilirler.
- Ölçeklenebilirlik: Yüzlerce kablosuz algılayıcı düğüm yerleştirildikleri ortamda ayarlama gereksizdir bağlanabilir bir kablosuz algılayıcı ağ oluşturabilir. Oluşturulan bu gibi bir kablosuz algılayıcı ağda yeni eklenecek düğümler

ayarlar ya da yapılandırma yapılması gerekmeksizin ağa dinamik olarak uyum sağlar. Bu şekliyle ağ istenilen ölçekte kolaylıkla genişletilebilir.

- Düşük maliyet: Gelişen teknolojiler sayesinde kablolu düğümlere göre zaten çok ucuz olan kablosuz algılayıcı düğümler her geçen gün daha da ucuzlamaktadır. Maliyetlerdeki bu gelişmeler kablosuz algılayıcı ağların kullanımını daha da yaygınlaştırmaktadır.

2.7. Kablosuz Algılayıcı Ağların Olumsuzlukları

Kablosuz algılayıcı ağlar kısıtlı kaynaklara, izlenebilme zorluğuna, yüksek hata olasılığına ve istenen servis kalitesini garantileyememe gibi olumsuz özelliklere sahiptir [24]. Kablosuz algılayıcı ağlardaki bu temel olumsuzluklar teknolojinin gelişmesiyle azalmaktadır.

- Kısıtlı kaynaklar: Kablosuz algılayıcı düğümlerin kısıtlı işlem ve bellek kapasiteleri nedeniyle yüksek performans sergileyebilecek pek çok algoritmanın geliştirilmesi zorlaşmaktadır. Aynı zamanda sınırlı enerji kapasiteleri yüzünden topolojinin hayatta kalma süresi de sınırlı olmaktadır.
- Yönetim ve izlenebilirlik zorluğu: Kablosuz algılayıcı düğümlerin uzaktan yönetimi ve mevcut durumları hakkında bilgi toplanması için büyük miktarda kaynak kullanılması gerekmektedir. Kablosuz algılayıcı düğümler kaynak kısıtlı olduğundan kablosuz algılayıcı ağların kablolu ağlara göre yönetilebilmeleri ve izlenebilmeleri çok kısıtlı olmaktadır.
- Yüksek hata olasılığı: Kablosuz iletişimin karakteristik özelliklerine bağlı olarak ortamdaki fiziksel etkilerden fazla etkilendiğinden iletişim hata oranı kablolu sistemlere göre çok yüksek olmaktadır.
- Servis kalitesi: Yüksek düğüm hataları ve topolojinin fazlasıyla dinamik olması belirli bir servis kalitesini tutturmayı garanti edememektedir.

2.8. Gelecekte Algılayıcı Dügümler ve Ağlar

Fowler'in 2008 yılında endüstri uzmanlarına ve akademisyenlere yaptığı anket çalışması algılayıcı düğümler ve algılayıcı ağlarla ilgili gelecek 5 yıl içerisinde muhtemel gelişmelerin ne olacağı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır [25].

Yaklaşık 380 katılımcının gelecek beş yıl içerisinde kablosuz algılayıcı düğümlere ait parametre değerlerinin en az %10 artacağı öngörüsü hız parametresi için %93, doğruluk / çözünürlük parametresi için %96.7, güç korunumu %96.3 ve fiziksel boyutu için %97.8 katılımcının seçimiyle gerçekleşmiştir [25].

Yaklaşık 350 katılımcının %98.3'ü kablosuz algılayıcı ağlarda algılayıcı sayısının, %95.4'ü algılayıcı türlerinin, %95.9'u bant genişliğinin ve %95'i güvenli iletişim için en az %20 artacağı görüşüne katılmıştır [25].

Yaklaşık 350 katılımcının bir algılayıcı ağda %91.6'sı kablolu, %98'i kablosuz ve %91.4'ü optik algılayıcı düğümlerin en az %20 artacağı görüşüne katılmıştır [25].

BÖLÜM 3. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ

3.1. Giriş

Kablosuz algılayıcı ağlar yüzlerce kablosuz algılayıcı düğümden oluşur. Kablosuz algılayıcı düğümler ürettikleri verileri nihai hedefe doğrudan iletebilecek kaynaklara sahip olmadığından kendi aralarında işbirliği yaparlar. Düğümler ürettikleri verileri nihai hedef alıcıya çoklu atlamalı yollar üzerinden ulaştırmak zorundadır. Bir düğümdeki veri paketinin komşularından hangisine aktarılacağı kararı yönlendirmenin konusudur. Kablosuz algılayıcı ağlar için geliştirilecek yönlendirme protokolü, kablosuz algılayıcı düğümlerin kendine özgü karakteristiklerini mutlaka dikkate almalıdır.

3.2. Yönlendirme Protokollerinin Tasarım Kısıtları

Kablosuz algılayıcı düğümlerin sınırlı enerji kaynağı, sınırlı hesaplama gücü ve sınırlı bant genişliği gibi tasarım kısıtları olmasına rağmen kablosuz algılayıcı ağlar sayısız uygulama alanında kullanılmaya elverişlidir. Kablosuz algılayıcı ağlarda ana tasarım amacı; etkin enerji yönetim teknikleriyle ağ yaşam süresini uzatırken veri iletişimini gerçekleştirmek ve bağlanabilirliğin azalmasına engel olmaktır. Kablosuz algılayıcı ağlarda etkin iletişimi başarabilmek için üstesinden gelinmesi gereken birçok faktör vardır. Kablosuz algılayıcı ağlarda yönlendirme sürecini etkileyen yönlendirme tasarım konularının bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir [26]:

Düğüm yerleşimi: Kablosuz algılayıcı ağlarda düğümler uygulamaya bağımlı olarak sahaya hem el ile hem de rastgele yerleştirilebilir. Düğümler el ile yerleştirildiğinde veri önceden belirlenen yollar üzerinden gönderilir. Oysa düğümler rastgele yerleştirildiğinde ad-hoc yönlendirme altyapısı oluşturmalıdır. Düğümler düzensiz dağıtıldığında bağlanabilirlik ve enerji etkin ağ işleyişine imkân veren uygun

kümeleme yöntemleri gerekir. Enerji ve bant genişliği sınırlarından dolayı düğümler arası iletişim normal olarak kısa iletim aralığındadır. Bu yüzden, bir veri paketi kaynak düğümden başlayarak birden fazla düğüm üzerinden aktararak nihai hedef alıcıya ulaştırılır [26].

Enerji tüketimi: Kablosuz algılayıcı ağlarda hem veri gönderici ve hem de veri yönlendirici olarak çift rol oynayan kablosuz algılayıcı düğümler, kablosuz bir çevrede hesaplama ve iletim yaparak sınırlı enerji kaynaklarını tüketebilir. Kablosuz algılayıcı düğümün ömrünü bataryasındaki enerji belirler. İletişim ve hesaplama sürecinde enerji - korunumu sağlayan yöntemler kullanılarak düğümlerin ömrü uzatılmalıdır. Güç yetersizliği yüzünden bazı düğümlerinin devreden çıkması, topolojinin değişmesi, paketlerin tekrar gönderilmesi ve ağın tekrar düzenlenmesini gerektirir [26].

Veri raporlama metodu: Kablosuz algılayıcı ağlarda veri raporlama, uygulamaya ve verinin zaman kritikliğine bağlıdır. Veri raporlaması, zaman - güdümlü, olay - güdümlü, sorgu - güdümlü veya melez olarak gruplanabilir. Zaman - güdümlü veri raporlama metodunda, kablosuz algılayıcı düğümler periyodik olarak çevreyi algılar ve sabit periyodik zaman aralığında topladığı verileri nihai hedef alıcıya iletir. Olay - güdümlü ve sorgu - güdümlü veri raporlama metodlarında kablosuz algılayıcı düğümler, belirli bir olayın meydana gelmesi nedeniyle hissedilen bir niteliğin değerinde ani ve şiddetli değişikliklere anında tepki gösterir, nihai hedef alıcı veya ağdaki diğer bir düğüm tarafından üretilmiş bir sorguya cevap verir. Olay ve sorgu güdümlü metotlar zaman - kritik uygulamalara elverişlidir. Yönlendirme protokolünde enerji tüketimi ve yol hesaplamaları veri raporlama metodundan yüksek ölçüde etkilenir [26].

Düğüm / bağlantı çeşitliliği: Birçok çalışmada, tüm kablosuz algılayıcı düğümler, hesaplama, iletişim ve güç özellikleri bakımından homojen kabul edilir. Oysa herhangi bir kablosuz algılayıcı düğüm uygulamaya bağımlı olarak farklı bir görev ve kapasiteye sahip olabilir. Algılayıcı çeşitliliği veri yönlendirmeye ilgili birçok teknik konuda önemli bir problemdir. Bir uygulamada sıcaklık, basınç ve nem ölçme görevlerinin üçünü yerine getiren düğümlerle birlikte sadece tek bir görevi yerine

getiren düğümler bir arada kullanılabilir. Bir diğer durum kullanılacak protokolün gereksinimlerine hizmet edecek özellikte düğümlerin kullanılması gereğidir. Örneğin, hiyerarşik protokollerde, küme başı düğümler diğer düğümlerden farklılık gösterir. Bu küme başı düğümler, konuşlandırılan düğümlerden seçilebilir veya enerji, hafıza, bant genişliği bakımından diğer düğümlerden daha güçlü olabilir. Böylece verileri nihai hedef alıcıya aktarma sürecinde yükün ağır kısmını küme başı düğümler idare eder [26].

Hata toleransı / güvenilirlik: Bazı kablosuz algılayıcı düğümler, güç zayıflığı, fiziksel zarar veya çevresel girişimler nedeniyle engellenebilir veya başarısız olabilir. Yönlendirme protokolü çok sayıda düğümün başarısız olması durumunda yeni bağlantı ve yol bilgisi sağlamalıdır. Bu, enerji tüketimini azaltmak için mevcut bağlantılar üzerinde iletim güçleri ve sinyal oranlarını aktif olarak ayarlamayı veya daha enerji uygun ağ bölgeleri üzerinden paketleri yeniden göndermeyi gerektirebilir. Güvenilirlik veya hata toleransı düğüm hatalarının ağ işlevselliğinin sürdürülebilirliğini etkilememesidir [26].

Ölçeklenebilirlik: Yönlendirme şemaları yüzlerce veya daha fazla kablosuz algılayıcı düğümün olduğu ortamda çalışabilmeli ve olaylara cevap verebilmelidir [26].

Ağ dinamikleri: Çoğu çalışmada kablosuz algılayıcı düğümler hareketsiz varsayılır ancak hem nihai hedef alıcı hem de kablosuz algılayıcı düğümlerin hareketli olacağı uygulamalar olabilir. Bazı uygulamalarda, örneğin bir hedef bulma izleme uygulamasında olduğu gibi olgu hareketli olabilir. Hareketli düğümlerden mesaj almak göndermek daha sorunlu olduğundan enerji, bant genişliği, yol ve topoloji tutarlılığı daha fazla önem arz edecektir [26].

İletim ortamı: Kablosuz algılayıcı ağlarda, düğümler kablosuz bir ortam tarafından birbirine bağlanır. Kablosuz kanal ile ilgili sönümleme, yüksek hata oranı gibi geleneksel problemler kablosuz algılayıcı ağın çalışmasını etkileyebilir. İletişim ortamı MAC tasarımıyla ilişkilidir. Kablosuz algılayıcı ağlar için “taşıyıcı dinleyen çoklu erişim” (Carrier Sense Multiple Access - CSMA) benzeri yarışma - tabanlı protokoller dışında enerji koruyan TDMA tabanlı protokoller kullanılabilir [26].

Bağlanabilirlik: Kablosuz algılayıcı ağlarda, düğüm yoğunluğu yüksek olduğundan kablosuz algılayıcı düğümler birbirlerinden tamamen izole olmazlar ve düğümlerin olası rastgele dağılımına bağlı olarak yüksek ölçüde bağlanabilir bir ağ oluştururlar. Yinede düğüm başarısızlıkları gibi nedenlerden dolayı ağ topolojisindeki değişiklikler kapsama alanını değiştirebilir ve küçültebilir [26].

Alan kapsamı: Her kablosuz algılayıcı düğüm belirli bir çevreden bilgi toplayabilir. Bir kablosuz algılayıcı ağ uygulama bölgesinin daha fazla kısmından bilgi toplayabilmelidir [26].

Veri kümeleme: Kablosuz algılayıcı düğümler önemli miktarda gereksiz veri üretebildiğinden iletişim sayısını azaltmak için birden fazla düğümün ürettiği benzer veriler toplanarak özetlenebilir. Veri toplama işlemi, minimum, maksimum veya ortalamasını alma gibi kesin bir toplama fonksiyonuna göre farklı kaynaklardan toplanan verinin birleştirilmesidir. Bu teknik, yönlendirme protokollerinin veri iletim sayısını azaltma ve enerji etkinliği bakımında kullanılmaktadır. Sinyal işleme metotları veri toplama için kullanılabilir. Bu durumda, düğümler sinyallerdeki gürültüyü azaltan ve gelen sinyalleri birleştiren ışın şekillendirme gibi bazı teknikler kullanarak daha doğru bir çıkış sinyali üretebilir [26].

Servis kalitesi: Bazı uygulamalarda, kablosuz algılayıcı düğümlerin ürettiği veri belirli bir zaman periyodu içinde teslim edilmediğinde faydasız olacaktır. Bu yüzden, veri teslimi için zaman - sınırlı uygulamalarda sınırlı gecikme önemli bir şarttır. Ancak çoğu uygulamada, ağ yaşamıyla doğrudan ilişkili enerji korunumu veri gönderme kalitesinden daha önemlidir. Ağ toplam ömrünü uzatmak için düğümlerin tükettiği enerjiyi azaltmak gereklidir. Bu yüzden, bir yönlendirme protokolü enerji - etkin olmalıdır [26].

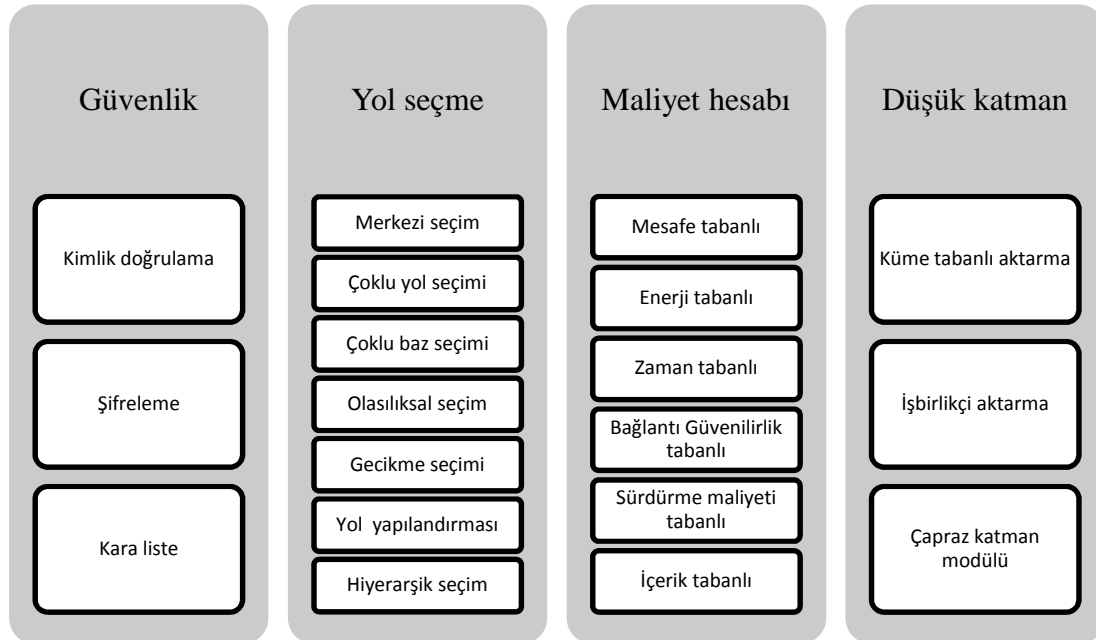
Güç tüketimi: Kablosuz radyo iletim gücü mesafenin karesiyle orantılı olduğundan veya iletinin var olan engelleri aşabilmesi için daha yüksek güç ile gönderilmesi gerektiğinden çoklu atlamalı yönlendirme doğrudan iletişime göre daha az enerji tüketir [26].

Üretim maliyeti: Kablosuz algılayıcı ağlar yüzlerce düğümden oluştuğu için her düğümün maliyeti düşük olmalıdır [26].

3.3. Yönlendirme Bileşenleri

Acs ve Buttyan bir yönlendirme protokolünün farklı yönlendirme modüllerinin bir kombinasyonu olduğu fikri üzerinden yönlendirme protokollerini sınıflandırmaktadır. Her bir bileşen uygulamanın ihtiyacına göre bir ya da birden fazla yönlendirme nesnesine sahip olabilir. Uygulama tasarımcılarının işini kolaylaştırmak amacıyla her modelin bağımsız analiz edilebildiği ve modeller birleştirildiğinde performansının kolayca hesaplanabileceği bir modüler yapı önermektedirler. Bunların dışında diğer sınıflandırma çalışmalarından farklı olarak yönlendirme protokollerinde güvenilirlik bileşeninin de sınıflandırılması gerektiğini belirtmektedirler [27].

Tüm bileşenler Şekil 3.1’de gösterildiği gibi güvenlik, yol seçme, maliyet hesabı ve düşük katman bileşenleri olmak üzere dört farklı grupta toplanmaktadır [27].



Şekil 3.1. Yönlendirme protokolü bileşenleri [27]

Düşük katman bileşenleri gecikmeyi azaltma, ağ çıkışını ve güvenilirliği artırmaya ek olarak enerji korunumu için veri bağı katmanına doğrudan ulaşabilen tüm

bileşenleri içerir. Özellikle, bu bileşenler yol kararına yardımcı olması için bağlantı güvenilirliğini ölçebilir, yeniden iletimi azaltmak için hata düzeltilmesi yapabilir veya ağ kodlaması kullanabilir. Bu bileşenler üst katman bileşenlerine farklı bağ katmanı ölçümleri ve/veya topolojik bilgi sağlar [27].

Düşük katman bileşenler çapraz-katman, işbirlikçi aktarma ve küme tabanlı aktarma olarak sınıflandırılabilir. Çapraz katman bileşeni MAC katmanı el sıkışması boyunca en iyi adayı seçme, algılayıcı donanımın iletim gücünün ayarlanabilme kapasitesinin kullanılmasıyla daha az enerji harcayarak komşulara mesajın iletilmesi gibi yöntemleri kapsar. İşbirlikçi aktarma bileşeninde düğümler, paketleri bellekte biriktirir, diğer düğümlerden duydukları paketleri değerlendirerek paket birleştirme tekniğiyle paketleri doğrular ve gönderirler. Küme tabanlı bileşenler komşu düğümlerden bir düğümün sonraki atlama düğüme yönlendirme sorumluluğunu aldığı ve böylece yeniden iletim sayısının azaltılarak enerji verimliliğinin artırıldığı yöntemleri kapsar [27].

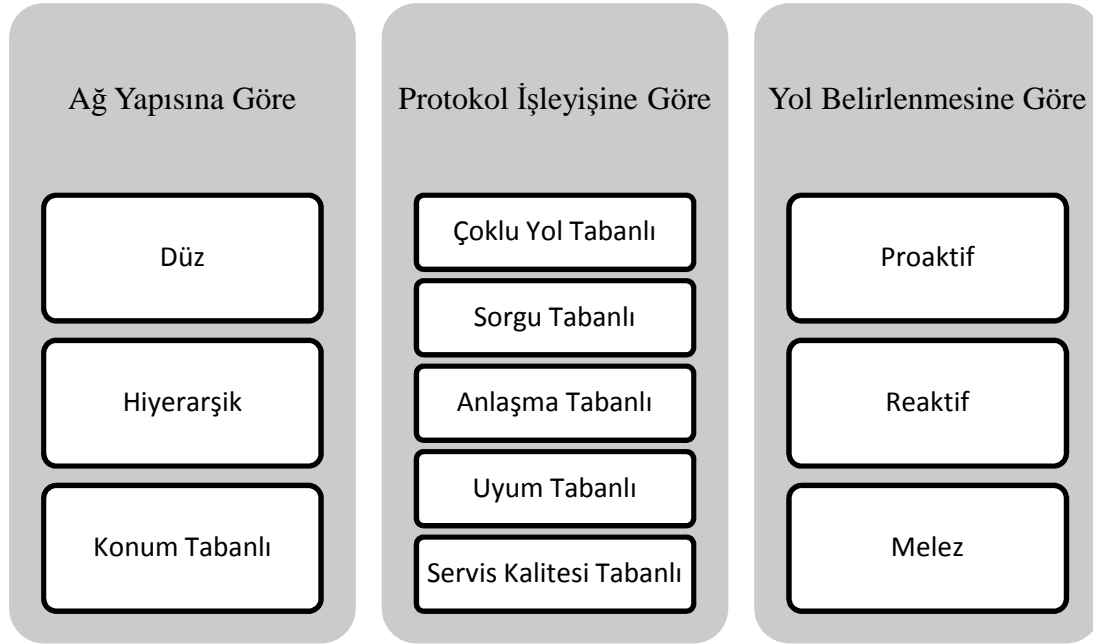
Maliyet hesaplama bileşenleri hedefe doğru sonraki aktarıcı düğümü seçerken yönlendirme maliyetinin hesaplanmasından sorumludur. Bu bileşenler düşük - katman bileşenlerinden güvenilirlik veya güç iletim ölçümleri gibi bazı girdilere ihtiyaç duyabilir ve ağdaki bir düğüme maliyet değeri tahsis ederler. Bu maliyet değeri enerji, mesafe, içerik, bağlantı güvenilirliği, zaman ve yol sürdürme metriklerinden meydana gelebilir. Bir yönlendirme protokolü en az bir maliyet hesaplama bileşeni içermelidir [27].

Yol seçme bileşeni düşük katman ve maliyet hesaplama bileşenleri tarafından teslim edilmiş uygun yönlendirme bilgilerine dayalı hedefe doğru bir yol seçer. Bu bileşen olasılıklı seçme, hiyerarşik, yayın tabanlı, merkezi, çok sayıda hedef alıcıya doğru yol seçimi, çoklu yol seçimi ve yolu yeniden düzenleme modüllerini içerir. Bir yönlendirme protokolünde en az bir yol seçme bileşeni olmalıdır [27].

Güvenlik bileşeni veri doğrulama ve gizliliği veya hata bulma gibi özel güvenlik amaçlı tüm bileşenleri toplar. Güvenlik fonksiyonlarına tüm bileşenler tarafından ulaşılabilir [27].

3.4. Yönlendirme Protokollerinin Sınıflandırılması

Yönlendirme protokolleri Şekil 3.2’de gösterildiği gibi ağ yapısına, protokol işleyişine ve yol belirlemesine göre üç gruba ayrılır.



Şekil 3.2. Kablosuz algılayıcı ağlarda yönlendirme protokollerinin sınıflandırılması [26]

3.4.1. Ağ yapısına göre sınıflandırma

Ağ yapısına göre yönlendirme protokolleri düz, hiyerarşik ve konum tabanlı olmak üzere üç gruba ayrılır [26]:

Düz yönlendirme: Bu yönlendirme protokollerinde her düğüm tipik olarak aynı rolü oynar ve kablosuz algılayıcı düğümler algılama görevini gerçekleştirmede işbirliği yapar. Bu gibi düğümlerden çok sayıda olduğundan her düğüme genel tanımlayıcı tahsis etmek mümkün değildir. Bu düşünce, nihai hedef alıcının belirli bölgelere sorgular gönderdiği ve seçili bölgelerde konumlu düğümlerden veri beklediği veri merkezli yönlendirmeye öncüdür. Veri, sorgular vasıtasıyla talep edildiğinden, nitelik temelli adlandırma verinin özelliklerini belirlemede gereklidir. Veri merkezli yönlendirmede ilk dikkat edilen hususların gereksiz verinin elenmesi ve veri

anlaşması vasıtasıyla enerji korunumu olduğu görülür.

Hiyerarşik yönlendirme: Aslen kablolu ağlarda önerilen hiyerarşik veya kümeleme tabanlı yönlendirme metotları, ölçeklenebilir ve etkin iletişim ile ilgili özel avantajları iyi bilinen tekniklerdir. Hiyerarşik yönlendirme kavramından kablosuz algılayıcı ağlarda enerji - etkin yönlendirme gerçekleştirilmede yararlanır. Hiyerarşik bir mimaride, daha düşük enerjili düğümler hedefin yakınında algılama gerçekleştirilmede kullanılırken daha yüksek enerjili düğümler bilgi gönderme ve işlemede kullanılır. Küme oluşturma ve küme başına özel görevler tahsis etme ölçeklenebilirlik, yaşam süresi ve enerji etkinliğine oldukça katkı sağlayabilir. Hiyerarşik yönlendirme, nihai hedef alıcıya iletilen mesajların sayısını azaltmak için veri toplama ve birleştirme gerçekleştiren bir küme içinde daha düşük enerji tüketiminde etkin bir yoldur. Hiyerarşik yönlendirme temel olarak küme başlarının seçimi ve yönlendirme işlemi için kullanılan iki katmanlı yönlendirme gerçekleştirir.

Konum tabanlı yönlendirme: Bu yönlendirme çeşidinde, kablosuz algılayıcı düğümler konumları vasıtasıyla adreslenir. Komşu düğümler arasındaki mesafe gelen sinyalin gücü ölçülerek tahmin edilebilir. Alternatif olarak, kablosuz algılayıcı düğümlerin konumu, düğümlere eklenecek düşük güçlü küçük bir “yer bulma sistemi” (Global Position System - GPS) donanımı yardımıyla uydu ile iletişim kurarak doğrudan belirlenebilir. Komşu düğümler arasında bilgi değişimi ile komşulukların görece koordinatları elde edilebilir. Bazı konum - tabanlı şemalar, enerji korunumu için aktif olmayan düğümlerin uyumasını talep eder.

3.4.2. Protokol işleyişine göre sınıflandırma

Yönlendirme protokolleri protokol işleyişine göre çoklu yol tabanlı, sorgu tabanlı, anlaşma tabanlı, servis kalitesi tabanlı ve uyum tabanlı olmak üzere beş gruba ayrılır [26]:

- Çoklu yol tabanlı yönlendirme: Ağ performansını artırmak için tek yol yerine çoklu yol kullanılır. Protokolün hata toleransı, ilk yol başarısız olduğunda kaynak ve hedef arasında alternatif bir yol olması olasılığı ile ölçülür. Alternatif yollar

periyodik mesajlar göndererek canlı tutulur. Bu nedenle, ağ güvenilirliğini alternatif yolları sürdürerek artırma çabası genel maliyeti artırabilir.

- Sorgu tabanlı yönlendirme: Hedef düğümler ağ boyunca istenilen veri için bir sorgu üretir. Sorguyla eşleşen veriye sahip düğüm ya da düğümler sorguyu başlatan düğüme veriyi gönderir. Genellikle bu sorgular doğal veya yüksek seviyeli sorgu dillerinde tanımlanır. Örneğin, istemci “savaş alanı bölgesinde hareket eden bir araç var mı?” şeklinde bölge belirterek bölgedeki düğümlere bir sorgu gönderebilir. Bütün düğümler aldıkları algılama görev sorgularını bir tabloda tutarlar ve bu görevlerle eşleşen veriyi gönderirler.
- Anlaşma tabanlı yönlendirme: Bu protokoller anlaşma boyunca gereksiz veri iletimlerini elemek için yüksek seviye tanımlayıcılar kullanır. İletişim kararları onlara uygun kaynaklara dayalı yapılır.
- Uyum tabanlı yönlendirme: Veri işleme kablosuz algılayıcı ağların çalışmasında önemli bir parçadır. Kablosuz algılayıcı ağlarda önerilmiş iki önemli veri işleme tekniği uyumlu ve uyumsuz olarak sınıflandırılan veri işleme teknikleridir. Uyumsuz veri işleme yönlendirmesinde, düğümler veriyi daha uzakta işleyecek toplayıcı düğümlere göndermeden önce kendileri yerel olarak işler. Uyumlu yönlendirmede, veri minimum işlem sonrası toplayıcılara gönderilir. Minimum işlem tipik olarak zaman pulu ve çoğaltmayı bastırma görevleri içerir. Enerji-etkin yönlendirme gerçekleştirirken normal olarak uyumlu veri işleme tekniği seçilir.
- Servis kalitesi tabanlı yönlendirme: Ağ, enerji tüketimi ile veri kalitesi arasında dengeyi korumalı ve nihai hedef alıcıya veri teslim ederken gecikme, enerji, bant genişliği vb. belirli servis kalitesi metriklerini sağlamalıdır.

3.4.3. Yol belirlemesine göre sınıflandırma

Yönlendirme protokollerinde yol belirlemesi proaktif ve reaktif olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilir. Proaktif yöntemler tüm iletim yollarını önceden

oluşturduklarından çok fazla kaynak kullanımına neden olurken, reaktif yöntemler iletim yollarını her ihtiyaç olduğunda oluşturduklarından uçtan uca gecikmeyi artırmaktadır. Bazı protokoller her iki yöntemin olumlu yanlarından yararlanmak amacıyla melez yöntemler kullanır.

3.5. Konum Tabanlı Yönlendirme

Konum farkında ağlar yönlendirme için GPS gibi fiziksel topoloji bilgisi sağlayan konum belirleme mekanizmalarından elde edilen düğümlerin fiziksel konumlarını kullanır [28]. Konum tabanlı yönlendirme protokollerinde, sonraki atlama düğümü seçilirken düğümlerin hedef alıcıya doğru ilerleme mesafesi, enerji tüketimi vb. bilgileri değerlendirilerek karar verilir.

Konum tabanlı yönlendirme protokolleri tasarlanırken kabul edilen durumlar: Gönderici düğüm konumlama mekanizmaları kullanarak kendi konumu ve hedef düğümün pozisyonunu elde edebilir. Komşu düğümlerin konumları her düğümün periyodik olarak ya da istek üzerine gönderdiği konum bilgisi paketinden elde edilebilir [29].

Üç ana paket aktarma stratejisi kullanılır: aç gözlü aktarma, sınırlı yönlü akış ve hiyerarşik yaklaşım. Konum tabanlı protokollerin büyük çoğunluğu aç gözlü aktarmayı kullanır [30]:

Açgözlü protokoller kaynaktan hedefe yol kurmaz ve sürdürmez. Ara düğümler hedefe en yakın komşu düğümü seçer ve paketi bu düğüme gönderir. Komşuları tek atlama komşuluk tablosunu sürdürebilsin diye tüm düğümler periyodik olarak kendi konum bilgisini içeren küçük bir paket yayınlar. Yol kurma ve sürdürme olmadığından topoloji değişimine esnek ve ölçeklenebilirdir. Ancak periyodik bilgi paketleri düğümün enerjisini tüketir ve az da olsa ağda tıkanıklık oluşturur.

Bilgi paketi gönderme sıklığı hareketle orantılı ayarlanabilmesine rağmen temelde yanlış konum bilgisi problemi her zaman vardır. Düğüm hareketlerinden dolayı sonraki atlama olarak seçilen komşu iletim sahasının dışına çıkmış olabilir. Konum

bilgisi hatalarını azaltmak için düğümler bilgi paketi gönderme sıklığını artırabilir. Ancak bu durum ağ yükünü ve çarpışma olasılığını artırır. Bununla birlikte düğümlerin enerji tüketimleri artacaktır.

Bir düğüm, en uygun yolu bulamayabilir. Bu durum en çok iletim sahası içerisinde hedef alıcıya doğru düğüm bulunamadığı “boşluk bölgesi” sınırında gerçekleşir. Açgözlü yönlendirme protokolleri, çok sayıda düğümden oluşan ağlarda iyi çalışırken boşluk bölgelerinin çok olduğu ağlarda geri kurtarma stratejisi gerektirir. Aksi takdirde başarısı ciddi şekilde düşer.

Gönderici, hedef alıcı doğrultusundaki tüm komşularına veri paketi ya da yol istek paketi yayımlar. Paketi alan düğüm kullanılan ölçüte göre paketi aktaracak düğümler arasında olup olmadığını kontrol eder. Aktarma düğümleri arasında ise paketi iletir, aksi takdirde paketi siler. En kısa yol bulma olasılığını artırmak için paket birkaç düğüme aktarılır ve böylece düğüm hataları ile konum hatalarına karşı sağlamlık artırılır.

Hiyerarşik biçim büyük sayıda hareketli düğüm sayısına ölçeklemek için kullanılan bir stratejidir. Bazı stratejiler bölge tabanlıdır.

Konum tabanlı yönlendirmenin avantajları aşağıda listelenmektedir [28, 29, 31, 32, 33]:

- Ağ topolojisini tanması gerekmez.
- Aktarma işlemi boyunca veya ondan önce yol yapılandırma ya da yönlendirme tablosu sürdürmesi gerekmez.
- Topolojinin sık değiştiği durumlarda yol kurma ve sürdürmesi gerekmediğinden ek trafik yükü oluşturmaz.
- Hareketli ağlarda topoloji sık değiştiğinden hızlı cevap üretir ve yalnızca yerel topoloji bilgisi kullanarak yeni yolları hızla bulur.

- Her düğüm aktarma işlemini sonraki en iyi düğümü seçerek yaptığından topoloji değişimlerine uyumludur.
- Her düğüm kendisi, komşuları ve hedefin pozisyonunu belirleyerek kendi yönlendirme kararını verebilir. Böylece bellek kullanımı minimumdur.
- Konum tabanlı protokoller, etkin ve ölçeklenebilir protokollerdir.
- Tek atlamadan fazla keşif ve durum yayılımı gerekmediğinden enerji ve bant genişliğini korur.
- Düğümlerin koordinasyonsuz uyuma ve uyanmasına imkân verir.

3.5.1. İşaretsiz (Beaconless) konum tabanlı yönlendirme

Geleneksel konum tabanlı yönlendirme protokolleri tek atlama komşularının konumlarını bir tabloda saklar. Tablodaki bilgiler güncel olmadığında yanlış yol kararı verilebileceğinden tablolardaki bilgiler güncellenmelidir. Tablo bilgilerinin güncellenmesi için komşu düğümlerin birbirleriyle periyodik olarak konum bilgilerini değiştirmesi gerekmektedir. Tablolar düğüm hareketleri ve uyku şemaları gibi topolojiyi değiştiren nedenlerden dolayı sık güncellenmelidir. Her güncelleme iletişim ek yükü oluşturarak bant genişliğinin verimsiz kullanılmasına neden olur [34].

Konum bilgisi değişimi gerektirmeyen konum tabanlı yönlendirme “işaretsiz konum tabanlı yönlendirme” olarak ifade edilir. Bu yönlendirme çeşidinde, sadece kendindeki veri paketini aktarmak isteyen “paket tutucu düğüm” komşu düğümlerine kendi konum bilgisini gönderir. Komşu düğümler bu bilgiyi kullanır ve yönlendirme sürecine katkı sağlar. Gereksiz bilgi değişimi yapılmadığından bant genişliği, bellek ve enerji daha verimli kullanılmış olur [34].

İşaretsiz konum tabanlı yönlendirme protokolleri hedef alıcıya doğru pozitif ilerleme yönünde coğrafik aç gözlü aktarmaya dayalıdır. İşaretsiz yönlendirme protokolleri

aşağıdaki mekanizmalarla çalışır [34]:

- Paket tutucu düğüm, hedef alıcıya doğru pozitif ilerleme bölgesini farklı alanlara bölerek sonraki atlama düğümü olmaya aday komşu düğüm sayısını azaltır.
- Bekleme veri gönderme isteğine sonraki atlama düğümü olarak uygun tek bir düğüm seçmek için zamanlayıcı mekanizması kullanılır. Paket tutucunun göndermek istediği veri paketini almaya aday olacak komşu düğümler, genelde hedef alıcıya ilerleme mesafeleri ile doğru orantılı olarak hesapladıkları zaman kadar bekledikten sonra adaylıklarını bildirirler. Adaylığını ilk bildiren düğüm sonraki atlama düğümü olarak seçilir.
- Paket tutucunun göndermek istediği veri paketini almaya aday olacak komşu düğüm sayısının çok olması durumunda oluşabilecek çekişmeleri azaltmak için baskılama şeması kullanılır. Baskılama şeması, veri paketini almak için adaylığını bildiren ilk düğüm dışındaki komşu düğümlerin adaylık bildirimlerini baskılama amacıyla kullanılır.
- Paket tutucu düğüm, hedef alıcıya doğru pozitif ilerleme sağlayan herhangi bir komşu düğüme sahip olmadığında “boşluk bölgesi” yönetimi kullanarak veri paketini diğer komşu düğümlerden uygun olanına aktarır. Bu süreçte, paket tutucu düğüm sonraki atlama düğümü seçiminde tüm komşularının bilgilerini toplayarak karar verir. Komşuluk bilgisi toplamadan çalışan daha etkin “boşluk bölgesi” yönetimi kullanılması gereklidir.

BLR (Beaconless Routing) [35], CBF (Contention - Based Forwarding) [36], BGR (Blind Geographic Routing) [37], SIF (State - free Implicit Forwarding) [38], IGF (Implicit Geographic Forwarding) [39], GERAF (Geographic Random Forwarding) [40] ve PSGR (Priority - based Stateless Geo-Routing) [41] protokolü işaretli konum tabanlı yönlendirme protokollerinin en bilinenleri ve öncüleridir. Özellikle SIF protokolü geliştirilmekte olan işaretli konum tabanlı yönlendirme protokollerine alt yapı niteliği taşımaktadır.

İşaretsiz konum tabanlı yönlendirme protokolleri üç farklı yönlendirme metodu kullanır [34]:

- Paket tutucu düğüm, tüm komşu düğümlere veri gönderme isteği paketini yayınlamaktadır. İstek paketini alan tüm komşu düğümler bekleme zamanı hesaplar ve zamanlayıcı kurar. Bekleme zamanı dolan komşu düğüm veriyi almaya aday olduğunu belirten cevap paketi gönderir. Paket tutucu düğüm ilk cevap paketi gönderen komşu düğüme veriyi gönderir. Karşılığında kabul paketi alır.
- Paket tutucu düğüm, tüm komşu düğümlere veri paketini yayınlamaktadır. Veri paketini alan komşu düğümler bekleme zamanı hesaplar ve zamanlayıcı kurar. Bekleme zamanı ilk dolan düğüm veri paketini kendi komşularına yayınlamaktadır. Paket tutucu düğüm, kendisine ait veri paketinin komşu düğüm tarafından yayımlandığını duyduğunda gönderdiği paketin başarılı olarak gönderildiğine karar verir ve veri paketini belleğinden siler.
- Paket tutucu düğüm tüm komşularına veri paketini yayınlamaktadır.

İşaretsiz konum tabanlı yönlendirme protokolleri sonraki atlama düğümü belirlemede üç farklı yöntem kullanır [34]:

- Komşu düğümler paket tutucu düğümden aldıkları veri gönderme isteği paketindeki bilgileri değerlendirir ve sonraki atlama düğümünü dağıtık olarak belirlerler.
- Paket tutucu düğüm komşu düğümlerin gönderdiği cevapları değerlendirerek sonraki atlama düğümünü komşu düğümler arasından belirler.
- Paket tutucu düğüm, hedef alıcıya pozitif ilerleme bölgesinde herhangi bir komşu düğüme sahip olmadığında boşluk bölgesi yönetimi kullanarak sonraki atlama düğümünü komşu düğümler arasından belirler.

İşaretsiz konum tabanlı yönlendirme protokollerinde yönlendirme süreci ya ağ katmanı tarafından ya da ağ katmanı ile birlikte MAC katmanı işbirliğiyle gerçekleştirilir [34].

İşaretsiz konum tabanlı yönlendirme protokollerinde sonraki atlama düğümü seçilirken maliyet hesaplarına düğümlerin kalan enerji değerleri katılır. Bunun yanında, bazı işaretsiz konum tabanlı yönlendirme protokollerinde, tüm düğümlerin görev çalışma zamanı ayarlanarak enerji korunumu sağlanır.

Kaya ve arkadaşları işaretsiz konum tabanlı yönlendirme protokollerinin karşılaştırılması ile ilgili yaptıkları çalışmada, bu protokollerin büyük ölçekli ve dinamik algılayıcı ağlara uygun olduğunu ancak boşluk probleminde etkin çözümler üretmediğini ve adaylar arası çekişmelerin ek yükü artırdığını belirtmektedir [34].

3.5.2. SIF protokolü

Önerilen yönlendirme algoritmasının geliştirilmesinde ve performans sonuçlarının karşılaştırılmasında konum tabanlı işaretsiz açgözlü bir yönlendirme protokolü olan SIF (State-free Implicit Forwarding) protokolünden yararlanılmıştır. Konum tabanlı diğer protokollere olan temel üstünlüğü işaretsiz olmasıdır. Bu yapıda düğümler komşularından yönlendirme için bilgi toplamadığından gereksiz bellek ve kontrol paketi kullanımından kaçınılmış olur.

Şekil 3.3 K gönderici düğümün alıcıya doğru pozitif ilerleme sağlayan AKBC aktarma alanını göstermektedir. Gönderici ile alıcı arasındaki mesafenin alıcı merkezli yarıçap olarak kullanıldığı bölge potansiyel aktarma alanıdır. AKBC bölgesi içindeki her düğüm göndericiye göre hedefe daha yakındır ve aktarmaya adaydır.

Bir düğüm gönderecek paketi olduğunda SIF protokolü el sıkışması yöntemini kullanır. Gönderici düğüm fiziksel ortamın boş olduğunu “dağıtılmış koordinasyon fonksiyonu çerçeve boşluğu” (Distributed Coordination Function InterFrame Spacing - DIFS) süresi kadar kontrol eder. Ortam boş ise tüm komşularına içinde

Veri paketi alındığında geriye gönderilen ACK paketi göndericiye ulaşmazsa paket tekrar gönderilecek ve çoğaltılmış olacaktır. SIF protokolünde ACK paketlerinin kaybolma olasılığı küçüktür. Bu yüzden veri paketi çoğaltma etkisi sınırlıdır.

Zamanlama değeri Denklem 3.1'de verildiği gibi düğümün kalan enerjisi ve alıcıya daha yakın olması üzerinden hesaplanır. Sistem yükünü dağıtmak için rastgele değer kullanımına yer verilir.

$$C = (W_m * (1 - (L / T)) + W_e * (1 - (R_e / E)) + W_r * V) * M \quad (3.1)$$

C: yarışmacı cevap zamanını, L: göndericinin alıcıya mesafesi - aktaranın alıcıya mesafesi, T: gönderici iletim sahası, R_e: düğümün kalan enerjisi, E: düğümün maksimum enerjisi, V: 0-1 arası rastgele bir değeri ve M: maksimum yarışma cevap zamanını ifade eder. Yarışmacı cevap zamanı hesaplamasında kullanılan mesafe katsayısı W_m, enerji katsayısı W_e ve rastgele değer katsayısı W_r değişkenleri Denklem 3.2'de verildiği gibi toplandığında 1 değerine eşit olur.

$$W_m + W_e + W_r = 1 \quad (3.2)$$

C değeri DIFS değerinden küçük olmalıdır. Gönderecek verisi olan düğümler el sıkışması başlattıklarında girişim oluşursa yeni el sıkışması başlatabilir.

Düğümün rastgele dağılımından ya da zaman içerisinde enerjisi biten düğümlerden dolayı hedef alıcıya doğru pozitif ilerleme sağlayacak komşuların olmadığı boşluk bölgeleri oluşabilir. SIF protokolü boşluk bölgelerini aşmada iki yöntem kullanır. Birinci yöntemde, gönderici düğüm en az bir aday buluncaya kadar iletim sahasını dereceli artırır. İkinci yöntemde ise düğüm kendisini pasif olarak işaretler ve hiçbir veri paketini kabul etmez. Kendini pasif olarak işaretleyen düğüm, ileriki zamanda aktarma alanında hedef alıcıya doğru pozitif ilerleme sağlayacak yeni eklenen düğüm ya da uyanan düğüm olması durumunda kendisini tekrardan aktif olarak işaretleyerek veri paketi kabul etmeye devam eder.

3.5.3. Boşluk bölgesi

Gönderilen bir paketin iletişim başarısızlıkları nedeniyle hedef alıcıya doğru mesafeyi azaltabilecek bir düğüme aktarılamaması kablosuz algılayıcı ağlarda coğrafik yönlendirmenin önemli sorunlarından birisidir.

Chen ve Varshney'in yaptıkları çalışmada, boşluk bölgesi yönetim tekniklerini, düzlemsel çizge tabanlı, geometrik, akış tabanlı, maliyet tabanlı, buluşsal ve melez olmak üzere altı kategoride sınıflandırmaktadır [42]:

Düzlemsel çizge tabanlı: Araştırmaların büyük çoğunluğu bu kategoridedir. Düzlemsel çizge kenarlar kesişmesin diye düzlemde gömülebilen bir çizgedir. Basit düzlemsel çizge geçiş yaklaşımı sağ el kuralı fikrine dayalı hedef alıcıya doğru yol bulmada kullanılabilir. Sağ el kuralına göre sağ elin başparmağı gönderici düğümden nihai hedef alıcıya doğru konumlandırıldığında açık olan diğer parmakların gösterdiği yöndeki komşu düğümler sonraki aktarma düğümü olabilecek düğümlerdir.

Kablosuz algılayıcı ağlar tarafından biçimlendirilmiş çizge genellikle düzlemsel değildir. Bu yüzden, bazı ek tekniklerle orijinal ağ çizgesinden düzlemsel alt çizge çıkartılması gerekir. Ayrıca yönlendirme yollarında döngüler oluşabilir. Her düğüm tarafından yerel olarak karar verilen dağıtık bir biçimde yapılması gereken düzlemsel alt çizgede bir kenarın kalıp kalmayacağı önemlidir.

Düzlemsel çizge tabanlı boşluk bölgesi yönlendirme tekniğinin performansı sadece düzlemsel çizge geçiş algoritmasına değil aynı zamanda dağıtık düzlemleştirme algoritmasının performansına da bağlıdır. Topolojik olarak düzlemsel alt çizgedeki en uygun yolların kalitesi orijinal ağ çizgesindekinden daha kötü olmamalıdır.

Geometrik boşluk yönetimi: Bu teknikte temel olarak dağılmış düğümlerin geometrik özellikleri kullanılarak ağdaki boşluk bölgeleri tanımlanır. Uygulama gereksinimlerine bağlı olarak yollar isteğe bağlı bulunabilir veya önışlem aşamasında keşfedilebilir ve boşlukların sınırları boyunca yerel olarak saklanır. Düzlemsel çizge

yaklaşımının aksine, boşluk bölgeleriyle ilgili bilgiyi hesaplama ve saklama yalnızca ağın problemlili parçası için gereklidir. Bir düğüm etrafındaki boşluk bölgesini tanımlamak için ilk önce boşluk bölgesine sınır olup olmadığını kontrol etmelidir. Boşluk bölgesi sınırı yerel olarak belleğe alındığından, düzlemsel çizgedeki çevresel yönlendirmeye benzer bir yol ile sıradaki paketlere boşluk bölgesi etrafında yönlendirme için kanal sağlar.

Akış tabanlı: Boşluk bölgesi sınırındaki düğümün paketi yayınlaması ve ağdaki her düğümün bu paketin kopyasını alması mantığıyla çalışır. Ancak bu metot kaynak kullanımı bakımından etkin değildir. Buna rağmen maliyetleri azaltmak için akış sahasını ve akışın oluşma frekansını kontrol ederek boşluk bölgesi problemini etkin olarak yöneten çözümler önerilmiştir. Bu çözümlere rağmen maliyet hala yüksektir.

Maliyet tabanlı: Maliyet tabanlı boşluk bölgesi yönetmede, bir paket daha yüksek maliyetli bir düğümden daha düşük maliyetli bir düğüme gönderilir. Ağdaki her düğüme hedefe olan uzaklığıyla orantılı bir maliyet tahsis edilir. Bir paket boşluk bölgesine sınır bir düğüme ulaşmaya kadar aç gözlü olarak gönderilirken, sonrasında maliyet tabanlı aktarma çalıştırılır. Boşluk bölgesine sınır düğümün maliyeti onun hedefe mesafesinden daha büyük bir değere artırılır. Böylece daha sonra paket aktarılırken bu düğümün tercih edilme olasılığı düşürülür.

Buluşsal: Bu teknik bazı ilave kaynaklar kullanabilir. Ayrıca ağ topolojisinin bazı kalıtsal özelliklerini ve doğrudan boşluk alanlarının bazı geometrik özelliklerini de kullanabilir.

Melez: Tek bir boşluk bölgesi yönetme tekniği tüm olası ağ topolojileri için etkin olarak boşluk bölgesini yönetemez. Bu yüzden diğer tekniklerden en az ikisinin olumlu yönlerinin birleştirildiği yöntemdir. Böylece etkin bir şekilde boşluk bölgesi yönetimi sağlanırken, gerekli kaynak kullanımı azalır.

3.5.4. Konum belirleme

Fiziksel olgulardan elde edilen verinin anlamlandırılabilmesi için algılayıcı düğümün

konumunun bilinmesi gerekir. Büyük yangınlar, orman yangınları, hava kirliliğini izleme gibi çevre kontrolü vb. çoğu uygulamada bu gereksinim mevcuttur [43].

Ağdaki tüm cihazlara GPS eklemek pratik değildir. GPS'in pahalı olması yanında yer kaplaması, montaj için çaba gerektirmesi ve iç mekânlarda çok verimsiz olması ya da hiç çalışmaması dezavantajlarıdır [44].

Ağ konumlandırma algoritmaları dört sınıfa gruplanabilir [44]:

Birinci grup algoritmalar, koordinatları önceden ayarlanmış çapa düğüm olarak ifade edilen düğümlerin var olduğu çapa tabanlı ve çapa düğümlerin var olmadığı çapa serbest algoritmalar olmak üzere iki çeşittir [44]:

- Çapa tabanlı konumlandırma sistemi, çapa olarak kullanılacak düğümlerin konumunu belirlemede GPS vb. diğer bir konumlama sistemi gerektirmesinin yanında, kabul edilebilir konum hataları elde edebilmek için çok büyük sayıda çapa düğüm gerektirir.
- Çapa serbest algoritmalar, düğümlerin görece koordinatlarını belirlemede düğümler arasındaki yerel mesafe ölçümlerini kullanır.

İkinci grup algoritmalar, ağda düğüm konumlarını yayma yöntemine dayalıdır. Artırmalı algoritmalar ve eş zamanlı algoritmalar olmak üzere iki alt gruba sınıflandırılabilir [44]:

- Artırmalı algoritmalar, konumu bilinen üç ya da daha fazla referans düğüm kullanır. Ağdaki diğer düğümler referans düğümlere bağlanabilir ve kendi konumlarını belirleyebilir. Kendi konumunu elverişli olarak tahmin edebilen düğümler yeni referans noktası olarak hizmet ederler. Bu işlem tüm ağdaki düğümlerin konumları elde edilinceye kadar artırılarak devam eder.
- Eş zamanlı algoritmalarda, tüm algılayıcıların konumlandırmasını sağlamak için yapılan ölçümler karşılıklı paylaşılır. Bu sistemde bütün düğümlerin konumları eş

zamanlı olarak tahmin edilir. Bu konumlandırma sistemleri konumunu bilmeyen düğümlerin hem referans düğümler hem de diğer düğümler ile ölçümler yapmasına imkân verir. Konumu bilinmeyen düğüm çiftleri arasındaki bu ölçümlerden elde edilen ek bilgi konumlandırma sisteminin sağlamlığını ve doğruluğunu geliştirir.

Üçüncü grup algoritmalar, iletişim boyunca düğümler tarafından elde edilen bilginin parçalı yapıda olup olmadığına dayalıdır. Kaba (Coarse grained) algoritmalar ve doğruluğu çok daha yüksek olan detaylı (Fine grained) algoritmalar olmak üzere iki alt gruba sınıflandırılabilir [44]:

- Detaylı algoritmalar, “alınan sinyal gücü” (Received Signal Strength - RSS) veya “varış zamanı” (Time of Arrival - ToA) ölçümlerine dayalı referans noktasından mesafe gibi doğru bilgi kullanan algoritmalarlardır. Tipik olarak bu algoritmalar “kızıl ötesi” (Infrared - IR), “ses” (Ultra Sound - US) veya “radyo frekans” (Radio Frequency - RF) sinyalleri gibi teknolojileri kullanır.
- Kaba algoritmalar, verilen referans noktasına yakınlık gibi daha az doğru bilgileri kullanan algoritmalarlardır. Kaba algoritmalar, atlama sayısı gibi basit teknikleri kullanarak düğümler arası mesafeyi tahmin eder.

Dördüncü grup algoritmalar, hesaplamanın dağıtıklığına dayalı olarak merkezi ve dağıtık olarak iki alt gruba sınıflandırılabilir [44]:

- Merkezi algoritmalarda, bütün düğümler konumlama problemini çözmek için tek bir bilgisayara bilgi yayınlar ve hesaplama bu bilgisayarda merkezi olarak yapılır.
- Dağıtık algoritmalarda hesaplama yükü ağdaki düğümler arasında eşit olarak dağıtılır. Her düğüm komşu düğümlerinden konum bilgisini alır, işler ve elde ettiği sonuçları geri iletir.

Düğümler ortama bırakıldıklarında konumlarını bilmezler. Aynı ortama el ile ayarlanmış ya da GPS cihazı ile konumunu bilen çapa olarak isimlendirilen düğümler

atılır ya da düzenli konulur. Çapa düğümler kendi konumlarını düzenli aralıklarla ya da istek üzerine işaret mesajı olarak yayınlar. Konumunu bilmeyen düğümler bu bilgileri kullanarak konum bulma algoritmalarını çalıştırır ve kendi konumlarını tahmin hesaplaması yaparlar. Bazı konum algoritmaları çapasız kendi koordinat sistemlerini kurarak çalışırlar [45].

Konum bulma teknikleri mesafe tahminine dayalı olarak mesafe tabanlı ve mesafe serbest olmak üzere ikiye ayrılır [43, 44, 45]:

- Mesafe tabanlı konum bulma teknikleri, düğümler arasındaki mesafeyi ölçmede özel donanımlar kullanırlar. En fazla kullanılan teknikler, “varış zamanı”, “varış zamanı farkı” (Time Difference of Arrival - TDoA), “alınan sinyal güç göstergesi” (Received Signal Strength Indicator - RSSI), “algılayıcı düğümler arasındaki açı” (Angle of arrival - AoA) teknikleridir. Yeteri kadar ölçüm aldıktan sonra merkezi ya da dağınık olarak düğümün pozisyonu hesaplanır.
- Mesafe serbest konum bulma teknikleri, özel donanım gerektirmez. Mesafe tahmin etmede iki düğüm arasındaki en kısa yolu kullanırlar [45]. Mesafe serbest konum bulma tekniklerinin doğruluğu, çoğu uygulamanın ihtiyaçlarını karşılayabilecek düzeyde olsa bile mesafe tabanlı konum bulma tekniklerine göre daha azdır. Mesafe serbest konum bulma teknikleri, kaynak kısıtlı düğümler için daha basit ve uygun maliyetlidir [43].

ToA tekniğinde iyi bir saat eşlemeli ağ gerekirken, TDoA tekniğinde her düğümde ek donanım gerekmektedir. RSSI ek donanım ya da zaman eşlemesi istemez ancak çevre şartlarından radyo sinyalinin etkilenmesinden dolayı doğruluğu azdır. Ancak eski radyolar üzerinde yapılan çalışmalar yeni radyo örneğin CC2420 ile denendiğinde sonuçlar çok daha başarılı olmuştur [45].

Ucuz GPS alıcılarda ölçümlerin %95’inde 10 metreye kadar konumlama yapılır. Senaryoya göre 2 ile 30 metre arasında konumlama hatası yapar [46].

Nuaimi ve Kamel çeşitli çevrelerde kullanılan bina içi konumlama sistemlerinde

konumlama prensipleri ve algoritmaları ile ilgili yaptıkları çalışmada kullanılan yöntemlere göre radyolar 5 ile 50 metre arası iletim sahasında etkinlik göstermektedir. Kullanılan her donanımın kendine göre artı ve eksileri bulunur. Mesela US tabanlı yöntemler RF tabanlı yöntemlere göre daha mükemmel doğruluğa sahip iken hedefin görüş açısı içerisinde olmaları gerekir. Elde edilen doğruluk 2 cm ile 10 m aralığındadır. Değerlendirilen protokollerin büyük çoğunluğunda hata oranı radyo iletim sahasının %5'in altında iken diğerlerinde en fazla %20 oranındadır [47].

3.5.5. Konum hatalarının yönlendirmeye etkisi

Peng ve arkadaşları, coğrafik yönlendirmede konum hatalarının etkisi üzerine yaptıkları çalışmada; çapa düğüm sayısı, gürültü seviyesi, radyo sahası ve görece bağlantıların sayısının paket teslim oranı bakımından yönlendirme performansına önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Aynı çalışmada gürültü arttığında, bağlantılabilirlik azaldığında ya da çapa düğüm sayısı ciddi oranda düştüğünde paket teslim oranı %20 oranına kadar azalmakta olduğunu göstermektedir [48].

Shah ve arkadaşları, konumlandırma hatalarının olması durumunda coğrafik yönlendirme performansı üzerine yaptıkları çalışmada; ağda başka hiçbir engel yokken düğümün radyo sahasının %20'si kadar konum hatalarının performansı önemli oranda azalttığını göstermektedir. Çalışmada yalnızca simetrik ve bağımsız konum hata modelleri dikkate alınmaktadır [49].

Seada ve arkadaşları, durağan algılayıcı bir ağda konumlandırma hatasının konum tabanlı protokollerden GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) protokolünün performans ve doğruluğuna etkisini inceledikleri çalışmada; düğüm iletim mesafesinin %10'u kadar konum hatasının GPSR protokolü başarı oranını %99'a düşürürken, konum hatası %30'lara çıktığında başarı oranının %70'lere düştüğünü göstermektedir [50].

Günümüz konum bulma tekniklerinin büyük çoğunluğunda konum hatası radyo sahasının en fazla %20'si kadar olduğundan konum tabanlı yönlendirme protokollerinin performansı konum hatalarından çok fazla etkilenmeyecektir.

3.6. Servis Kalitesi Tabanlı Yönlendirme

Son kullanıcı açısından, gerçek dünya kablosuz algılayıcı ağ uygulamaları ağ servis kalitesi ile ilgili olarak belirli gereksinimlere sahiptir. Farklı uygulamalar farklı servis kalitesi gereksinimlerine sahip olabilir. Örneğin, kablosuz algılayıcı düğümlerden çalıştırıcıya büyük gecikme ile veri iletimi ve iletim boyunca paket kaybı meydana gelmesi ofisteki sıcaklığı koruyan havalandırma sistemi için kabul edilebilirken; kritik bir güvenlik kontrol sistemi için izin verilemez [51].

Servis kalitesi tabanlı kablosuz algılayıcı ağ yönlendirme protokolleri veri kalitesi ile enerji tüketimi arasındaki dengeyi ayarlar ve yolları kurarken noktadan noktaya gerekli gecikmeleri hesaba katar. Bu protokoller verinin nihai hedef alıcıya iletilmesinde servis kalitesini sağlayan gecikme, enerji ve bant genişliği metriklerini en uygun düzeyde ayarlayarak veri iletiminde servis kalitesini sağlamaya çalışmaktadırlar.

Hedef uygulama tipine bağlı olarak kablosuz algılayıcı ağlarda servis kalitesi: güvenilirlik, güncellik, sağlamlık, geçerlilik ve güvenlik olarak karakterize edilebilir. Bu servislerin memnuniyet derecesini ölçmede çok sayıda servis kalitesi parametresi kullanılabilir. Bu protokollerin çoğunda kullanılan parametreler ağ çıkışı, gecikme ve paket kayıp oranı olarak sıralanabilir [51].

Ağ çıkışı zamanın belirli bir periyodu içinde etkin iletilen veri akışı sayısıdır, bazı durumlarda bant genişliği olarak belirlenir. Genelde, ağın çıkışı daha büyükse sistemin performansı daha iyidir. Yüksek hızda veri akışı üreten düğümler, örneğin hedef izleme için resim iletmeye kullanılan kamera algılayıcı düğüm, sıklıkla yüksek çıkış gerektirir. Kaynak etkinliğini sağlamak için, kablosuz algılayıcı ağ çıkışı sıklıkla maksimize edilmelidir.

Gecikme kaynak düğümden veri paketinin ayrılışından hedef alıcıya varışına kadar geçen kuyruk gecikmesini, anahtarlama gecikmesini ve yayılım gecikmesini içeren zamandır. Kablosuz algılayıcı ağlarda gecikme duyarlı uygulamalar genellikle veri paketlerini gerçek zamanlı teslim etmeyi gerektirir. Gerçek zamanlı bir sistemde

ağın, sistemin zamanlama gereksinimlerini karşılayan tek bir hızda çalışması gerekir.

Paket kayıp oranı, iletim süreci boyunca kaybedilen veri paketlerinin yüzdesidir. Paketlerin kaybolma olasılığının hesaplanmasında kullanılabilir. Bir paket tıkanıklık, bit hatası, kötü bağlantı vb. nedenlerle kaybedilebilir. Bu parametre ağın güvenilirliği ile yakından ilgilidir.

3.6.1. Kablosuz algılayıcı ağlarda servis kalitesi desteği

Kablosuz algılayıcı ağlarda servis kalitesi: uygulamaya özel servis kalitesi ve ağ servis kalitesi olarak iki grupta tanımlanabilir [52]:

- Uygulamaya özel servis kalitesi: Kapsama, ölçüm hataları ve aktif algılayıcıların en uygun sayısı vb. parametreleri dikkate alır.
- Ağ servis kalitesi: Ağ kaynaklarını etkin kullanırken servis kalitesi sınırlı algılayıcı verilerinin nasıl teslim edileceğini dikkate alır. Genel olarak Tablo 3.1’de gösterildiği gibi üç temel veri teslim modeli vardır: Olay sürücülü, sorgu sürücülü ve sürekli veri teslimi.

Tablo 3.1. Uygulama gereksinimleri [52]

Gereksinim \ Sınıf	Olay Sürücülü	Sorgu Sürücülü	Sürekli
Uçtan uca	Hayır	Hayır	Hayır
Etkileşimli	Evet	Evet	Hayır
Gecikme Toleranslı	Hayır	Sorgu özel	Evet
Kritik	Evet	Evet	Evet

Olay sürücülü uygulamaların çoğu etkileşimli, gecikme toleranssız, gerçek zamanlı, kritik görev ve uçtan uca olmayan uygulamalardır. Uygulamanın bir tarafı hedef alıcı diğer tarafı bir grup kablosuz algılayıcı düğümden oluşur. Olayı algılayan algılayıcılardaki veriler yüksek benzerliktedir ve gereksiz fazlalık içerir. Tek bir

kablosuz algılayıcı düğüm tarafından üretilen veri trafiği düşük yoğunluklu olabilirken; çok patlamalı trafik, ortak bir olay nedeniyle bir kablosuz algılayıcı düğüm grubu tarafından üretilebilir. Sonuç olarak, tespit edilen olayı hedef alıcıya aktarmayla ilgili etkinlikler olabildiğince güvenilir ve hızlı olarak düğümlere dağıtılmalıdır [52].

Sorgu sürücülü uygulamaların çoğu etkileşimli, sorguya özel gecikme toleranslı, kritik görev ve uçtan uca olmayan uygulamalardır. Enerji korunumu için sorgular talep üzerine gönderilir. Veri alıcı tarafından talep edilir ve alınır. Uygulamaların olabildiği kadar güvenilir ve hızlı olarak istenilen veriyi alması gerekir. Bir sorgu ile kablosuz algılayıcı düğümler yeniden yapılandırılabilir ve yönetimde kullanılabilir. Örneğin düğümlerin yazılımları güncellenebilir, gönderme oranı veya algılayıcı görevi değiştirilebilir. Alıcıdan gönderilen komutlar yüksek güvenilirlik gerektirir [52].

Sürekli modelde, kablosuz algılayıcı düğümler önceden belirlenmiş bir oranda hedef alıcıya sürekli verilerini gönderir. Sürekli model, belirli bant genişliği ve sınırlı gecikme gereksinimine sahip, belirli ölçüde paket kaybına müsaade edilebilen, uçtan uca olmayan gerçek zamanlı video, resim ses veya video uygulama verilerinin iletiminde kullanılır. Bunun dışında gecikme ve paket kaybı toleranslı, gerçek zamanlı olmayan ve hedef alıcı tarafından periyodik olarak istenen verilerin iletiminde kullanılır [52].

3.6.2. Kablosuz algılayıcı ağlarda servis kalitesi desteği zorlukları

Kablosuz algılayıcı ağlarda çevre ile etkileşim olduğundan karakteristikleri diğer geleneksel veri ağlarından çok farklıdır. Bu yüzden, kablosuz algılayıcı ağlar genel kablosuz ağların servis kalitesi zorluklarını kalıtsal olarak almakla birlikte kendine özgü zorlukları vardır [52]. Bu zorluklar:

Kaynak sınırlılıkları: Kablosuz algılayıcı düğümlerde enerji, bant genişliği, hafıza, tampon alanı, işleme kapasitesi ve sınırlı iletim gücü vb. kaynak sınırlılıkları bulunur. Kablosuz algılayıcı düğümlerin uzak bir bölgede ya da düşman bölgesinde olması

durumunda şarj edilebilmeleri mümkün olamayacağından enerji en önemli kaynaktır. Dengesiz trafik: Kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarının çoğunda, trafik çok yüksek sayıda düğümden az sayıda ya da tek bir alıcıya akar.

Veri fazlalığı: Kablosuz algılayıcı ağlar güvenilirliği / sağlamlığı artıracak şekilde çok fazla veri üretir ancak bu durum enerjiyi gereksizce tüketir. Verilerin özetlenerek gönderilmesi durumunda ise veri gecikmesine ve servis kalitesi tasarımının karışık olmasına neden olur.

Ağ dinamikleri: Ağ dinamikleri enerji etkin şemalar ve güç yönetimi kullanımı nedeniyle düğüm hataları, kablosuz bağlantı hataları, düğüm hareketliliği ve düğüm durum geçişinden ileri gelebilir. Yüksek dinamizme sahip bir ağ, servis kalitesi desteğinin karışıklığını fazlaca artırır.

Enerji dengesi: Uzun ömürlü bir ağ elde etmek için enerji yükü tüm kablosuz algılayıcı düğümler arasında dağıtılmalıdır. Böylece tüm düğümlerin yaşam süreleri birlikte uzatılabilir.

Ölçeklenebilirlik: Tipik bir kablosuz algılayıcı ağ bir bölgeye yoğun olarak dağıtılmış yüzlerce düğümden oluşur. Bu yüzden, kablosuz algılayıcı ağlar için tasarlanan servis kalitesi desteği büyük sayıda düğüme ölçeklenebilmelidir. Servis kalitesi desteği, düğüm sayısı ya da yoğunluğu arttığında hızla azalmamalıdır.

Çoklu alıcılar: Bir kablosuz algılayıcı ağda farklı gereksinimleri yerine getiren çok sayıda alıcı bulunabilir. Kablosuz algılayıcı ağlar farklı alıcılar ile ilgili farklı servis kalitesi gereksinimlerini destekleyebilmelidir.

Çoklu trafik türleri: Birden fazla algılayıcı taşıyan kablosuz algılayıcı düğümlerin kullanıldığı uygulamalarda üretilen çok çeşitli veri trafikleri için servis kalitesinin desteklenmesi zorlaşır.

Paket kritikliği: Servis kalitesi mekanizmaları paketleri önemine göre ayırmalı ve buna uygun yapılar kurmalıdır.

BÖLÜM 4. ÖNCELİK TABANLI YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Literatürde önerilen yönlendirme tekniklerinin çoğu kablosuz algılayıcı ağlar için enerji etkinliğine odaklanırken ağ yaşam süresini maksimize etmede servis kalitesi ölçütlerine dikkat etmezler [4].

Kablosuz algılayıcı düğümler, düzenli ölçüm yaparak bir veri hacmi üretir ve bu üretilen veriyi bir ya da daha fazla alıcı düğüme doğru paketler halinde iletirler. Kablosuz algılayıcı düğümler sınırlı kablosuz sahaya sahip olduğundan genellikle alıcılara veri aktarmada çok - atlamalı iletişim gereklidir. Bazen beklenmedik nadir olaylar gerçekleşir ve düzenli aralıklarla okunan verilerde ani değişiklikler olur. Nadir olay verileri önemlidir ve belirli servis kalitesi sağlanarak hızla iletilmelidir. Beklenmedik nadir olaylar, ağ trafiğini aniden artıracak şekilde büyük miktarda veri üretir. Nadir olay verileri, rutin veri hacminin sabit kalması veya büyümesinden dolayı önemli derecede yavaşlar ve kaybolur [53].

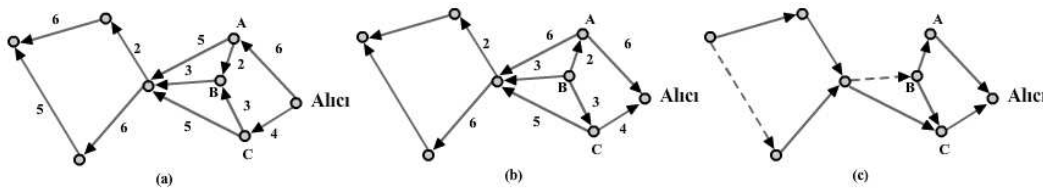
Geleneksel “Ad Hoc ağ yönlendirme protokolleri” veri önceliğine göre yol seçme stratejilerinden ve etkin bir tıkanıklık yönetiminden yoksun; şartlara bağlı “en kısa yola” dayalı protokollerdir. Belirli bir bölgede yük artışı olduğunda hayati bir paket sıradan bir mesajı yollamak için düşürülebilir [7]. Bu yüzden kablosuz algılayıcı ağlara özel öncelik tabanlı yönlendirme protokolleri geliştirilmiştir.

Literatürde geliştirilen öncelik tabanlı yönlendirme protokollerinden önemli olanları bu çalışmada incelenerek karşılaştırılmıştır. İncelenen protokollerin hepsinde yüksek öncelikli veri paketleri daha kısa ve kaliteli yollardan gönderilirken düşük öncelikli veri paketleri daha uzun yollardan gönderilir. Bölüm 1’de özetleri verilen öncelik tabanlı yönlendirme protokollerinin genişletilmiş anlatımları ve belirlenen ölçütlere göre karşılaştırılmaları aşağıda sunulmaktadır.

4.1. PRIMAR Protokolü

PRIMAR (Prioritize Multipath Routing) protokolünde kablosuz algılayıcı düğüm, nihai hedef alıcıya giden tüm yolların gecikmesini bir yönlendirme tablosunda tutmasının yanında M öncelik için M adet yol araştırır. Veri paketleri bu yollardan önceliklerine göre aktarılır ve en yüksek öncelikli veri paketleri alıcıya en kısa yol üzerinden aktarılır. Her öncelik için ayrı bir topoloji katmanı tutularak bir katmandaki topoloji değişimi diğer katmanlardan ayrı ele alınır. Yol; veri önceliği, sonraki atlanacak düğüm ve gecikme biçiminde saklanır. Gecikme bilgisi mevcut düğümden alıcıya kadar uçtan - uca gecikmeyi gösterir. Gecikme çevreyle değişebildiğinden ortalama gecikme kullanılır [1].

Yolların oluşturulması Şekil 4.1'de gösterildiği sırayla önce topoloji gecikme maliyetli etiketlenir, sonra alıcıdan komşu düğümlere yol keşfi başlar ve bütün ağa karşı geri yayılarak çoklu yollar oluşturulur [1].



Şekil 4.1. PRIMAR protokolünde yolların oluşturulması [1]

Veri paketi üretiminin artması durumunda tıkanıklık ve paket kaybını önlemek adına trafiği hafifletmek için borç yol mekanizması çalıştırılarak diğer elverişli ve kapasiteli yollar kullanılır [1].

P öncelikli veri paketi alan bir düğüm, tarihi geçmiş paketleri düşürürken diğerleri için yönlendirme tablosundaki gecikme maliyeti ile uçtan - uca gecikme gereksinimini karşılaştırır. Gecikme gereksiniminden daha küçük gecikmeye sahip istikrarlı bir yol bulunursa paket p. katmana aktarılır [1].

Bir düğüm, kullanacağı yol geçici olarak müsait değilse veri paketini komşularına yayınlar. Yayını duyan komşu düğümler, gecikmelerine ters orantılı ve düğümün görece kalan enerjisiyle doğru orantılı olarak veri paketini aktarmaya yardım eder. Böylece yük düşük güçlü ve kapasitesiz düğümden uzaklaşır. Borç yol çalıştırıldığında birkaç atlama sonrası yük geniş alana yayılır. Birkaç kopyanın ağda farklı yollardan aktarılmasıyla güvenilirlik geniş alana dağıtılan paketler sayesinde artar. Bir düğüm aynı paketin çoklu kopyasını alabilir fakat yalnız ilk aldığı kopyayı aktarır ve diğerlerini düşürür. Düğüm önceden belirlenmiş sabit bir süre boyunca veri paketinin sıra numarasını tutar ve paketi tekrar aldığı anda hemen düşürür. Böylece ağda yaygın taşma olmaz. Tıkanmış düğümlerin sorumluluğunu hafifletmek için yük seyrek trafik alanı tarafından çekilir [1].

Topoloji değişimi nedeniyle bazı yollar gecikme gereksinimlerini karşılayamadığında yol sürdürme süreci başlatılır. Mesajı alan her düğüm mevcut gecikme bilgisini ACK paketiyle geri gönderir. Mesajı gönderen düğüm bu bilgiyi kullanarak alıcıya olan gecikmesini Denklem 4.1’de ve uçtan uca gecikme sapmasını Denklem 4.2’de verildiği gibi günceller [1].

$$D(i, t)_p = \alpha D(i, t-1)_p + (1-\alpha) (D(s, t)_p + l(i, s, t)) \quad (4.1)$$

$$\text{Uçtan-uca gecikme sapması } D_\delta(i, t)_p = \beta D_e(i, t-1)_p + (1-\beta) |D(i, t)_p - D(i, t-1)_p| \quad (4.2)$$

$D(i, t)$ mevcut düğümün gecikme değeri; $D(s, t)$ sonraki düğümün gecikme değeri; $l(i, s, t)$ bağlantının gecikme değeri = 0.5; $RTT(i, s, t)$: t anında i düğümünden s düğümüne gidiş - geliş süresi; p : veri önceliği, α ve β unutma parametreleridir [1].

Bir düğüm sorunlu bir yol tespit ettiğinde sorunlu yolun yönlendirme bilgisini içeren bir paket yayınlar. Düğüm cevap için zamanlayıcı kurar. Cevap alınıncaya kadar, yerini alacak olan yukarı akım ve aşağı akım dışındaki diğer düğümler, p . yol girişiyle istekte bulunan düğümü cevaplar ve elverişli ise alternatif yol adayları olarak kendilerini aday gösterirler. İstekte bulunan düğüm cevap alamazsa p . öncelikli başarılı yol girişlerinin tümünü taşır. İstek yapan düğüm cevap alırsa yeni yol olarak en düşük gecikmeli olanı seçer ve p . yolu günceller. Daha sonra düğüm yakın yukarı

akım düğümlerini ACK paketi içinde gecikme değişimi ile ilgili bilgilendirir. Yoldaki düğümler ilgili bütün düğümler bilgilendirilinceye kadar bu işlemi tekrarlar [1].

Bir düğümdaki tek bir maliyet değişimi, kendi yönlendirme tablosundaki değişikliklerle birlikte komşu düğümlerde sıralı değişime neden olur ve değişim ağa yayılır. Bu yüzden yalnızca gecikme değişiminin belirlenen gecikme dalgalanma eşiğinden yüksek olması veya yeni maliyetin sonraki daha düşük öncelik seviyesinden daha yüksek olması durumunda yönlendirme tablosu değiştirilir. Böylece ek yük oldukça azaltılır. Yol bilgilerinin düğümler arasında değiş - tokuşu trafik azaldığında yapılarak performans artırılır [1].

4.2. CAR Protokolü

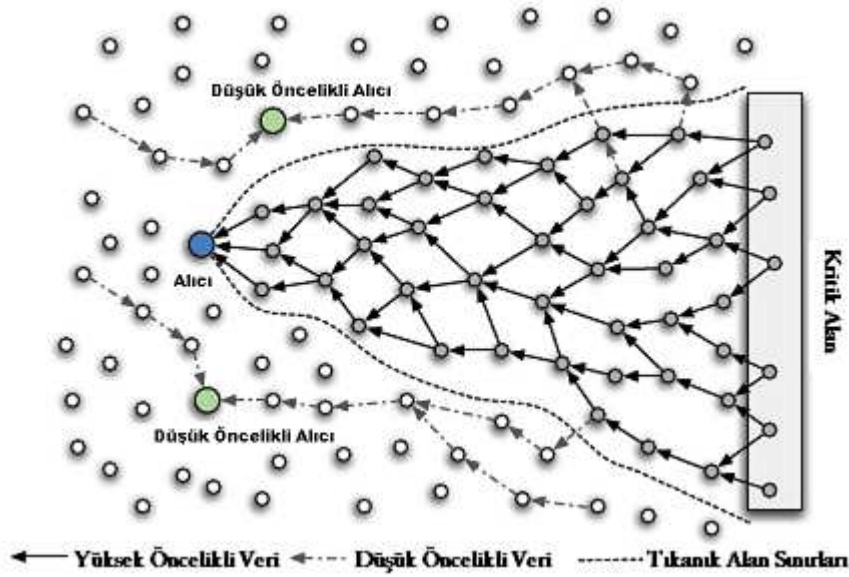
CAR (Congestion Aware Routing) protokolü, yüksek öncelikli verileri alan tek bir yüksek öncelikli alıcı, düşük öncelikli verileri alan birkaç düşük öncelikli alıcının olduğu bir ağ için düğümlerin sık ve düzenli dağıtıldığı, ağdaki her düğümün kendi yerel koordinatlarını bildiği ve düğümlerin hareketsiz olduğu varsayılarak tasarlanmıştır [2].

CAR protokolünün tasarım amacı düşük öncelikli verileri tamamen görmezden gelmeden yüksek öncelikli verilere daha iyi hizmet sağlamaktır. Enerji tüketimini azaltarak ağ yaşam süresini uzatmayı amaçlayan protokol, yüksek öncelikli veri paketleri için daha yüksek paket teslim oranı ve daha düşük gecikme elde etmeye çalışır [2].

CAR protokolü, bölgeyi dinamik olarak tıkanık alan ve diğer kısım olarak ikiye ayırır. Yüksek öncelikli veri paketleri tıkanık alan içerisinde yönlendirilirken, tıkanık alanın dışında üretilen düşük öncelikli veri paketleri yönlendirme için yalnız tıkanık alana uzak düğümleri kullanır ve tıkanık alanın içinde üretilenler dışarı yönlendirilir [2].

Yüksek öncelikli veri üreten alanda tıkanıklık oluşabileceğinden bu alan kritik alan olarak tanımlanır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi kritik alan ağ yaşamı süresince

değişebileceğinden yüksek öncelikli yönlendirme ağı tüm düğümleri kapsar. Yüksek öncelikli yönlendirme ağının oluşturulması yüksek öncelikli alıcı düğüm tarafından ağa doğru “ağ yapılandırma” paketi gönderilmesiyle başlatılır. Tüm düğümler “ağ yapılandırma” paketini sınırlandırılmış taşkın metodu kullanarak komşularına yayar. Süreç tamamlandığında ağdaki tüm düğümler kendinden önceki ve sonraki derinlikteki komşularının listesini tutar. “Ağ yapılandırma” paketi periyodik olarak yayınlanarak topoloji bilgisi güncellenir [2].



Şekil 4.2. CAR protokolünde yüksek ve düşük öncelikli trafiğin yönlendirilmesi [2]

Her düğüm alıcıya atlama mesafesine göre aynı derinlikteki birden fazla ebeveyne sahip olur. Çoklu ebeveyn yük dengelemeye imkân verirken yol hatalarına karşı toleransı artırır. Çoklu ebeveyn özelliği ile düğümler farklı yerlere farklı öncelikli veriyi yönlendirebilir [2].

Tıkanık alan keşfinin başlatılması yüksek öncelikli bir olay tespit eden kritik alan düğümleri ya da alıcı tarafından gerçekleştirilir. Düğümler yüksek öncelikli alıcı ile kritik alan arasında potansiyel tıkanmış yol üzerinde ise kendilerini “tıkanık alanda” olarak işaretler [2].

Tıkanık alan keşif algoritmasının en önemli amacı ebeveyn ve kardeş olarak adlandırılan düğümleri tıkanık alanın dışındakiler ve içindekiler olarak ayırmaktır. Bu bilgi tıkanık alan içinde veri yönlendirirken kullanılır. Başlangıçta bütün ebeveyn ve kardeş düğümler tıkanık alanın dışında olarak işaretlenir. Bir düğüm sadece tıkanık alandıysa “keşif” mesajı aktaracağından, ebeveyn veya kardeş düğümünden bir yayın duyduğunda, o komşusunu tıkanık alan üzerinde olarak işaretler [2].

Kritik alan düğümleri olay tespit ettiğinde keşif mesajı yayımlar. Mesajı alan düğümler belirlenen hesaplama yöntemlerine göre kendisinin tıkanık alanda olup olmadığını işaretler ve ağa yayılacak yeni bir keşif mesajı üretip üretmeyeceğine karar verir [2].

Tıkanık alan kullanılmadığında alıcıdan kritik alana ya da kritik alan düğümlerinden alıcıya doğru “tıkanık alan yıkım” mesajı yayılarak yıkılır. Bu mesajı yalnızca tıkanık alandaki düğümler aktarır. Bir düğüm “tıkanık alan yıkım” mesajı yayan komşularını tıkanık alanda değil olarak işaretler [2].

Farklılaştırılmış yönlendirme: Bütün yüksek öncelikli veri tıkanık alan içinde üretilir. Bir düğüm her zaman veriyi ebeveynlerine aktarır. Bu alıcıya ulaşıncaya kadar sürer. Ebeveyn yük dengelemek için ebeveyn listesinden rastgele seçilir. Seçilebilecek hiç ebeveyn kalmamışsa düğüm veriyi tıkanık alandaki kardeşlerine aktarır. Komşularının herhangi birine aktarması mümkün değilse tıkanık düğüme geri döner [2].

Tıkanık alandaki bir düğüm düşük öncelikli mesaj aldığı anda eğer varsa tıkanık olmayan alandaki ebeveynine; yoksa tıkanık olmayan alandaki kardeşine aktarır [2].

Tıkanık alan keşfinden sonra, alıcı tıkanık alanın yarısını kesen bir çizginin koordinatlarını kapsayan tıkanık alan boyunca bir mesaj gönderir. Bu hat kritik alanın merkezine alıcıyı bağlar. Bu bilgiyi ve onun kendi koordinatları kullanarak, bir düğüm konumunun tıkanık alanın yarısında olduğunu hesaplayabilir ve böylece tıkanık alanın sınırlarına en yakın (çizgiden en uzak) ebeveyne düşük öncelikli veri yönlendirir. Düğümlerin düzenli ve sık bir şekilde dağıtıldığını varsayarak, tıkanık

alan içinde üretilen bütün düşük öncelikli veri etkin olarak ve en kısa yol boyunca dışarı yönlendirilir [2].

Düğüm tıkanık alan içindeki tüm düşük öncelikli paketleri yönlendirmede aynı ebeveyni kullanır. Ebeveyn düğüm ancak iletişim kurulamadığında değiştirilir [2].

Optimizasyon: Yüksek öncelikli veriyi daha iyi iletmek amacıyla CAR+ tıkanık alan düğümleri tarafından üretilen düşük öncelikli mesajlardan biri iletilmez, CAR++ herhangi bir kritik alan düğümünün iletişim sahası içindeki bütün düğümlerin düşük öncelikli veri göndermesini hizmet dışı bırakır. Dinamik CAR düşük öncelikli verinin oranı arttığı durumda yüksek öncelikli veriye sağlanan hizmet belirlenen eşğin altında ise CAR, eşğin üstünde ise CAR++ protokolünü çalıştırır [2].

4.3. QBRP Protokolü

QBRP (Quality of Service Based Routing Protocol) protokolü paket önceliklendirme, düşük iletim gecikmesi, yol bozukluklarında hata toleransı ve enerji korunumu gereksinimlerini karşılamaya çalışır. Bunun için aşağıdaki dört aşamayı izler [3]:

Aşama 1: Nihai hedef tarafından ağ yapılandırma paketi yayınlanarak atlama ağacı oluşturma süreci başlatılır. Bu aşamada ağ alt ağlara bölünür.

Aşama 2: Alt ağlardan kablosuz algılayıcı düğümlerdeki enerji seviyesi ve akış alma oran bilgisi toplanır ve kendi alan aktörlerine teslim edilir.

Aşama 3: Her aktör düğüm, düğümlerin enerji seviyesi, gecikme değişimi ve her yolun alış oranını analiz eden bir algoritma çalıştırarak trafiğin her tipi için yollar üretir. Aktörler kendi alt ağlarındaki kablosuz algılayıcı düğümlere üretilen yol bilgilerini gönderir. Kablosuz algılayıcı düğümler kendi yönlendirme tablolarını oluşturur.

Aşama 4: Kablosuz algılayıcı düğümler topladıkları veriyi önceliğine uygun yolları kullanarak aktörlere gönderir. Düşük gecikme gereksinimi olan yüksek öncelikli veri

paketleri için en hızlı yollar, yüksek güvenilir teslim gereksinimi olan orta öncelikli veri paketleri için daha güvenilir yollar ve özel gereksinimi olmayan düşük öncelikli veri paketleri için düşük enerjili yollar kullanılır.

İki kablosuz algılayıcı düğüm arasında enerji seviyesi, alma oranı ve gecikme değişimi bilgileri bir duyuru paketi içerisinde karşılıklı değiştirilir. Aktörler alınan paketteki ek bilgileri kullanarak komşuluk matrisini günceller ve alıcıya veri paketini aktarır [3].

Yollardan biri ihtiyacı karşılayamaz duruma geldiğinde aktör düğüm komşuluk matrisini günceller ve üçüncü aşamanın ikinci parçası çalıştırılarak yeni yollar oluşturulur [3].

4.4. MDML Protokolü

MDML (Minimum Delay Maximum Lifetime) protokolü uygulama sahasına tek tip olarak rastgele dağıtılmış coğrafik konumunun farkında olan hareketsiz çok sayıda kablosuz algılayıcı düğüm ve birkaç alıcı düğümden oluşan bir ağ düşünülerek tasarlanmıştır. Bu ağda tüm kablosuz algılayıcı düğümlerin başlangıç enerjisi eşittir ve alıcı düğümler sonsuz enerjiye sahiptir. Düğümler iletişim yokken enerji tüketmez ve veri paketlerini herhangi bir alıcıya teslim edebilirler [4].

Her kablosuz algılayıcı düğüm ürettiği ve aldığı veri paketlerini iki farklı öncelik seviyesine göre kuyruğuna gönderir. Yüksek öncelikli kuyruktaki veri paketleri bitmeden düşük öncelikli kuyruktaki veri paketleri gönderilmez. Bir düğüm yüksek öncelikli bir veri paketi ilettiğinde karşılığında ACK paketi alır. Kabul paketi alamadığında veri paketini tüm komşularına yeniden yayın yapar. Bu durum ağda fazladan trafiğe neden olmasına rağmen yüksek öncelikli veri paketi kaybını önler [4].

Yüksek öncelikli veriyi teslim etmede ana hedef, minimum gecikmeyi sağlayan ve güvenilirliği yüksek bir yol bulmaktır. Güvenilirlik, ölü düğümlerin yol açtığı

boşluklardan kaçınma, bağlantı kayıplarını azaltma ve fazladan yollar kullanmayla artırılabilir [4].

Yolların seçilmesi için, yol maliyeti Denklem 4.3’de verildiği gibi atlama sayısı, bağlantı kalitesi ve kalan enerji ile bağlantılı olarak hesaplanır. Yüksek hata oranı nedeniyle yeniden iletimler yol gecikmesini artırır. Bağlantı kalitesi için bir ölçü olarak “beklenen iletim sayısı” (Expected Transmission Count - ETX) değeri kullanılır. ETX her bağlantıdaki yeniden iletim sayısını tahmin eder. Yeniden iletim yokken atlama sayısına eşittir [4].

$$\text{Yol maliyeti} = f(\text{atlama sayısı, bağlantı kalitesi, kalan enerji}) \quad (4.3)$$

Yollar periyodik olarak güncellenir. Yolun yaşama süresi yol üzerindeki bir düğümün minimum yaşamını hesaplayarak ölçülür. Yol üzerindeki tek bir düğümün ölümü yolu kullanılamaz duruma getirir [4].

Düğümün beklenen yaşam süresi düğümün kalan enerjisi ile doğru orantılı, alma ve gönderme için tükettiği enerjinin toplamı ile ters orantılıdır. Düğümün kalan enerjisinin fonksiyon değeri beklenen yaşam süresi belirlenen eşik değerinden büyükse 1 değilse sonsuz olarak alınır [4].

İki düğüm arasındaki toplam yol maliyeti Denklem 4.4’de verildiği gibi iki düğüm arasındaki ETX değeri ile düğümün kalan enerjisinin fonksiyon değeri kullanılarak hesaplanır [4].

$$\text{Yol Maliyeti}_{ij} = \sum (\text{ETX}_{ij} * f(E_r)) \quad (4.4)$$

Protokol ağ yaşam süresini maksimize etmek için her düğümün yaşam süresini artırmayı amaçlar. Düşük öncelikli veri paketleri ağ yaşam süresini maksimize eden enerji etkin yollardan gönderilir [4].

Her kablosuz algılayıcı düğüm her iki veri önceliği için ayrı olarak sonraki atlama ve hedefe ulaşma maliyetini tutan basit bir yönlendirme tablosu tutar. Alıcı periyodik

olarak “alıcı duyuru paketi – ADP” yayınlar. Bu yayınlanan paket iletici düğümün kalan enerjisi, her iki veri önceliği için ayrı olarak toplanmış yol maliyeti, zaman pulu veya sıra numarası gibi bilgileri içerir. Bu bilgiler kullanılarak yönlendirme tablo girişi tazelenir ve ADP paketinin gereksiz olarak çoğaltılması önlenir [4].

Bir düğüm bir ADP paketi aldığı anda, paketteki bilgilere dayalı veri önceliklerine göre ayrı olarak yeni yol maliyeti hesaplar ve yeni maliyetin yönlendirme tablosundaki eski maliyetten düşük olması durumunda tabloyu günceller. Yönlendirme tablosunu güncelleyen düğüm, komşularına durumunu bildiren bir ADP paketi yayınlar [4].

4.5. RRR Protokolü

RRR (Random Re-Routing) protokolünde her düğüm i_1 - i_H komşu düğümlerini alıcıya atlama sayısı yakınlığına göre derecelendirir. i_1 , en yakın; i_H , en uzaktır. Trafik yükü eşik değerinden küçükse tüm paketler aynı tercihli yollardan gönderilir, trafik yükü eşik değerinden yüksekse yüksek öncelikli veri paketleri i_1 - i_K komşulara aktarılırken düşük öncelikli veri paketleri geriye kalan i_{K+1} - i_H komşularına aktarılır [5].

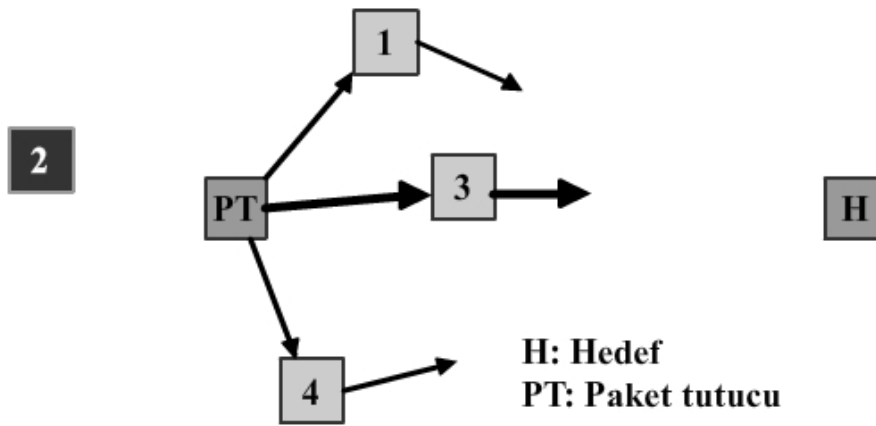
Yol keşif aşamasında, her düğüm alıcıya minimum atlama sayısı ve ebeveyn düğümünün adresini içeren yol keşif işaret mesajı yayınlar. İşaret mesajını alan her düğüm kendi atlama sayısı ile alınan atlama sayısını karşılaştırır. Eğer yeni atlama sayısı daha küçükse o zaman düğüm işaret göndericiye ebeveynini değiştirir ve atlama sayısını günceller. Her düğüm, atlama sayısına dayalı komşuluk tablosu tutar ve işaret mesajları kullanarak artan düzende döngüsel olarak komşuluk tablosunu günceller [5].

4.6. Revize Edilmiş RRR Protokolü

Revize edilmiş RRR protokolü, düğümlerin komşularının mutlak veya görece koordinatlarını bildiği varsayılarak tasarlanmıştır. Böylece düğümler iki boyutlu planda komşuları ile aralarındaki açığı hesaplayabilir [6].

Her düğüm, alıcıya yakınlıklarına göre komşularını sıraladığı komşuluk tablosu tutar. Komşular Şekil 4.3’de gösterildiği gibi üç gruba ayrılır [6]:

1. En iyi komşular: Alıcıya en yakın komşular (düğüm 3)
2. Pozitif komşular: Mevcut düğümden alıcıya daha yakın komşular (düğüm 1 ve 4)
3. Negatif komşular: Mevcut düğümden alıcıya daha uzak komşular (düğüm 2)



Şekil 4.3. RRR ile paket aktarma [6]

Bütün yüksek öncelikli veri paketleri en iyi komşuya aktarılır ve düşük öncelikli veri paketleri eşit olarak pozitif komşular arasında bölünür [6].

Alıcı ile düğümler arasında en kısa yolu bulmada algılayıcıların coğrafik konumlarını kullanan “minimum maliyet aktarma algoritması” (Minimum Cost Forwarding Algorithm - MCFA) kullanılır. Düğümler periyodik olarak orijin düğümün maliyet ve (x,y) koordinatlarını içeren işaret paketi yayınlar. Sahası içindeki komşu düğümler bu işareti alır ve komşuluk listesini oluşturmada kullanır. Bu listeden en küçük maliyetli komşu ebeveyn seçilir. Düğümler ebeveynleri ile kendileri arasındaki mesafe maliyeti ile ebeveynlerinin maliyetini toplayarak kendi maliyetlerini belirler. Veri alıcıların hepsi sıfır maliyet yayınlar, sonrasında kurulum aşaması boyunca alıcılar dışarı doğru en uygun yönlendirme bilgisini yayar. Ağın çalışması süresince

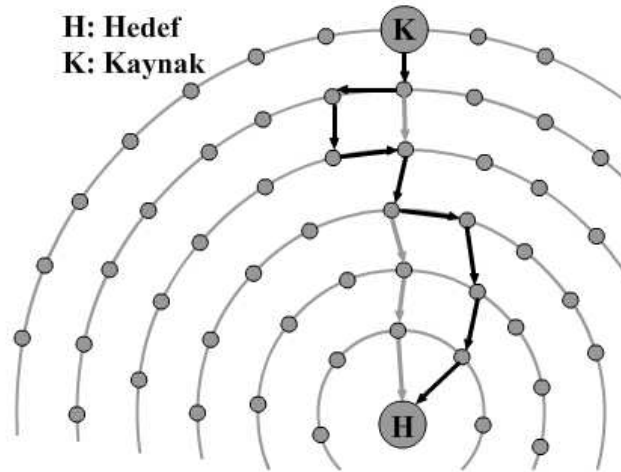
gönderilen işaretler protokolün düğüm hareketleri ve hatalarına karşı esnek çalışmasını sağlar [6].

Düğüm her komşunun maliyet ve koordinatlarını saklar. Ayrıca her bir komşunun en son duyduğu altı paketin öncelik ve zaman listesini saklar [6].

Nihai hedef düğümün merkezde olduğu ve kaynak / aktaran düğümler tarafından halkalar şeklinde çevrildiği bir kablosuz algılayıcı ağ düşünüldüğünde kaynak düğümden aktarılacak veri paketleri üç olası seçeneğe sahiptir [6]:

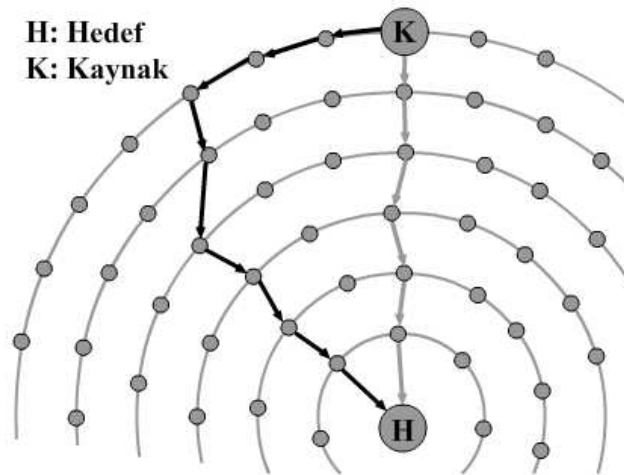
- Hedefe bir atlama daha yakına hareket,
- Hedeften sabit uzaklıkta kalma ve
- Hedeften bir atlama daha uzağa hareket.

Üçüncü seçenek göz ardı edilir ve kullanılmaz. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de en iyi yollar açık gri ile gösterilmektedir [6].



Şekil 4.4. RRR protokolü saptırmasız yönlendirme [6]

Şekil 4.5 düşük öncelikli veri paketinin önce üç düğüm saptırıldığı ve sonra durağanlık verilerek hedefe toplamda dokuz düğüm üzerinden ulaştığını göstermektedir. Yüksek öncelikli veri paketi altı kerededir aktarılır [6]



Şekil 4.5. RRR protokolü saptırma ve durağanlık ile yönlendirme [6]

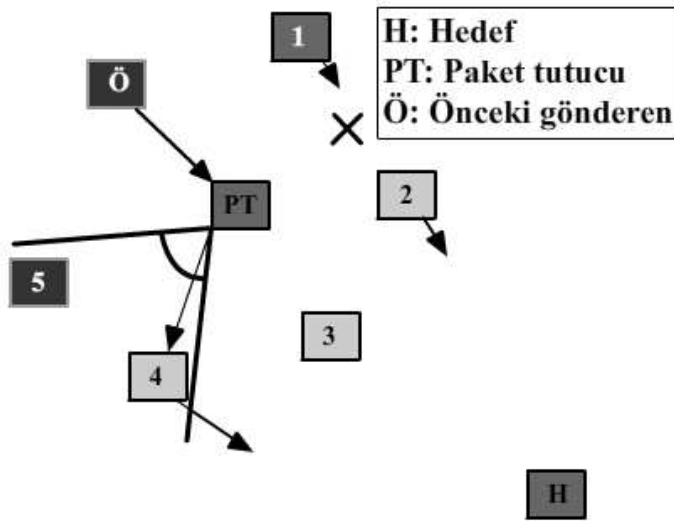
Protokol performansı artırmak için paket saptırma ve durağanlık mekanizmalarını kullanır [6].

Saptırma: Düğümler komşularının iletimlerini dinleyerek onların öncelikli veri paketi gönderme ve aktarma oranlarını izler. Bir düğüm bu orana dayalı olarak saptırma sürecini başlatıp başlatmayacağını belirler. Saptırma sürecinde düğümler yüksek öncelikli veri paketlerinin aktarıldığı komşularının koordinatlarını ortalar ve o noktaya ters yönde düşük öncelikli veri paketlerini aktarmayı denerler [6].

Her düğüm, düşük öncelikli paketlerini yalnız üç şartı karşılayan komşularından birine rastgele gönderir (Şekil 4.6) [6]:

- Kendisine göre hedefe daha yakın olan,
- Belirli bir oranın üstünde yüksek öncelikli paket göndermeyen ve
- Yüksek öncelikli trafik aktaran komşularının ortalama konumu yönüne karşı açı sahası içinde olduğu komşu düğümlere.

Düğüm, bu üç şartı sağlayan hiç komşusu yoksa iletim gücünü artırarak açılal sahasını bir veya daha fazla adım artırır [6].



Şekil 4.6. Geliştirilmiş RRR protokolünde paket aktarma [6]

Durağanlık: Saptırma mekanizmasıyla düşük öncelikli veri paketi yüksek öncelikli trafik sahasının dışında kalır ancak yeniden yönlendirilir ve paket yeni en iyi yolu izlemeye başlar. Tipik olarak düşük öncelikli veri paketi yüksek öncelikli trafiğe doğru geri dönme etkisine sahiptir. Düşük öncelikli trafik ile yüksek öncelikli trafik arasında radyo devrelerinin taşıyıcı algılama sahasından daha büyük bir mesafe saptırma verilir. Daha sonra düşük öncelikli paketlere bir miktar durağanlık verilerek yüksek öncelikli trafik sahasının dışında aynı yönde devam ettirilir [6].

4.7. PDAR Protokolü

PDAR (Priority Based Dynamic Adaptive Routing) protokolü, yol keşfi, yol sürdürme ve tıkanıklıktan kaçınma aşamalarından oluşur. Tıkanıklıktan kaçınma MAC, ağ ve ulaşım katmanlarının ortak çalışmasıyla başarılı [7].

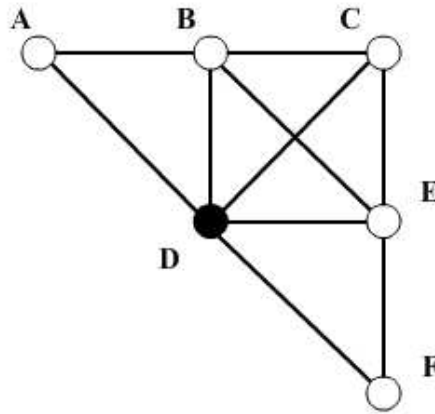
Bir düğüm veri aktarmak istediğinde yönlendirme tablosunda nihai hedefe ulaşan bir yolun olup olmadığını belirler. Süresi dolmamış bir yola sahipse veri paketi bu yol üzerinden gönderilir. Aksi durumda yol istek paketi yayınlayarak yol keşfi başlatır. Düğümler, ortamdaki kendilerine ulaşan her paketdeki bilgiyi tarayarak komşuları hakkında aktif bilgi edindiğinden komşuluk bilgisi toplamak için gereken ek yükü azaltır [7].

Bir düğüm, kuyruk doluluğu belirlenen eşiğin üstüne çıktığında tıkanık olduğuna dair; altına indiğinde tıkanıklığın çözüldüğüne dair komşu düğümlerine tıkanıklık bilgi paketi yayın yapar [7].

Protokol yüksek ve düşük öncelikli olmak üzere iki ayrı veri kuyruğu kullanır. Yüksek öncelikli veri kuyruğundaki paketler gönderilene veya düşürülene kadar düşük öncelikli veri kuyruğundaki paketler bekletilir [7].

Komşu düğümler meşgul düğüme düşük öncelikli bir veri paketi gönderecek ya da aktaracaksa geçici olarak yedek yolu seçer. Yüksek öncelikli veri paketi her zaman “en kısa yol” boyunca gönderilir [7].

Şekil 4.7’de tıkanık düğüm siyah dolgulu olarak gösterilmektedir. Yüksek öncelikli veri paketleri tıkanık düğümler üzerinden gönderilir. Düşük öncelikli veri paketleri tıkanık düğümün yükünü azaltmak amacıyla tıkanık olmayan diğer düğümlerden gönderilir. Ancak bu durum düşük öncelikli veri paketlerinin gecikmesini artırır. Ağdaki diğer boş düğümlerin kullanılması tıkanık düğüm sayısını azaltırken ağ yaşam süresini uzatır ve daha iyi yük dengeleme gerçekleştirir [7].



	1	2	3	4
R1*	A→B	A→B→C	A→B→C→D	A→B→C→D→F
R2		A→B→C	A→B→C→E	A→B→C→E→F
R3*		A→B→D	A→B→D→F	
R4		A→B→E	A→B→E→F	
R5*	A→D	A→D→F		

Şekil 4.7. PDAR protokolü yönlendirme tablosu oluşturma [7]

4.8. PISA Protokolü

PISA protokolü kablosuz algılayıcı ağlarda solar - hücre enerji modeline dayalı coğrafik bir yönlendirme düzenidir [54]. Solar - güç üniteli her bir düğüm enerji bütçesine dayalı yerel ve periyodik olarak maliyet belirler. Enerji bütçesi mevcut enerjisi, tahmini enerji tüketimi ve solar hücreden beklenen enerjisi içerir [8].

Potansiyel ilerleme değerlerine göre yollar yüksekte başlayarak sırasıyla en iyi, ikinci ve üçüncü yol olarak sınıflandırılır. Kaynak düğümünden hedef alıcıya yönlendirilmesi gereken paketlerin toplam veri hacmi üçe bölünür ve sırasıyla yukarıdaki seçili yollar boyunca dağıtılır [8].

PISA her öncelik seviyesine göre servis kalitesi hedefini karşılamak için aşağıdaki üç farklı algorithmadan uygun olanını seçer [54, 8]:

PISA-I: Uçtan uca minimum gecikme gerektiren yüksek öncelikli veri paketi aktarılacağı zaman kullanılır. Yönlendirme sürecinde her düğüm komşularına ilerleme değerini ve komşularının da komşularına maksimum potansiyel ilerleme değerini kullanarak maliyet hesabı yapar. Bir düğüm alıcı yönünde hiç komşu düğüme sahip değilse boşluk problemi oluşur. Bu probleminden kaçınmak amacıyla gönderici düğüm potansiyel ilerleme değeri ile birlikte kendisine veri aktarılmamasını belirten mesajı komşularına yayın yapar [8].

PISA-II: Enerji etkin yoldan düşük öncelikli veri yönlendirerek ağın sürdürülebilirliği maksimize edilir [8].

PISA-III: En kısa uçtan uca gecikmeye ek olarak iletimde fazladan güvenilirlik gerektiren en yüksek öncelikli kritik veriyle ilgilenir. PISA-I algoritmasına çoklu yol kullanım özelliği eklenerek güvenilirlik artırılır. Paket en az maliyetli üç düğüme gönderilir. Kaçınılmaz olarak ağ kaynaklarına ek maliyet gelir [8].

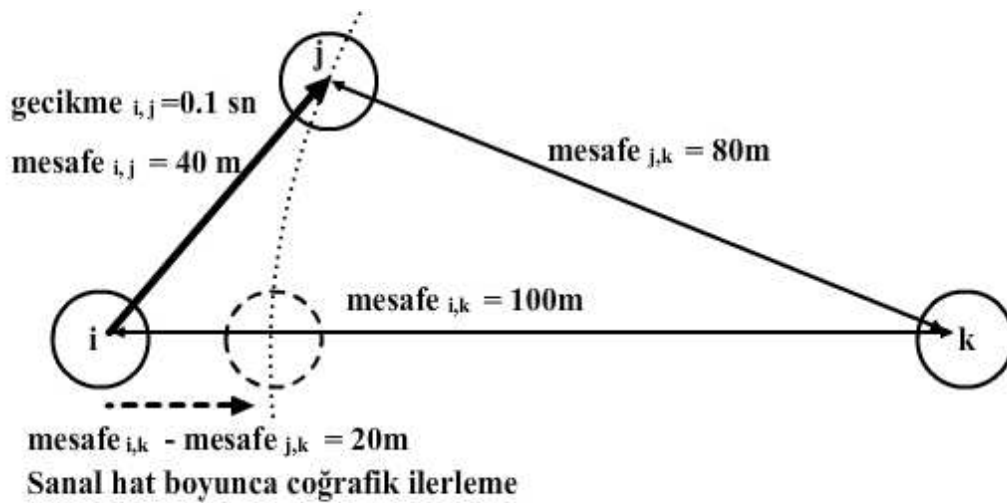
PISA protokolü coğrafik yönlendirme çeşidi olduğundan, hareketli alıcıya veri gönderebilir. Protokol yalnız komşuluk bilgisi kullandığından minimum bellek gereksinimine ve oldukça yüksek ölçeklenebilirliğe sahiptir [8].

4.9. MMSPEED protokolü

Veri paketlerinin güvenilir ve zamanlı aktarılması için farklılaştırılmış servis kalitesi sağlamaya çalışan protokolde veri paketleri öncelikli yol oluşturulmadan yerel olarak verilen yönlendirme kararı ile yönlendirilir.

Konum tabanlı coğrafik yönlendirme mekanizması kullanan protokolde düğümler konumlarının farkındadır ve periyodik olarak konum bilgilerini komşularına bildirirler.

Şekil 4.8 veri paketinin i düğümünden j düğümüne aktarılması durumunda 40 metrelik yol almasına rağmen hedefe doğru sağlayacağı ilerlemenin 20 metre olduğunu göstermektedir. Bu iki düğüm arasındaki gecikmenin 0.1 saniye varsayıldığı durumda veri paketi hedefe doğru $20 \text{ metre} / 0.1 \text{ saniye} = 200 \text{ metre} / \text{saniye}$ hız ile gönderilmiş olur.



Şekil 4.8. Hedef düğüme doğru i düğümünden j düğümüne ilerleme hızı

Düğüm, tüm komşularının hedefe doğru ilerleme hızı bilgisini tablo olarak saklar. Her düğüm veri paketini ilerleme hızı belirlenen hız değerinden daha yüksek olan komşusuna aktarır. Düğüm, istenen hızı sağlayan herhangi bir komşusu olmadığında veri paketini olasılık hesabı yaparak düşürür. Paket düşürme süreci devam eden düğümler, komşu düğümlerden gelen trafiği azaltmak amacıyla geri bildirim paketleri göndererek boş alan problemini çözmeye çalışır.

Her düğüm farklı hız ihtiyacı olan veri paketleri için ayrı bir kuyruk kullanır. Veri paketleri kuyruktan ilk giren ilk çıkar prensibine göre gönderilir. En yüksek hız gerektiren veri paketlerinin olduğu kuyruk boşalmadıkça bir alt kuyruktan veri paketi gönderilmez.

Kaynak düğüm ürettiği veri paketleri için nihai hedef alıcıya olan uzaklığına ve uçtan uca gecikme ihtiyacına dayalı en uygun hızı Denklem 4.5’de verildiği gibi hesaplar:

$$\text{İstenilen hız} = \text{hedef alıcıya mesafe} / \text{uçtan uca gecikme ihtiyacı} \quad (4.5)$$

Veri paketinin son biti MAC katmanına vardığında paketin varış zamanı etiketlenir. Veri paketinin düğümünden ayrıldığı zamandan varış zamanı çıkartıldığında elde edilen değere iletim gecikmesi eklenerek geçen zaman hesaplanır. Eski yaşam süresi değerinden paketin düğümde geçirdiği zaman çıkartılarak kalan yaşam süresi hesaplanır. Yayılım gecikmesi çok düşük olduğundan yok sayılır. Veri paketinin yeni hız gereksinimi, düğümün hedefe olan mesafesinin kalan yaşam süresine bölümü ile hesaplanır. Veri paketinin hız gereksiniminin her düğümde yeniden hesaplanması daha önceki atlamalarda meydana gelen olası gecikmeleri dengelemek için kullanılır.

Düğüm komşuluk tablolarındaki her komşusu için düşürülen tüm paketlerin dâhil edildiği paket kayıp oranı ortalamasını ve düğüm güvenilirlik olasılığını saklar.

Güvenilirlik olasılığı (GO) paketin daha sonra aktarılacağı düğümlerin mesafe aralığı ve paket kayıp oranları paketin şu an aktarılacağı düğüm ile aynı değerlerde varsayılarak Denklem 4.6’da verildiği gibi hesaplanır:

$$GO_{i,j}^d = (1 - e_{i,j})^{[\text{mesafe}_{j,h} / \text{mesafe}_{i,j}]} \quad (4.6)$$

Uçtan uca ulaşılabilirlik olasılığı (TGO) başlangıçta sifıra eşitlenir.

Herhangi bir yolun hedef alıcıya paketi teslim edememe olasılığı (1-TGO) ile ifade edilirken j düğümü üzerinden ek bir yol ile paketin hedefe ulaştırılmama olasılığı (1-GO^d_{i,j}) ile ifade edilir.

Hedef alıcıya paketi başarılı teslim edecek en az bir yol olma olasılığı Denklem 4.7’de verildiği gibi hesaplanır. Bu hesaplama kullanılarak istenilen güvenilirlik değeri elde edilinceye kadar paketi aktaracak daha fazla komşu düğüm sürece dâhil edilir.

$$TGO = 1 - (1 - TGO) (1 - GO^d_{i,j}) \quad (4.7)$$

Kaynak düğüm veri paketinin içeriğine dayalı olarak uygun uçtan uca ulaşma zamanı ve istenilen ulaşılabilirlik olasılığını seçer. MMSPEED ilk olarak uçtan uca gecikme ve coğrafik mesafeye dayalı hızı belirler. Sonrasında istenilen ulaşılabilirlik olasılığını elde etmek için bu hızdan daha yüksek ilerlemeye sahip düğümler arasından çoklu aktarma düğümlerini belirler. Gönderilecek veri paketinin birer kopyası bu çoklu aktarma düğümlerine yayın yoluyla gönderilir. Kopyalar ağın farklı bölgelerine yönlendirilerek nihai hedefe ulaşma olasılığı yükseltilir.

Paket gönderimlerde ortam erişimi hakkını elde ederken IEEE 802.11e standardındaki gibi MAC katmanında verilerin önceliğine göre geri çekilme aralığını belirleyerek öncelikli verilere avantaj sağlar.

Bir düğüm komşusuna paket göndermeye karar verdiğinde pakete t_1 zaman pulunu ve paket başarılı gönderilip komşu düğümden ACK alındığında t_2 zaman pulunu ekler. Eklenen zaman pulları kullanılarak iki düğüm arası paket gecikmesi Denklem 4.8’de verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Gecikme} = t_2 - t_1 - \text{SIFS} - \text{ACK} \quad (4.8)$$

İlk gönderme isteği ile başarılı gönderim arasındaki zaman farkı gecikme olarak hesaplanır. Gecikme değerinden veri paketi ile ACK arasındaki SIFS bekleme aralığı ve ACK paketinin iletim gecikmesi çıkarılır. Elde edilen gecikme değeri üssel hareketli ortalama olarak kaydedilir.

Düğüm paket gönderme isteğini belirten RTS paketi yayınlar. Coğrafik konumuna bağlı olarak alıcı komşu düğümler CTS cevap paketi gönderir. Paket tutucu ilk CTS

paketini dikkate alır ve veri paketini gönderir. Verinin başarılı bir şekilde alındığını belirten ACK paketini gönderme hakkına yalnızca ilk CTS paketini gönderen düğüm sahiptir. Paket tutucu belirlediği zaman aşımı değeri doluncaya kadar paketi iletmeyi dener ancak başarılı olamazsa paketi düşürür.

4.10. Mevcut Protokollerin Karşılaştırılması ve Yetersizlikleri

Geliştirilen her protokolün kendinden önceki protokollerin eksikliklerini gidermesi ve daha üstün vasıflara sahip olması gerekmektedir. Gelişim ve ilerleme ancak bu şekilde gerçekleştirilebilir. Bu anlamda literatürde incelenen protokollerin karşılaştırılması için bir takım ölçütler belirlenmiş ve bu ölçütlere göre karşılaştırma sonuçları açıklamalarıyla birlikte verilmiştir.

4.10.1. Karşılaştırma ölçütleri

Bir yönlendirme protokolünün performansını ve becerilerini etkileyen önemli ölçütler aşağıdaki gibidir [55, 56, 57]:

Ölçeklenebilirlik: Bir yönlendirme protokolü çok büyük sayılarda algılayıcı ile çalışabilmelidir. Düğüm sayısı arttıkça protokolün çalışması sağlıklı bir şekilde devam edebiliyorsa ölçeklenebilirlik yüksek (Y) aksi durumda sınırlı (S) kabul edilir.

Güvenilirlik (hata toleransı): Algılayıcı düğümlerin hataları nedeniyle ağır fonksiyonlarını bozulmaksızın sürdürülebilmesi ve tüm görevlerin etkilenmemesidir.

Enerji etkinliği: Enerjinin çoğunun etkin veri tesliminde harcanması gerekmektedir. Protokol enerji korunumu gereği düğümlerin uyutulmasına uygun olmalı, çevresel nedenlerden ötürü düğüme geçici ulaşılamaması durumunda yol bilgisini daha düşük maliyetle güncelleyebilmelidir.

Yönlendirme tablosu kullanımı: Çoğu yönlendirme protokolü sonraki atlama düğümünü seçme sürecinde oluşturduğu yönlendirme tablosunu kullanır. Ancak yönlendirme tablosu kullanmanın bazı dezavantajları bulunur:

- Ağ büyüdüğünde yönlendirme tablolarını oluşturmak ve güncellemek daha çok kaynak tüketir.
- Tabloda kurulu yol uzadıkça ara düğümlerden birinin fire verme olasılığı artar ve bütün yol heba olabilir.
- Kurulu yolların iyileştirilmesi ya da yenilenmesi için daha sık güncellenmesi ek yükü artıracaktır.

Topoloji değişimine uyum: Topoloji bilgisine göre yönlendirme kararı veren protokollerde topoloji değişimine uyumu artırmak ve yönlendirme kararlarının doğru verilmesini sağlamak için topoloji bilgisinin sık güncellenmesi gerekir. Aksi durumda yönlendirme kararları yanlış verilir.

Ek trafik yükü: Bant genişliği kısıtlı olan kablosuz algılayıcı ağlarda veri trafiği dışında üretilen trafik yükünün azaltılmasını gerektirir. Gereksiz paket çoğaltılması, düğümlerin komşularını düzenli ya da düzensiz aralıklarla bilgilendirmesi, yönlendirme tablolarının düzenleme ve takas sıklığının artırılması gibi durumlar ek trafik yükünü artırır. Ek yükün artması nihai hedefe ulaşan veri paketi sayısını azaltır, ortalama paket gecikmelerini artırır ve enerji sınırlı ağın yaşam ömrünü azaltır.

Yük dengeleme: Bir yönlendirme protokolünde düğüm ölümlerinin azaltılması ve ağ ömrünün uzatılması en önemli etkenlerdendir. Bu anlamda alınabilecek tedbirlerden birisi düğümler arasında trafik yükünü dengelemektir.

Bellek kullanımı: Düğümler yönlendirme kararı verme sürecinde kullanmak üzere yönlendirme tablosu, komşuluk tablosu ya da kendine ait parametrelerle ilgili bir tablo üretir ve bellekte saklar. Kablosuz algılayıcı ağlar bellek kısıtlı düğümlerden oluştuğu için belleğin verimli kullanılması gerekmektedir. Belleği en yoğun yönlendirme tabloları kullanır. Yönlendirme tablosundaki bilgi çeşitliliği arttıkça, güncelleme ve sıralama işlemleri gerektikçe bellek kullanımı daha da artar. Sadece komşuluk tablosu tutan protokoller belleği orta seviyede kullanırken sadece

kendisine ait parametreleri saklamada kullanan protokoller en düşük seviyede kullanırlar.

İşlem yükü sonraki atlama düğümü belirleme süreçlerinden dolayı artabilir. Belirleme sürecindeki karşılaştırma işlemlerinin çokluğu, yönlendirme tablosundaki verilerin güncellenmesi, yönlendirme tablosundaki verilerin sıralanması ve yönlendirme tablosunda kullanılan parametrelerin hesaplanmasındaki karışıklık gibi nedenler işlem yükünü artırır.

Teslim metodu: Veri paketleri nihai hedefe doğru tek yol boyunca mesajın tek örneği (tek / tek), birden fazla yol üzerinden mesajın tek bir örneği (çoklu / tek), birden fazla yol üzerinden mesajın birden çok kopyası (çoklu / çoklu) olarak teslim edilebilir. Bir veri paketinin nihai hedefe daha güvenilir iletilebilmesi amacıyla çok yol üzerinden çoklu kopya olarak gönderilmesi ağ üzerinde ciddi bir trafik yükü oluşturur.

Hesaplama: Merkezi ya da bağımsız olarak ikiye ayrılır. Merkezi hesaplama en uygun çözüm olmasına rağmen ağ iletişim yükünü artırır ve yalnızca sabit ağ topolojisine sahip küçük alanlı ağlarda verimlidir.

Öncelik tabanlı yönlendirme protokolleri öncelikli veri paketlerine daha düşük gecikme ve paket kayıp oranı gibi hizmetler sunabilmek için düşük öncelikli veri paketlerini göz ardı etmemelidir. Uygulamaların çoğunda kullanıcı her öncelik seviyesinden veriye ihtiyaç duyar. Aksi durumda hatalı kararlar alabilir.

4.10.2. Konu ile ilgili incelenen çalışmaların eksiklikleri

Bir önceki bölümde belirtilen ölçütler dikkate alınarak parametrelerin sınırlı (S), düşük (D), yüksek (Y), orta (O), evet (E), hayır (H), çoklu (Ç), tekli (T) harfleri kullanılarak değerlendirildiği karşılaştırma tablosu Tablo 4.1 hazırlanmıştır.

Konu ile ilgili incelenen çalışmaların tümünde güvenilirlik ölçütü dikkate alınır ve hesaplama işlemleri bağımsız olarak düğümlerde gerçekleştirilir. PISA, revize

edilmiş RRR ve MMSPEED protokolleri yüksek ölçeklenebilirliğe sahipken yüksek enerji etkinliğine sadece PBBR protokolü sahiptir.

PISA, revize edilmiş RRR ve MMSPEED protokolleri ile Tablo 4.1’de incelenen diğer protokollere göre daha düşük bellek kapasitesi ve daha az işlem yükü gerektirmesinin yanında topoloji değişimine daha yüksek uyumluluk gösterir.

Yönlendirme tablosu yerine komşuluk tablosu kullanan RRR, revize edilmiş RRR, PISA ve MMSPEED protokollerinde daha düşük bellek kullanımı ve ek trafik yükü gerçekleşir.

Tablo 4.1. Öncelik tabanlı protokollerin karşılaştırılması

	PRIMAR	CAR	QBRP	MDML	RRR	Revize RRR	PDAR	PISA	MMSPEED
Ölçeklenebilirlik	S	S	S	S	S	Y	S	Y	Y
Güvenilirlik	Y	Y	Y	Y	O	O	D	Y	Y
Enerji Etkinliği	S	S	S	S	O	S	S	O	D
Yönlendirme Tablosu Kullanımı	E	E	E	E	H	H	E	H	H
Topoloji Değişimine Uyum	D	D	D	D	D	O	D	O	O
Ek Trafik Yükü	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	O
Yük Dengeleme	D	Y	D	D	D	Y	Y	Y	Y
Bellek Kullanımı	Y	Y	Y	Y	Y	O	Y	O	O
İşlem Yükü	Y	Y	Y	Y	Y	D	Y	Y	Y
Teslim Metodu: Yol	Ç	T	Ç	Ç	T	T	T	Ç	Ç
Mesaj Kopyası	Ç	T	T	Ç	T	T	T	T	Ç
Hesaplama M (Merkezi)	B	B	B	B	B	B	B	B	B
B (Bağımsız)									
Düşük Öncelikli Verilere Hizmet	O	D	O	O	O	D	O	D	O

PRIMAR protokolünde bir düğümün yönlendirme tablosundaki tek bir değişim diğer düğümlerin yönlendirme tablolarında sıralı değişime neden olduğundan ek trafik yükü oluşturur. Düğümlerin yol kalitelerini gecikmeli olarak trafik azaldığında takaslaması kalitesiz yolların kullanımına devam edilmesi ve gecikmelerin artmasına neden olur. Protokolde gerek mevcut yolda sorun olduğunda gerekse güvenilirliğin artırılması kaygısıyla paket düğüm tarafından yayın yapılır ve birkaç kopya olarak

farklı düğümler üzerinden aktarılır. Aynı paketin çoklu kopyasını alan bir düğüm yalnız ilk aldığı kopyayı aktarıp diğerlerini düşürmeye çalışır.

CAR protokolü alıcıdan tüm ağa doğru periyodik olarak “ağ yapılandırma” mesajı yayınlamakla düğümlerin bozukluk, eklenme ve hareketliliğinden kaynaklı topoloji değişimlerine uyabilmek için ağ üzerinde ek trafik yükü oluşturur. CAR protokolünde dinamik olarak “tıkanık alan keşif” ya da “tıkanık alan yıkımı” mesajı aktararak düğümlerin tıkanık alanda ya da dışında şeklinde kendilerini işaretlemesi için ağ üzerinde ek trafik yükü oluşturur. Protokolün CAR++ sürümü herhangi kritik alan düğümünün iletişim sahası içindeki bütün düğümler düşük öncelikli veri üretmesi ve aktarmasını hizmet dışı bırakılarak yüksek öncelikli trafik için düşük öncelikli verilerin bir kısmını tamamen feda eder.

MDML protokolünde, düğümlerin gönderdikleri veri paketi için ACK paketi alamadıklarında veri paketini yayınlaması ve yönlendirme tablosu oluşturması için alıcının periyodik olarak ADP paketi yayınlaması ek trafik yükü oluşturur.

QBRP protokolü yol güncellemelerinin oluşturacağı ek yükü hafifletmek için kümeler oluşturmak için ağ üzerinde ek trafik yükü oluşturur.

RRR protokolünde düğümlerin komşuluk tablolarını periyodik olarak güncellemesi ek trafik yükü oluşturur.

Revize edilmiş RRR protokolü yüksek öncelikli verilere iyi bir servis kalitesi sağlarken düşük öncelikli verilerin yol uzunluğunu artırdığından ağdaki ortalama trafiği artırır. Genişletilmiş RRR protokolünde topoloji değişimlerine uyum göstermek amacıyla düğümlerin komşuluk listelerini periyodik olarak güncellemesi ağ üzerinde ciddi bir ek trafik yükü oluşturur.

PDAR protokolünde kuyruk doluluğu belirli bir eşiği yukarı ya da aşağı yönde her geçtiğinde düğüm meşguliyet durumu hakkında komşularını bilgilendirir. Bu bilgilendirmeler ağ üzerinde ek trafik yükü oluşturur. Kuyruğu dolu olan düğümden sadece öncelikli paketler gönderilerek gecikme ile ilgili avantaj yakalanmak istense

bile aynı radyo yayın ortamını kullanan yakın düğümlerden akan düşük öncelikli trafikten etkilenmemesi mümkün değildir.

PISA protokolünde düğümlerin iki atlamaya kadar pozitif yöndeki komşularının hedefe toplam ilerleme bilgilerini toplamak amacıyla kullandığı kontrol paketleri ağ üzerinde ek trafik yükü oluşturur. PISA-II algoritması tek veri paketini üç düğüme gönderdiğinden ek trafik yükü oluşturur. PISA-I algoritması çalıştıran düğüm potansiyel ilerleme değerine ilave olarak kontrol paketi içerisine paket almaya uygun olmadığını belirten özel bayrak bilgisi ekleyerek boşluk probleminde basit bir çözüm üretir.

MMSPEED protokolünde güvenilirliği artırmak amacıyla veri paketi birden fazla düğüme aktarılarak gönderildiğinden ek trafik yükü oluşturur.

BÖLÜM 5. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ MODELLEME VE BENZETİM ARAÇLARI

5.1. Giriş

Benzetim araçları gerçek dünya davranışlarının seçilmiş kısımlarının taklit edildiği yazılımlardır. Gerçek dünya sisteminin farklı parçalarını modeller ve benzetimini gerçekleştirirler [58].

Bir sistem gerçekleştirilmeden önce maliyeti daha düşük yöntemlerle çalıştırılır. Sistemin çalışması ve yeterlilikleri uygun bulunduğu sistem gerçekleştirilir. İletişim sistemleri karmaşık yapıya sahiptir ve iletişim ortamı başta olmak üzere başarımı etkileyen çok sayıda sebep vardır. İletişim sistemlerinin başarı analizini gerçek bir sistem kurularak elde edildiğinde yüksek maliyet gerektirirken; oluşturulacak sistem modelinin kullanılmasıyla elde edildiğinde düşük maliyet gerektirir [59].

Performans analizi için geleneksel olarak üç teknik kullanılır: analitik teknikler, bilgisayar benzetimi ve fiziksel ölçümler. Kablosuz algılayıcı ağların enerji kısıtlılığı, hata toleransı gibi doğasından kaynaklanan sınırlılıklarından dolayı diğer ağlarda yaygın olarak kullanılan analitik metotlar ile kablosuz algılayıcı ağların performans analizinden istenilen başarı elde edilemez [58].

5.2. Benzetim Aracı

Kablosuz algılayıcı ağlarda donanımsal ve yazılımsal olarak henüz bir standartlaşmanın gerçekleştirilmemesi popüler birçok benzetim yazılımının kablosuz algılayıcı ağlara yönelik hazır model ve protokol desteği bulunmamasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla kablosuz algılayıcı ağlar için geliştirilen protokol, yöntem ya

da algoritmaların modellenmesi ve benzetimlerinin gerçekleştirilmesi oldukça güçtür [59].

Kablosuz algılayıcı ağlar için kullanılabilir 60'ın üzerinde bilinen benzetim aracı bulunmaktadır [58]. Bunların arasında Opnet [60], Omnet++ [61], ns-2 [62], Qualnet [63] ve Glomosim [64] en yaygın olarak kullanılanlarıdır.

Bu çalışmada, Omnet++ yazılımının tercih edilmesinin nedeni; çalışma zamanı ve bellek tüketimi konularında akademisyenler tarafından yaygın olarak kullanılan ns-2'ye göre daha yüksek performanslı olmasıdır. Tablo 5.1'deki benzetim araçlarının özelliklerine bakıldığında yüksek çalışma hızı, esnek ve güçlü grafik arabiriminin olması Omnet++ benzetim aracının seçilmesinde önemli unsurlardandır. Bunlar dışında Omnet++ benzetim yazılımında kablosuz algılayıcı ağlar için pek çok hazır model olması da bu seçimde etken olmuştur.

Tablo 5.1. Yaygın olarak kullanılan benzetim yazılımları ve özellikleri [59]

Özellik	OPNET	QUALNET	NS-2	OMNET++	TOSSIM
Amaç	Genel amaçlı ağ benzeticisi				KAABenzeticisi
Lisans	Ticari	Ticari	Ücretsiz	Ücretsiz	Ücretsiz
Kullanım Kolaylığı	Çok iyi	Çok iyi	Zor	İyi	Çok Zor
Esneklik	İyi	İyi	Orta	Çok İyi	Kötü
Kullanıcı Arabirimi	Güçlü GUI	Güçlü GUI	Yetersiz GUI	Güçlü GUI	Yok
Paralel Çalışabilme	Var	Var	Var (PDNS)	Var	Yok
Ölçeklenebilirlik	Orta	Çok İyi	Orta	İyi	Kötü
Programlama Dili	C++	C++	C++ ve OTcl	C++	NesC
Dokümantasyon	Çok İyi	İyi	İyi	İyi	Orta
Kütüphane	Çok İyi	Çok İyi	İyi	Orta	Orta
Hız	Kötü	Orta	Orta	İyi	Kötü

Omnet++ 4.0/4.1 benzetim yazılımı destekli başlıca hazır modeller şunlardır [61]:

- INET Çerçevesi: Hareketli ve kablosuz benzetimleri destekler. İnternet protokolleri dâhil çok sayıda model içerir.

- xMIPv6: INET çerçevesi için hareketli IPv6 benzetim modeli uzantısıdır.
- ReaSE: INET çerçevesinin bir sürümüdür. Hiyerarşik ağ topolojileri, gerçek araçlara dayalı atak trafik ile ilgili benzetim ortamları oluşturabilir ve bunlarla ilgili kullanıcı grafik arabirim sağlar.
- Oversim: Bindirmeli ağ benzetimleri için geliştirilmiş model topluluğudur. “Noktadan noktaya” (Peer to Peer - P2P) haberleşme tekniklerine yönelik protokolleri desteklemektedir.
- Mixim; hareketli ve hareketsiz kablosuz ağlar için (kablosuz algılayıcı ağlar, vücut alan ağları, ad-hoc ağlar, taşıt ağları vb.) bir model çatısıdır. Protokol yığınının daha alt katmanlarına odaklanır ve detaylı radyo yayılım, girişim tahmini, radyo alıcı güç tüketimi ve kablosuz MAC protokolleri içerir [65].
- Castalia; kablosuz algılayıcı ağları, vücut alan ağları ve düşük güçlü gömülü devre ağları için benzetim yapar. Gerçek kablosuz kanal ve radyo modelleri, özellikle radyo erişimle ilgili gerçek düğüm davranış modelleri hazır olarak gelmektedir. Model yol kayıp, girişim ve RSSI hesabı, fiziksel süreç modeli ve birkaç popüler MAC protokolünü içerir. Geniş parametrik benzetim çalışmalarını kolaylaştırır [66].
- MF (Mobility Framework): Kablosuz ve hareketli ağların benzetimini destekler. Mixim alt yapısına geçilmesiyle ayrı olarak geliştirilmek yerine Mixim bileşeni olarak geliştirilmektedir. İçerdiği modellere örnek olarak; 802.11 modeli, batarya modeli, BMAC, LMAC, radyo gürültü modeli, CC1100 [67] ve CC2420 [68] için radyo güç tüketim modeli ve IEEE 802.15.4 CSMA modeli verilebilir [69].

Hu ve arkadaşları “Büyük ölçekli algılayıcı ağların modelleme ve analizi için bir benzetim” isimli çalışmalarında; Omnet++ MF, NS-2 ve VWSN [70] benzetim programlarını (sırasıyla 100*100m, 2000*2000m ve 5000*5000m) benzetim alanı ve (sırasıyla 500, 2000 ve 3500) düğüm sayıları ile çalışma zamanı bakımından karşılaştırmıştır. Yapılan karşılaştırma, NS-2 benzetim programının 2000 düğümden

fazlasını destekleyemediğini ve Omnet++ MF modelinin NS-2'ye göre işlemleri çok daha kısa sürede tamamladığını göstermektedir. Aynı çalışmada üç benzetim programı 3500 düğüm için hafıza tüketimi bakımından kurulum ve algoritma benzetimi için de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, NS-2'nin Omnet++ MF modeline göre hem kurulum hem de algoritma benzetimi bakımından daha fazla bellek tükettiğini göstermektedir [70].

Xian ve arkadaşları “Kablosuz algılayıcı ağ simülasyonu için Omnet++ ile diğer benzetim programlarının karşılaştırılması” isimli çalışmalarında; temel MAC ve 802.11 MAC için düğümlerin sırasıyla 10 ve 100 sorgu ürettiği şartlar altında NS-2 ve Omnet++ benzetim araçlarını bellek tüketimi ve çalışma zamanı bakımından karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmalar, Omnet++ benzetim aracının NS-2 benzetim aracına göre işlemleri daha kısa sürede ve daha az bellek kullanarak tamamladığını göstermektedir [71].

5.2.1. Omnet++ tümleşik geliştirme ortamı

Omnet++ 4.x “tümleşik geliştirme ortamı” (Integrated Development Environment - IDE), Eclipse [72] platformu üzerine inşa edilmiştir. Eclipse C++ temel hizmetleri sağlarken, Omnet++ modelleri oluşturma ve ayarlama (NED ve ini dosyaları), yığın işlemleri çalıştırma ve benzetim sonuçlarını analiz etme gibi işlevleri yerine getirir.

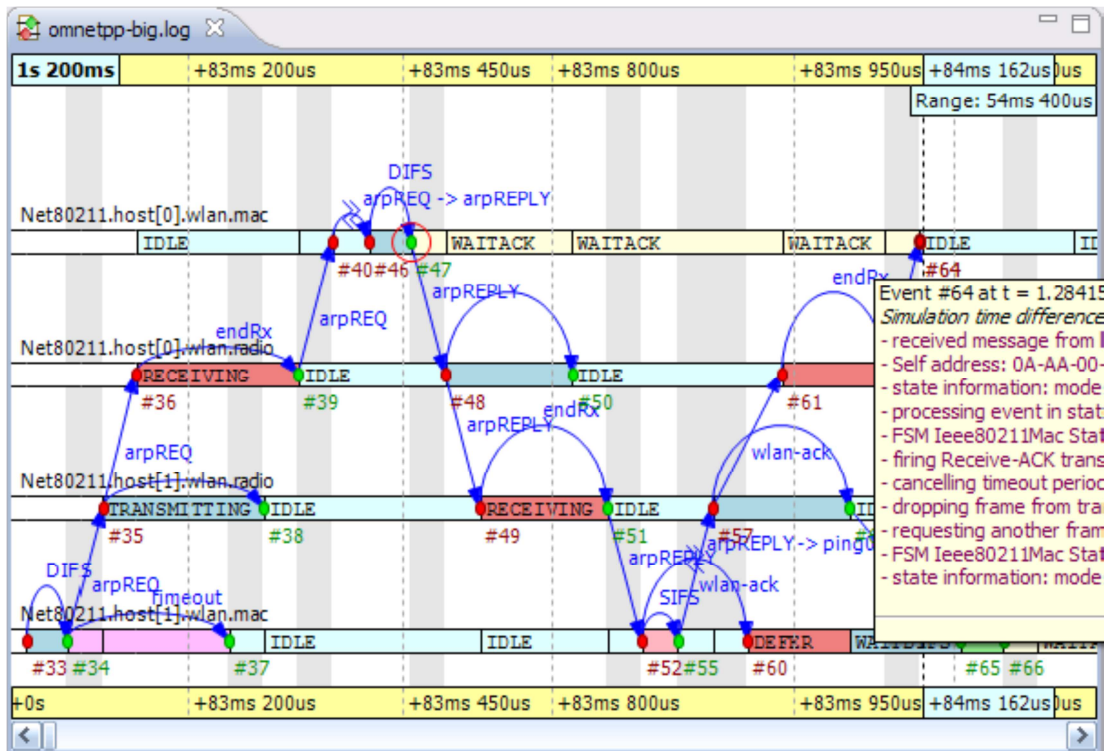
NED editörü kullanılarak hem kod seviyeli ve hem de “grafik arabirimi” (Graphical User Interface - GUI) ile ağ modellerinin oluşturulduğu “NED” dosyaları düzenlenebilir. “GUI” ile birleşik modüller, kanallar ve diğer bileşen tipleri oluşturulabilir.

Benzetimi çalıştırma için kullanıcıya benzetim modellerindeki parametreleri ayarlama imkânı sağlayan bir “ini” editörü kullanılmaktadır. Bu şekliyle çalışma yeniden derlenmeden yeni parametrelerle hızla çalıştırılabilmektedir.

Benzetim hata ayıklama ya da normal çalışma kipi dışında grafik (TkEnv) ya da komut (CmdEnv) kipinde de çalıştırılabilmektedir. Benzetimde çalışmanın

detaylarını gözlemleyebilmek amacıyla grafik arabirim üzerinde benzetim hızı ayarlanabilir. CmdEnv kipi kullanıldığında çalışmanın nasıl gerçekleştiği görsel arabirimin çalışması durdurulmakta ve sadece sonuçlar elde edilmektedir. Böylece oldukça yüksek bir hızla sonuçlara erişilmektedir.

Benzetime ait tüm olaylar harici programlar tarafından da kullanılabilir şekilde metin tabanlı kaydedilebilmektedir. Kaydedilmiş olaylar Şekil 5.1'de gösterilen grafik ekrandan izlenebildiği gibi yazılı ekrandan da izlenebilmektedir. Ayrıca mesaj, zaman, NED vb. unsurlara göre filtreleme yapılabilir ve böylece çalışmanın detayları ve gerçekleşen olaylar daha rahat incelenebilmektedir. Gigabaytlar seviyesinde tutulabilecek bütün bu kayıtlar büyük bir bellek kullanımı gerektirmemektedir.



Şekil 5.1. Sıralı kartlar ile gerçekleşen olaylar arasında gezinme

Görsel benzetim sonuçları vektör ve ölçekli dosyalara kaydedilir. Benzetim sonuçları çok sayıda klasörde ve yüzlerce dosya içerisinde saklanabilir. Tek benzetim ya da benzetim yığınları çalışması sonucu elde edilen çıkışlar sonuç analiz ekranında grafikler haline getirilebilmektedir. Elde edilen çıkışların tümü kullanılarak grafikler

hazırlanabileceği gibi bu verilerden süzülerek ve benzer şekilde deneyler (experiment) – ölçümler (measurement) ya da tekrar (replication) şeklinde gruplanarak grafikler hazırlanabilmektedir. Bir deney aynı modelin farklı parametre ayarları sonucu elde edilen ölçümlerinden oluşur. Her ölçüm farklı rastgele sayı çekirdeği ile birkaç kere tekrarlanabilmektedir. Elde edilen veriler dışarıya dosya olarak aktarılabilen ve harici programlarla çok daha başarılı grafikler elde edilebilmektedir.

5.3. Mixim Modeli

Bu tez çalışmasında kablosuz algılayıcı ağlar için Omnet++ için hazırlanmış Mixim modeli kullanılmaktadır.

Mixim, Omnet++'da kablosuz ve hareketli benzetimler için geliştirilmiş bir benzetim modelidir. Omnet++ güçlü bir benzetim altyapısı sağlamasına rağmen kablosuz iletişime doğrudan desteği az ve modelleri zayıftır. Mixim Omnet++'da kablosuz ve hareketli benzetimler için geliştirilmiş birkaç mevcut benzetim çalışma çerçevesini içine alır ve genişletir. Özellikle detaylı kablosuz kanal modelleri, kablosuz bağlantı, hareket modelleri, engel modelleri vb. sağlar. Ayrıca kablosuz ve hareketli ağların benzetiminde kullanışlı görsel öğeler sağlar [73].

Mixim 3D desteği, radyo sinyal zayıflaması ve hareketliliği etkileyen engel modelleri, farklı frekans ve iletim ortamları, frekans ve uzayda çoklu-kanal desteği, IEEE 802.15.4 dâhil birçok MAC protokolünü içerir [73].

Mixim düşük bellek tüketimi ve modüler yapısının uyumluluğundan dolayı 1000 düğümden fazla ağların benzetimini de destekler [73].

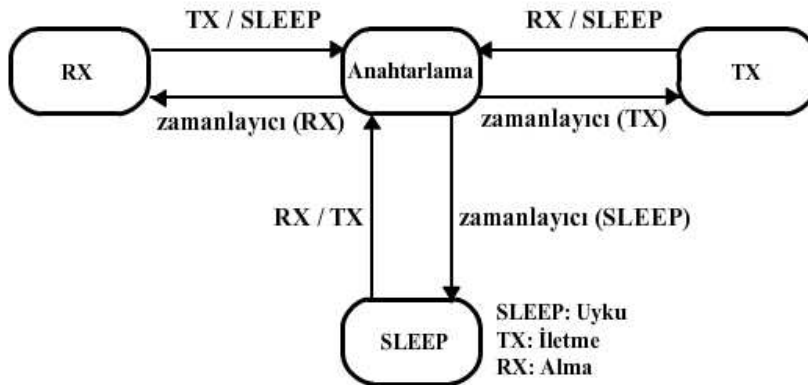
Mixim genel bileşenleri: Genel parametrelerin saklandığı ve ulaşılabilirdiği bileşen, düğümlerin hareket bölgelerini ve radyo sinyallerinin yayılımını yöneten nesne yönetimi bileşeni ve tüm düğümlerin konumlarını, bağlantı yapısını dinamik olarak yöneten bağlantı yönetimi bileşenidir.

5.3.1. Mixim fiziksel katman

Fiziksel katman MAC katmanına durum bilgisi sağlar, RX, TX ve SLEEP radyo durumlarını anahtarlar, havaya / kanala paketleri gönderir, paketleri alır / paketleri dinler, istatistik bilgilerini saklar ve ayarlanabilir düzenlemeler yapar [74].

MAC katmanından istenmesi durumunda MAC katmanına kanalın meşgul, boşta veya RSSI durumunu; şu anki radyo durumunun alma (RX), iletme (TX) veya uyku (SLEEP) radyo durumlarından hangisinde olduğunu ve göndermenin tamamlandığını belirten iletim bitiş bilgilerini sağlar.

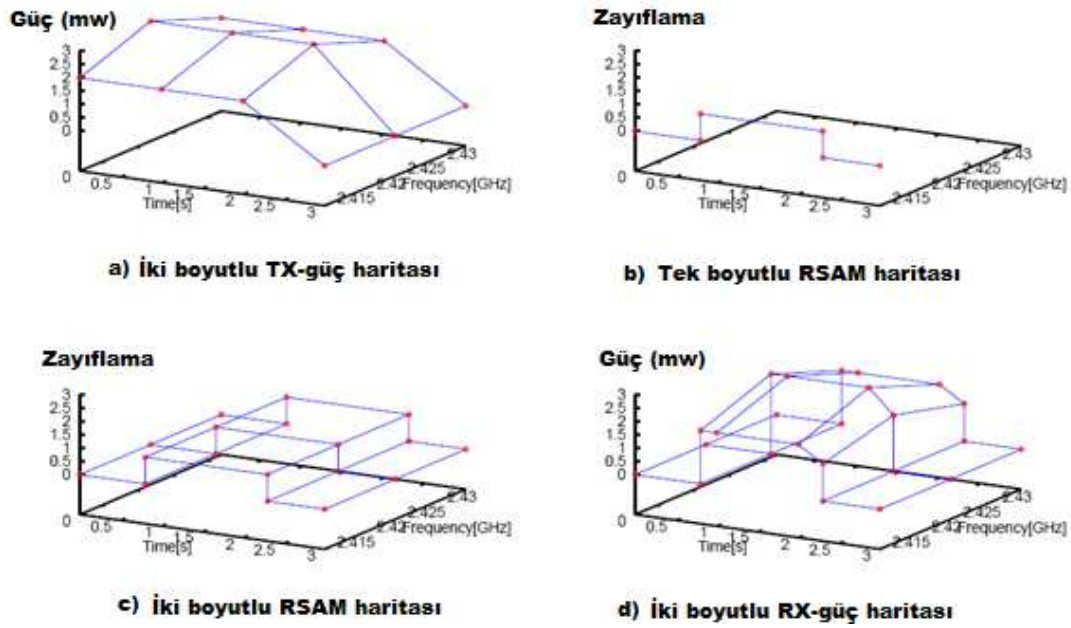
Radyo durumları arası anahtarlama süresi Şekil 5.2’de gösterildiği gibi radyonun alma, iletme ve uyku durumları arasından hangi radyo durumuna anahtarlanağına bağlı olarak değişecektir.



Şekil 5.2. Radyo durumları arasında anahtarlama ve zamanlama [74]

MAC katmanı pakete zaman üzerindeki bütün boyutlar için bit oranı (çoğu durumda başlık ve yük bit oranı bilgisi) ve TX ileti gücü, frekans / düzlem kanal boyutları ve paketin boyutu bilgilerini ekler. Kullanılan alma – iletim güçleri ve sinyal zayıflama haritaları Şekil 5.3’de görülmektedir.

Fiziksel katmandan paket gönderme süreci: MAC katmanı paket ve kontrol bilgisini fiziksel katmana verir. Gönderici fiziksel katman alıcı taraftaki fiziksel katmanın ihtiyaç duyduğu bilgileri pakete ekler. Gönderici fiziksel katman pakete sinyal ekleyerek kanala gönderir. MAC katman için mesaj iletiminin sonlanması planlanır.



Şekil 5.3. Boyut bilgileri [74]

Alıcı fiziksel katmanın gelen mesajı değerlendirirken ihtiyaç duyduğu bilgiler:

- Zaman üzerindeki bütün boyutlar için TX iletim gücü ve bit oranı, boyutlu kanal ve öncü süresini tutan sinyal bilgisi.
- Gönderi sahibinin hızı, başlangıç pozisyonu, hareket yönü ve süre bilgisi.
- Paket boyutu.

Fiziksel katmandan paket alma süreci: Paketler alıcı düğüme vardığında yayılım gecikmesi, öncü süresi ve yük süresi gibi süreç benzetimleri yapılır. Mesaj vardiktan sonra analog modeller sinyale zayıflama matrisi ekler. Sinyal iletimi sona erdiğinde karar verme bileşeni “sinyal gürültü oranını” (Signal Noise Ratio - SNR) değerlendirerek paketi sinyal veya gürültü olarak sınıflar. Doğru olarak alınamayan sinyal bit hatası ya da çarpışma işareti ile MAC katmanına geçirilirken, doğru olarak alınan sinyal işaretsiz olarak MAC katmanına geçirilir.

Analog modeller alınan sinyale güç zayıflaması benzetimini yapar. Yol kaybı, gölgeleme ve sönümleme gibi hazır modeller kullanılabileceği gibi yeni bir model

geliştirilebilir. Fiziksel katman bir sinyale çoklu analog model uygulayabilir. Analog modeller fiziksel katmandan bağımsız ayarlanabilir.

Karar verici, paketi sinyal veya gürültü olarak sınıflar. Paketin sinyal ve girişim gürültüsü temelinde doğru olarak alınıp - alınmadığına karar verir. Sinyalin bitlerinin doğruluğunu döndürür. Karar verici modeller fiziksel katmandan bağımsız olarak belirlenebilir.

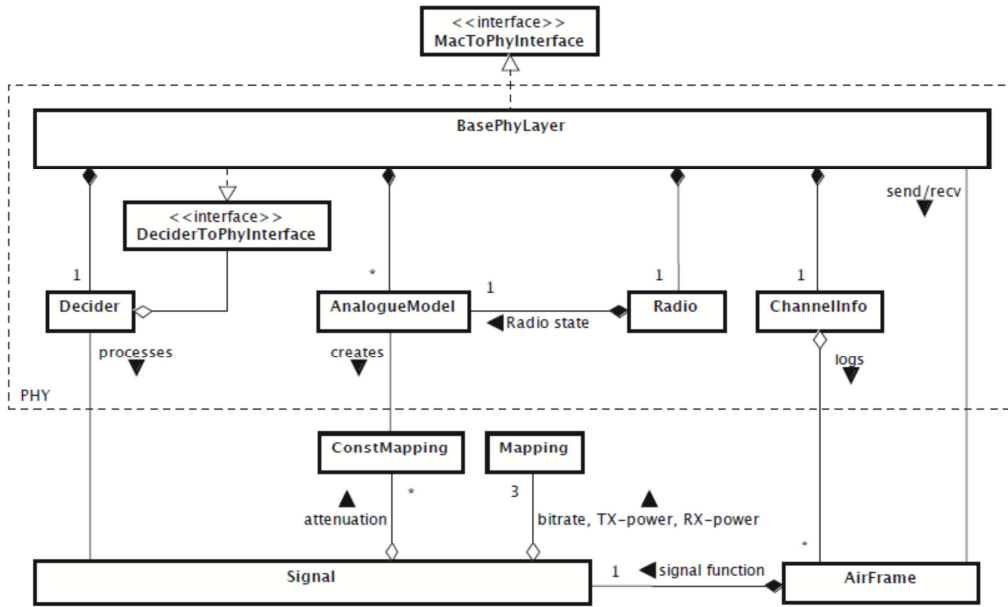
Tasarlanan bir sınıfın fiziksel katman ile ilgili erişilebileceği istatistikî bilgiler: Paket sayısı, alınan sinyal gücü, sinyal gürültü oranı, bit hata oranı ve çarpışmalar.

Yapılandırma “ini” dosyası kullanılarak fiziksel katmana ait aşağıdaki parametre değerleri değiştirilebilir:

- Yayılım gecikmesi benzetimi olacak mı?
- Seçilecek analog model ve parametre değerleri,
- Seçilecek karar verici modeli ve parametre değerleri,
- Termal gürültü, hassasiyet, maksimum TX gücü,
- RX, TX ve SLEEP radyo durumları arasında anahtarlama zamanı.

Fiziksel katmanın içerdiği sınıflar ve aralarındaki bağlantılar detaylı olarak Şekil 5.4’de görülmektedir.

Temel fiziksel katman arabirimi, Şekil 5.4’de gösterildiği gibi MAC katmanına veri kanalı ve kontrol kanalı ile bağlantı sağlar. Fiziksel katman, MAC paketlerini alma – gönderme işlemlerinde veri kanalını kullanılırken; iletim bitti (TX_OVER) vb. belirli olaylar hakkında MAC katmanını bilgilendirirken kontrol kanalını kullanır.



Şekil 5.4. Fiziksel katman sınıf diyagramı [74]

Temel fiziksel katmanın işlevleri:

- MAC katmanı kontrol kanalı üzerinden fiziksel katmana kanal algılama isteği gönderir.
- Bir kanal durumu iliştilerle birkaç kere karar vericiye verilir ve sonunda MAC katmanına geri gönderilir.
- Tüm sinyaller kanal bilgisi olarak zaman bilgisiyle birlikte tutulur ve kesişmeler bilinir.
- Fiziksel katman kanal bilgisine sinyal ekleyebilir ya da kaldırabilir.

Şekil 5.4’de gösterilen karar verici birimi, temel fiziksel katmandan gelen paketi alır ve değerlendirir. Karar verici paketin gürültü olup olmadığına karar verebilen zaman noktasını belirler ve fiziksel katmana bu zaman noktasını geri döndürür. Paket gürültü ise artık onunla ilgilenmez. Paket sinyal olarak sınıflanmışsa fiziksel katmana sinyalin sonunu döndürür. Bunun sonucunda fiziksel katman karar sonucu ile birlikte `AirFrame`’i MAC katmanına gönderir.

Şekil 5.4’de gösterilen temel fiziksel katman ile karar verici arasındaki DeciderToPhy arabirimi, karar verici ile birlikte çalışarak mevcut benzetim zamanını getirir, SNR hesaplamasında kullanılmak üzere belirli aralıkta kesişen AirFrame listesini getirir, fiziksel katmana AirFrame’i ve ilgili kontrol mesajını MAC katmanına göndermesini bildirir.

Şekil 5.4’de gösterilen AirFrame ve sinyal sınıfları, gönderilecek paket hakkında bilgiyi tutar. AirFrame Omnet++ ilişkili bilgiyi taşırken; sinyal iletim süreci benzetiminde gerekli olan bilgiyi taşır. Sinyal zaman üzerindeki zayıflama ve iletim gücü için girişleri saklar. Başlık ve yük bit oranı için sabit girişler vardır. Belirli zaman noktalarındaki girişlere erişilebilir. Sinyal ayrıca göndericinin hareket desenini, paket başlık uzunluğu, başlama zamanı ve sinyal uzunluğunu saklar. Paket gönderme sürecini kontrol edebilmek için her AirFrame tekil ID ve AirFrame türüne sahiptir. Ayrıca fiziksel sinyali temsil eden sinyalin bir örneğini tutar.

Bir MAC paketinin alınabilmesi için radyonun TX durumunda ve hali hazırda bir paket gönderilmiyor olması gerekir. Aksi durumda hata üreterek bizi bilgilendirir.

Kanala gönderilecek AirFrame oluşturulurken fiziksel katmanın ihtiyaç duyduğu bilgiyi içeren kontrol bilgisi nesnesi MAC paketine iliştilir. Fiziksel katman sinyale yeni bilgiler ekler. AirFrame’i oluşturma - başlatma ve ona sinyali ilişkilendirir. AirFrame tamamlandığında gönderilir. MAC katmanına TX_OVER kontrol mesajını planlar.

Fiziksel katmana bir AirFrame ulaştığında ilgili sinyale analog modeller uygulanır ve AirFrame alınır. AirFrame dört aşamada işlenir:

- Aşama 0: Alış başlama noktasına AirFrame planlayarak ve gecikmeye göre sinyal başlama zamanını güncelleyerek yayılım gecikmesi benzetimi yapılır.
- Aşama 1: Alma başladığında sinyal işlenmek üzere karar vericiye verilir. Karar verici yeniden sinyali işlemek istediği bir zaman noktası döndürür. Bu zaman noktası sinyalin sonundan önce olmalıdır aksi durumda hata verir.

- Aşama 2: AirFrame sinyal sonunun zaman noktasını veya negatif zaman noktası döndürene kadar karar verici işleme metodu için keyfi zamanlar planlar. Her iki halde durum AirFrame onun sonuna planlanmadan önce bir artırılır.
- Aşama 3: Sonuç olarak alma biter ve AirFrame gerçekte tam olarak alınır.

BÖLÜM 6. İŞARETSİZ ÖNCELİK TABANLI YENİ BİR YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ TASARIMI

6.1. Giriş

Bu bölümde, “İşaretsiz öncelik tabanlı yönlendirme protokolü” (Priority Based Beaconless Routing - PBBR) tasarımı açıklanmaktadır. Tasarlanan protokolün Omnet++ benzetim yazılımı altında uygulanması EK A’da verilmektedir.

6.2. PBBR Protokolü Varsayımları

Konum ve zaman bilgisi olmaksızın algılayıcıların okudukları değerler anlamsız olacağından kablosuz algılayıcı düğümlerin kendi konularını bilmesi gerekmektedir. PBBR protokolü, tüm düğümlerin hem kendi hem de nihai hedef alıcının konumunu bildiklerini kabul etmektedir. Konum bilgisinin elde edilmesi, Bölüm 3.5.4’de “Konum belirleme” başlığı altında detaylı olarak açıklanmaktadır.

Kablosuz algılayıcı ağlar genelde zor coğrafik bölgelerde kullanıldığından sınırlı enerjiye sahip kablosuz algılayıcı düğümlerin bataryaları değiştirilemez. Ancak kullanıcının rahat ulaşabileceği bir bölgeye yerleştirilen nihai hedef alıcının bataryası değiştirilebildiğinden enerji sınırlılığı yok kabul edilir. Ağ ömrünü uzatmak ve düğüm enerjilerini verimli kullanmak amacıyla, her düğüm kendi batarya enerji durumunu bilmelidir.

PBBR protokolünde kablosuz algılayıcı düğümler, sınırlı enerji kaynaklarını hızla tüketecek hareket kabiliyetinden yoksun kabul edilmektedir. Hareketsiz olan düğümler ancak güçlü bir rüzgârın etkisi gibi çevresel faktörlerden dolayı konum değiştirebilir.

PBBR protokolünde, verilerin önceliği kaynak düğümün uygulama katmanı tarafından belirlenir ve veri paketinin içine yazılır. Daha önemli paketlere daha yüksek öncelik tahsis edilir. En yüksek öncelikli veriler, “0 öncelikli” olarak nitelendirilirken öncelik azaldıkça numarası artırılır. Tasarlanan PBBR protokolünde yüksek ve düşük öncelikli olmak üzere iki öncelik seviyesi kullanılmaktadır.

6.3. PBBR Protokolü Özellikleri

Her yönlendirme protokolünde istenilen sonuçlara erişilirken kaynakların zamanlı, yerinde ve verimli kullanılması gerekir. Aşağıda PBBR protokolünün özellikleri sıralanmaktadır:

- İletim hakkı elde etme sürecinde yüksek öncelikli veri paketi gönderecek düğümlere avantaj sağlar.
- İletim hakkı elde etme sürecinde geri çekilme sayısını azaltarak iletim tekrarı sayısını azaltır.
- Veri paketinin nihai hedef alıcıya doğru aktarılması sürecinde, düğüm olmayan “boşluk bölgeleri” yönetilerek uygulama sahasının mümkün olan her bölgesinden veri paketinin nihai hedef alıcıya ulaştırılmasını sağlar.
- Yüksek öncelikli veri paketleri nihai hedef alıcıya mesafesi iyi durumda olan komşu düğümler üzerinden gönderilirken, düşük öncelikli veri paketleri enerjisi daha iyi durumda olan komşu düğümler üzerinden gönderilir.

6.4. PBBR Protokolünün Çalışma Mantığı

PBBR protokolünde, kaynak düğüm olarak ifade edilen veri üreten kablosuz algılayıcı düğümler, ürettikleri veri paketlerini komşu düğümler üzerinden aktararak nihai hedef alıcıya ulaştırırlar. Paket tutucu düğüm olarak adlandırılan veri paketi göndermek isteyen kablosuz algılayıcı düğümler, veri paketini komşu düğümlerden uygun olanına aktarır. Aday düğüm olarak ifade edilen ve paket tutucunun

göndermek istediği veri paketini almak isteyen komşu düğümler aralarında yarışır. Paket tutucu, gönüllü düğüm olarak adlandırılan yarış kazanan aday düğüme veri paketini aktarır. Böylece kaynak düğümlerin gönderdiği veri paketleri gönüllü düğümler üzerinden aktarılarak nihai hedef alıcıya ulaştırılır.

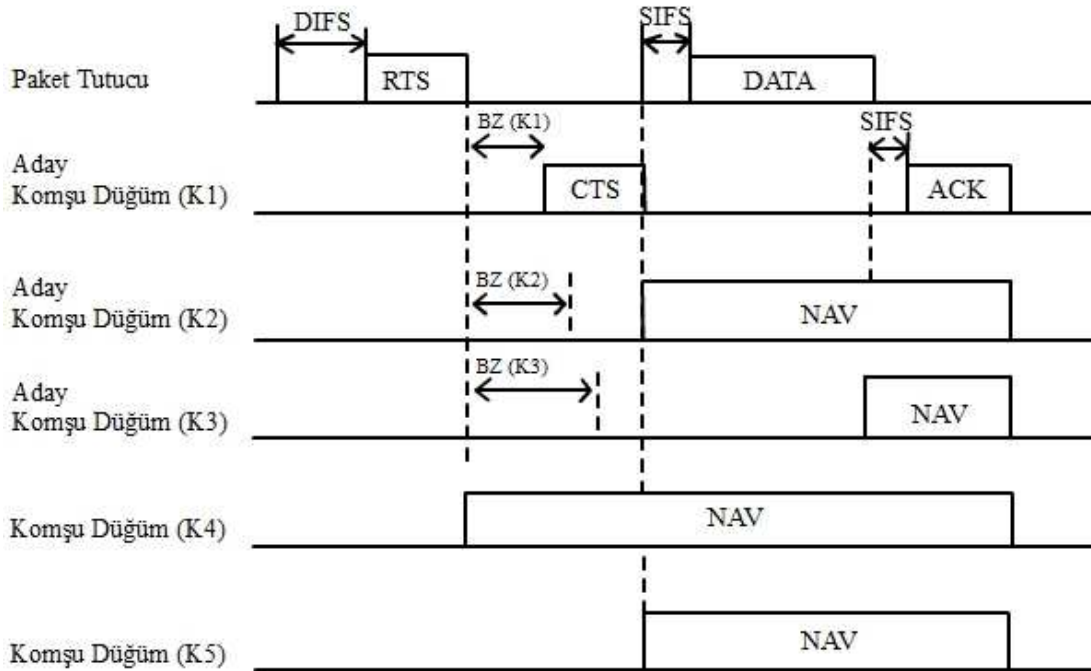
PBBR protokolünde, paket tutucu düğüm ile gönüllü düğüm arasında Şekil 6.1’de gösterilen el sıkışma mekanizması kullanılır ve yönlendirme kararı dağıtık olarak paket tutucu düğümün komşuları tarafından verilir. El sıkışması sürecinde “dağıtılmış koordinasyon fonksiyonu çerçeve boşluğu” (Distributed Coordination Function InterFrame Spacing - DIFS) süresince gönderecek paketi olan paket tutucu düğümler iletim ortamını dinler ve ortamın boş olması durumunda özel bilgiler içeren “gönderme isteği” (Request to Send - RTS) paketi gönderir. Eğer paket çarpışması meydana gelirse düğümler alt bölümlerde anlatılacak kurallara göre geri çekilerek yeniden iletim ortamını kullanma hakkını ele geçirmeyi denerler.

Paket tutucu düğümün gönderdiği RTS paketini alan komşu düğümler, paketteki bilgileri ve kendilerine ait çeşitli durum bilgilerini kullanarak veri paketini almaya aday olup - olamayacaklarına karar verirler. Şekil 6.1’de gösterilen PBBR el sıkışma sürecinde, aday olmaya karar veren K1, K2 ve K3 düğümleri aynı bilgileri kullanarak hesapladıkları bir bekleme değerine zamanlayıcılarını kurarlarken; aday olamayacak olan K4 düğümü “ağ yerleşim vektörü” (Network Allocation Vector - NAV) durumuna geçerek el sıkışma sürecinin tamamlanmasını bekler. Zamanlayıcısı dolan düğümler, paket tutucu düğüme veri paketini almaya aday olduklarını gösteren “gönderme isteğini temizle” (Clear to Send - CTS) paketi gönderirler. İlk CTS paketini en kısa bekleme zamanı hesaplayan K1 düğümü gönderir. Paket tutucu düğüm, ilk CTS gönderen K1 düğümünü gönüllü düğüm kabul eder ve diğer aday düğümlerin gönderdiği CTS paketlerini dikkate almaz. K1 düğümünün gönderdiği CTS paketini duyan K2 aday düğümü zamanlayıcısını iptal ederek NAV durumuna geçerken; paket tutucu düğümün komşusu olmasına rağmen K1 düğümüyle komşu olmayan K3 düğümü zamanlayıcısını iptal etmez.

Kendisine CTS paketi gönderilen paket tutucu düğüm, “kısa çerçeve boşluğu” (Short InterFrame Spacing - SIFS) süresince ortamı dinler ve ortamda taşıyıcı olmaması

durumunda gönüllü düğümüne veri paketini gönderir. Daha önce zamanlayıcısını iptal etmeyen K3 düğümü paket tutucu düğümün gönderdiği veri paketini duyduğunda NAV durumuna geçerek el sıkışma sürecinin tamamlanmasını bekler.

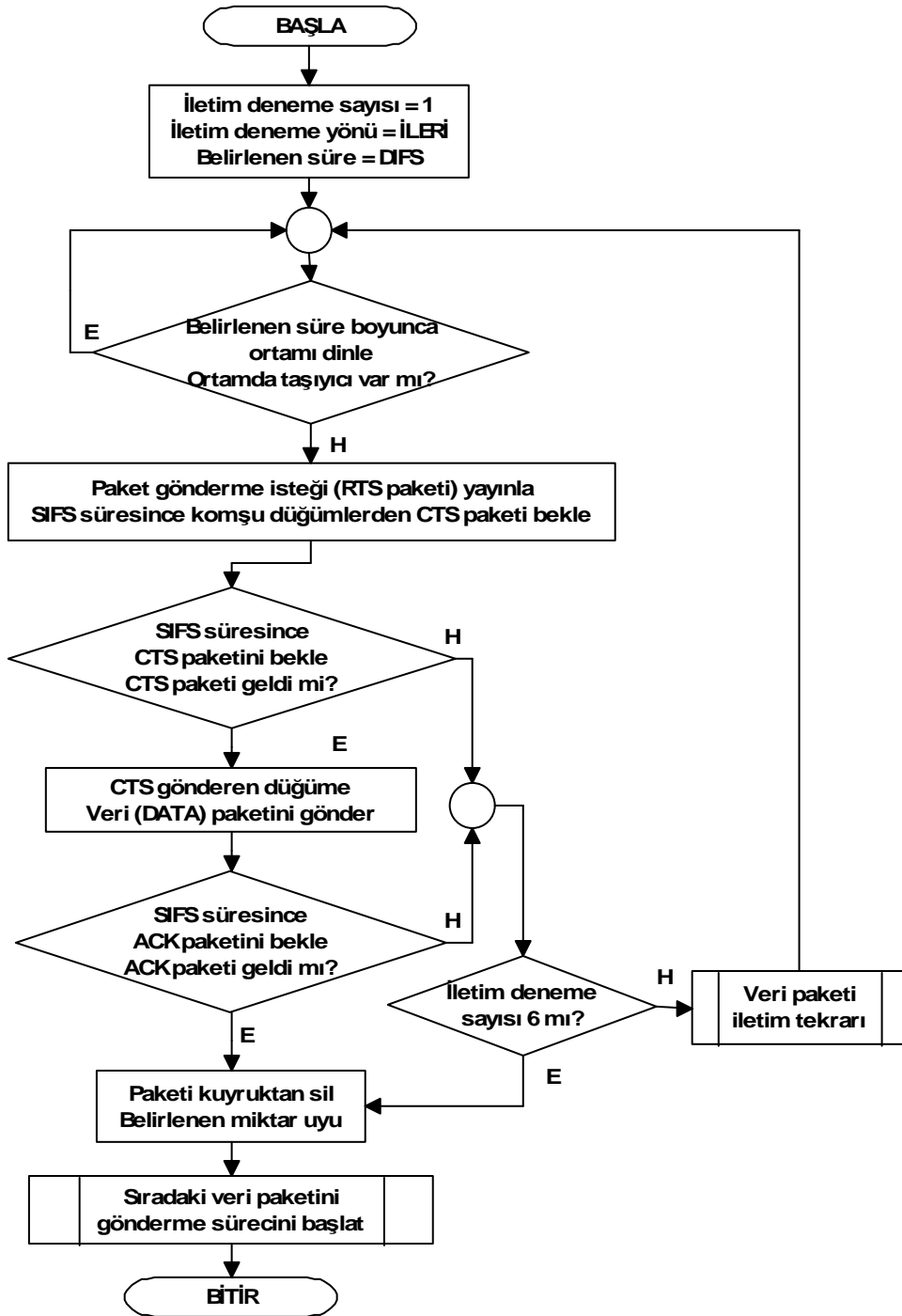
Gönüllü düğüm veri paketi kendisine ulaştığında SIFS süresince ortamı dinler ve ortamda taşıyıcı olmaması durumunda paket tutucu düğümüne ACK paketi gönderir. Paket tutucu düğüm, ACK paketi kendisine ulaştığında gönderdiği veri paketini kuyruğundan silerken; ACK paketi kendisine ulaşmadığında el sıkışma mekanizmasını baştan tekrarlar. Veri paketini başarılı bir şekilde alan yeni paket tutucu düğüm komşu düğümler üzerinden nihai hedef alıcıya ulaşıncaya kadar aynı yöntemle veri paketini aktarır.



Şekil 6.1. PBBR el sıkışması

Şekil 6.1’de gösterildiği gibi bir düğümün gönderdiği CTS, DATA ya da ACK paketini duyan komşu düğümler NAV durumuna geçerek paketteki süre bilgisi kadar sessiz kalırlar.

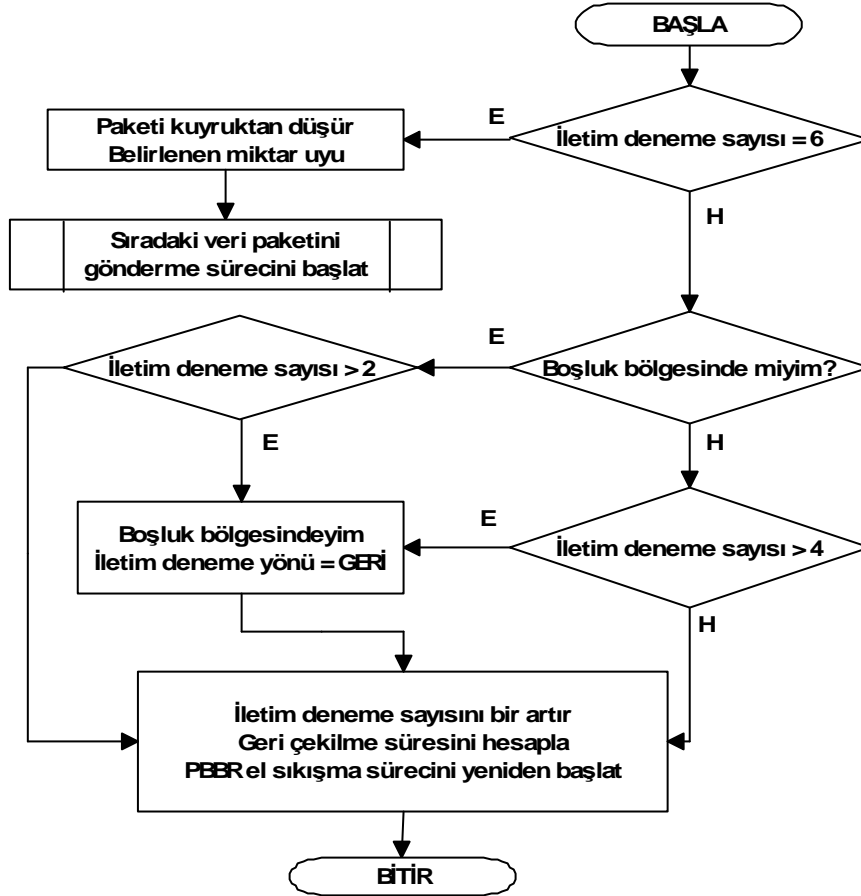
Bir paket tutucu düğüm gönderecek paketi olduğunda Şekil 6.2’de gösterilen akış şemasını kullanır. Paket tutucu düğüm, göndermek istediği veri paketini iletim deneme sayısı tamamlandığında başarıyla gönderememişse kuyruğundan siler.



Şekil 6.2. PBRB el sıkışma süreci akış şeması

Şekil 6.3'de paket tutucu düğüm veri paketini ilk denemesinde başarıyla iletmediğinde veri paketi iletim tekrarının genel akış şeması görülmektedir. Her paket tutucu düğüm, bir veri paketini tüm denemeleri sonucunda kendi konumuna göre nihai hedef alıcıya daha yakın bir komşu düğüme iletmediğinde kendisini boşluk bölgesinde olarak işaretler. Bir veri paketinin gönderilme süreci en fazla altı

deneme ile sonlandırılır. Bu denemeler sonucunda başarı ile iletilemeyen veri paketi kuyruktan silinir.



Şekil 6.3. Veri paketi iletim tekrarı akış şeması

Paket tutucu düğüm boşluk bölgesinde olarak işaretli değilse veri paketi başarılı iletilene kadar ilk dört iletim denemesinde pozitif ilerleme yönündeki düğümlere; son iki iletim denemesinde negatif ilerleme yönündeki düğümlere aday olma imkânı vererek veri paketini göndermeyi dener. Tüm iletim denemeleri bittiğinde başarıyla iletilemeyen veri paketi kuyruktan silinir.

Paket tutucu düğüm boşluk bölgesinde olarak işaretli ise, düğüm topolojinin değişmiş olması ihtimali ile ilk iki iletim denemesini pozitif ilerleme yönünde yaparak paketlerin gereksiz yere geriye doğru gönderilmesinin önüne geçilmeye çalışılır. Böylece daha kısa yol kullanılarak paketler hedefine ulaştığından, trafik yükü, enerji tüketimi ve gecikme azaltılır. Paket tutucu düğüm ilk iki iletim denemesinde veri paketini başarıyla iletemediğinde son dört iletim denemesinde

negatif ilerleme yönündeki düğümlere aday olma imkânı vererek veri paketini göndermeyi dener. Tüm iletim denemeleri bittiğinde başarıyla iletilemeyen veri paketi kuyruktan silinir.

6.4.1. Aday olamayacak düğümlerin tespit edilmesi

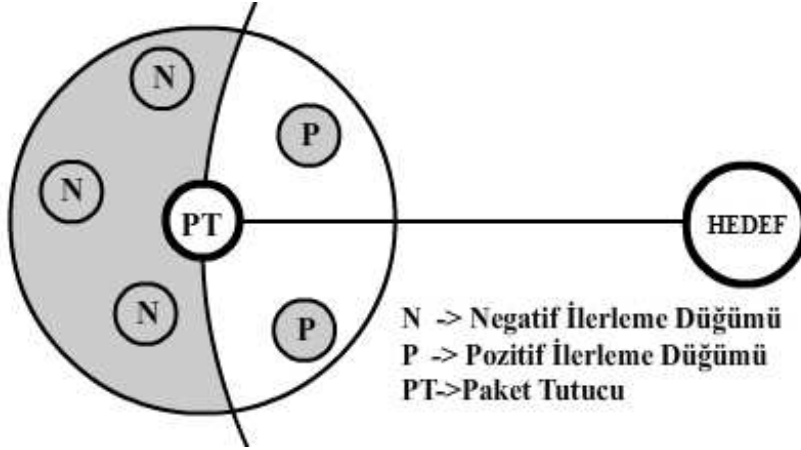
Daha öncede ifade edildiği gibi, paket tutucu düğüm veri paketi göndermek istediğinde komşu düğümlere isteğini bildirmek üzere kendi $x - y$ konumu, verinin önceliği, iletim deneme yönü ve sayısı bilgilerini içeren bir RTS paketi gönderir. RTS paketini alan düğümler RTS paketindeki bilgileri ve kendi tuttıkları özel istatistikî bilgileri kullanarak paketi almak için aday olup olmayacaklarına karar verirler.

Her düğüm aday olma sürecinde gerekli olacak istatistikî bilgileri veri önceliği ile eşleştirerek saklar. Bu yöntemle her veri önceliği seviyesi için hizmet kalitesi ayrıştırılır. Düğümlerin veri önceliği ile eşleştirerek sakladığı bilgiler; kuyruk doluluğu, ileri düğüme gönderme oranı, iletim başarı oranı, kuyruk boşaltma başarı oranı ve başarılı iletim yaptığı mesafe dilimlerinin üssel ortalamasıdır.

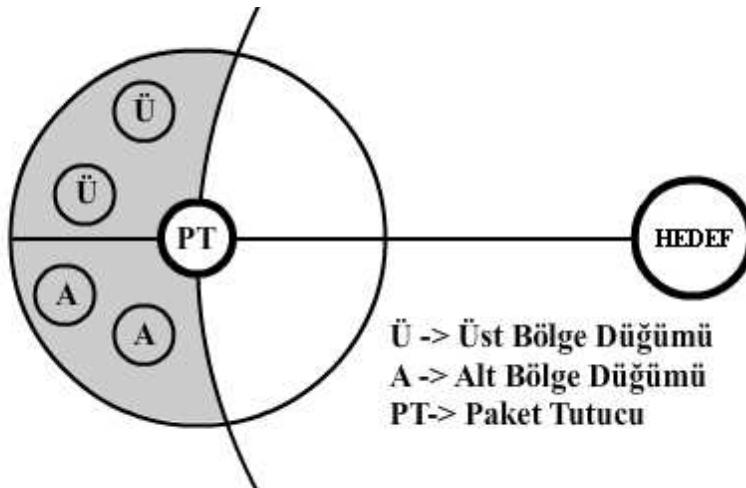
Aday olma sürecinde komşu düğümlerin nihai hedef alıcıya ilerleme yönleri önemlidir. Paket tutucu düğüme göre hedef alıcıya daha yakın olan komşu düğümler pozitif ilerleme düğümleri olarak isimlendirilirken; diğer komşu düğümler negatif ilerleme düğümleri olarak isimlendirilir. Şekil 6.4'de açık renkli bölgede pozitif ilerleme düğümleri yer alırken; koyu renkli bölgede negatif ilerleme düğümleri yer almaktadır.

İletim deneme yönünün negatif olduğu gönderme denemelerinde paket tutucu düğüme komşu olmalarına rağmen birbirlerine komşu olmayan ve veri paketini almaya eş zamanlı aday olan düğümlerin gönderecekleri CTS paketleri çarpışacağından iletim başarısızlıkla sonuçlanacaktır. Sonraki denemelerde bu başarısızlık tekrarlanacaktır. Bu başarısızlığın önüne geçmek amacıyla, paket tutucu düğümün komşuları Şekil 6.5'de ki gibi paket tutucu düğüm ile hedef arasında çizilen çizginin altındaki ve üstündeki düğümler olarak ayrıştırılır. Sonraki

denemelerde önce üstteki düğümlere daha sonra alttaki düğümlere aday olma hakkı verilerek başarısız iletimin önüne geçilmeye çalışılır.



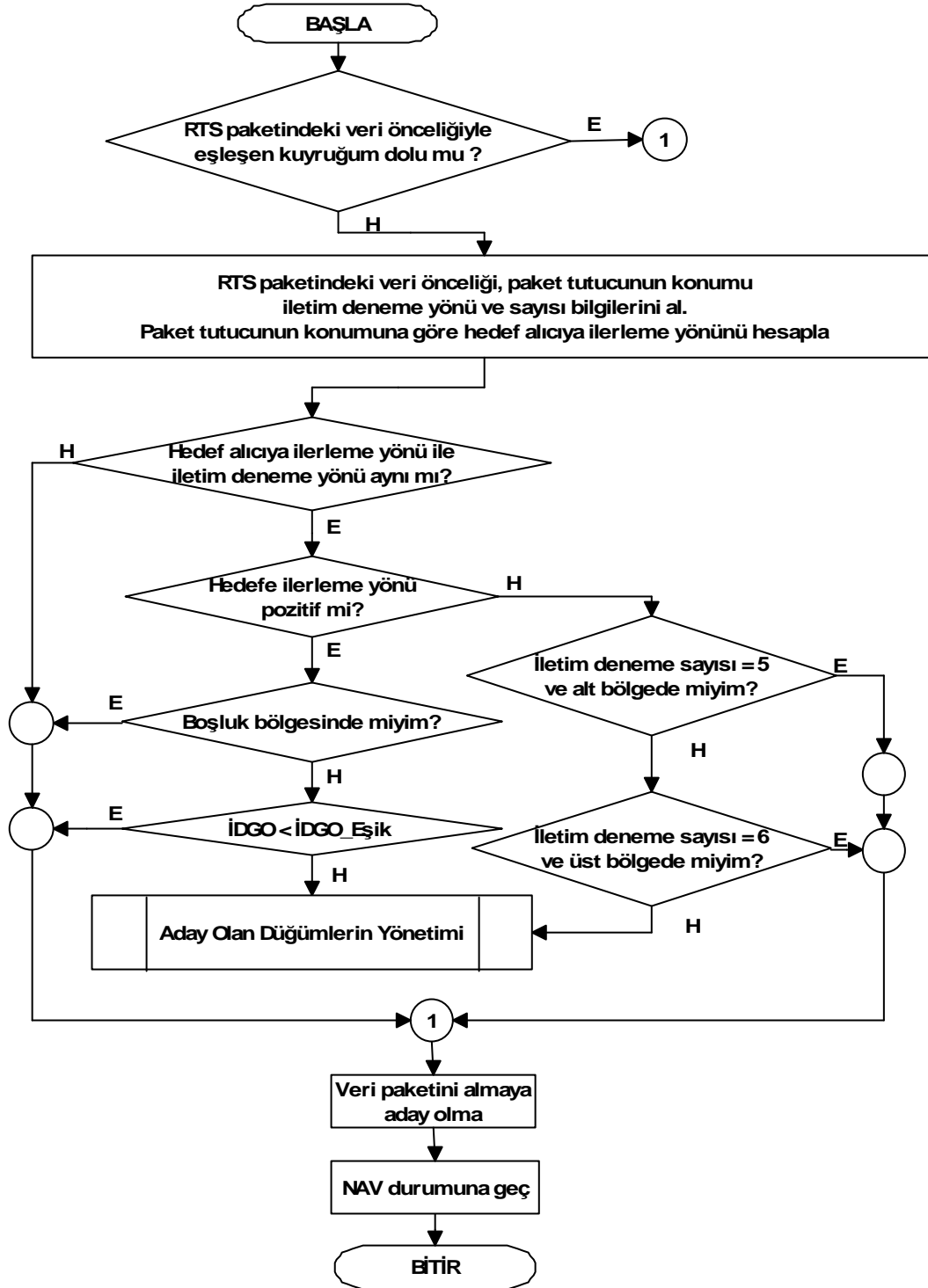
Şekil 6.4. Hedefe doğru ilerleme yönleri



Şekil 6.5. Negatif ilerleme bölgesindeki düğümlerin üst ve alt olarak ayrıştırılması

Aday olamayacak düğümlerin tespit edilmesinde Şekil 6.6'da gösterilen akış şeması kullanılır. Şekil 6.6'da ki akış şemasına göre düğümün RTS paketindeki veri önceliği bilgisiyle eşleşen kuyruğu dolu ise ya da RTS paketindeki iletim deneme yönü ile kendisinin nihai hedef alıcıya ilerleme yönü aynı değilse düğüm veri paketini almaya aday olamaz. Düğümün hedef alıcıya ilerleme yönü pozitif iken, düğümün boşluk bölgesindeyse veya RTS paketindeki veri önceliği bilgisiyle eşleşen ileri düğüme gönderme oranı (İDGO) değeri belirlenen eşikten küçükse düğüm veri paketini almaya aday olamaz. Düğümün hedef alıcıya ilerleme yönünün negatif iken, beşinci

iletim denemesinde alt bölge düğümleri aday olamazken; altıncı iletim denemesinde üst bölge düğümleri veri paketini almaya aday olamazlar.



Şekil 6.6. Aday olamayacak düğümlerin belirlenmesi

6.4.2. Aday düğümlerin hesaplamaları

Aday olmaya karar veren düğüm kendisinin hesaplayacağı bekleme süresine ayarlı zamanlayıcısını kurar. Zamanlayıcı dolduğunda adaylığını paket tutucu düğüme bildirmek için CTS paketi gönderir. Paket tutucu düğüm CTS paketini ilk gönderen düğümü sonraki atlama düğümü olarak seçer ve veri (DATA) paketini bu düğüme gönderir. Karşılığında bu düğümden ACK paketi alır. ACK paketi alamadığında paket tutucu düğüm maksimum iletim deneme sayısına ulaşılmamışsa yeni bir el sıkışma süreci başlatırken; aksi durumda paketi kuyruktan düşürür.

Aday düğümlerin bekleme değerini hesaplamada, nihai hedef alıcıya doğru pozitif ilerleme mesafesiyle bağlantılı hesaplanan mesafe dilimi, düğümün kalan enerjisi, kuyruk doluluğu, ileri düğüme gönderme oranı (İDGO), iletim başarı oranı (İBO) ve rastgele üretilen bir değer bilgisi kullanılır.

RTS paketiyle gönderilen iletim deneme yönünün pozitif olması durumunda bekleme zamanı Denklem 6.1’de verildiği gibi hesaplanır:

$$\text{Bekleme} = \text{Mesafe}_{\text{Etkisi}} + \text{Kuyruk}_{\text{Etkisi}} + \text{Enerji}_{\text{Etkisi}} + \text{İDGO}_{\text{Etkisi}} + \text{İBO}_{\text{Etkisi}} + \text{Rastgelelik}_{\text{Etkisi}} \quad (6.1)$$

RTS paketiyle gönderilen iletim deneme yönünün negatif olması durumunda bekleme zamanı Denklem 6.2’de verildiği gibi hesaplanır:

$$\text{Bekleme} = \text{Mesafe}_{\text{Etkisi}} + \text{Kuyruk}_{\text{Etkisi}} + \text{İDGO}_{\text{Etkisi}} + \text{Rastgelelik}_{\text{Etkisi}} \quad (6.2)$$

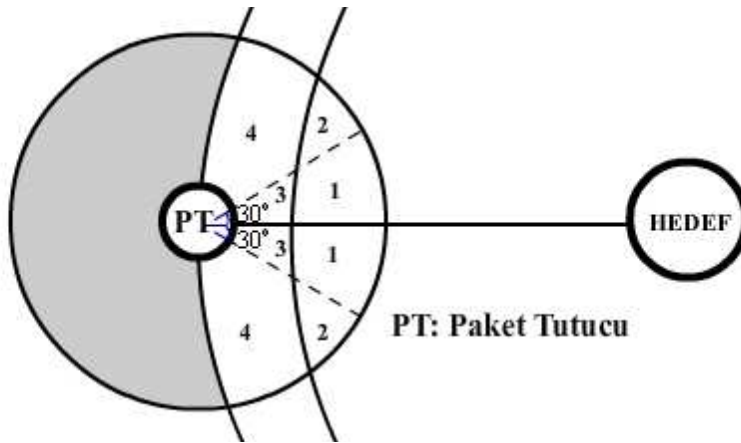
Bekleme zamanının hesaplanmasında kullanılan etki değerleri aşağıdaki bölümlerde detaylandırılmıştır.

6.4.2.1 Mesafe etkisi

En iyi tek bir düğümden yararlanmak yerine iyi olan birden fazla düğümden yararlanarak yük dağılımını dengelemek amacıyla hedefe doğru ilerleme mesafesi

dilimlere ayrılır. İletim deneme yönü pozitif olduğunda hem mesafe hem de açı dilimleme yaklaşımı kullanılırken; iletim deneme yönü negatif olduğunda sadece açı dilimleme kullanılır.

- a) Pozitif iletim yönünde mesafe etkisi: Şekil 6.7’de gösterildiği gibi pozitif ilerleme yönündeki düğümler hem ilerleme mesafesine göre hem de paket tutucu düğüm ile hedef arasında çizilen doğru ile yaptıkları açılara göre dilimlenirler. Düğümler açılara göre 30 derecenin altındaki ve üstündekiler olarak ikiye dilimlenir.



Şekil 6.7. Pozitif ilerleme bölgesinin açı ve mesafeye göre dilimlenmesi

Düğümlerin 60 derecelik en verimli alandaki düğümler ve diğerleri olarak ayrıldığı dilimleme yönteminin faydaları:

1. Hedef alıcıya aynı ilerlemeyi sağlayan daha düşük açılı bir düğüm ile paket tutucu düğüm arasındaki mesafe daha kısa olacaktır. Dolayısıyla, düşük açılı komşu düğümler tercih sebebi olacaktır. Paketlerin daha kısa yol üzerinden iletilmesiyle kullanılan iletim enerjisi ve paket gecikmesi azaltılır.
2. Paket tutucu düğümün komşusu olduğu halde birbirinin komşusu olmayan iki düğüm birbirlerinin gönderdikleri paketlerden haberdar olamaz. Bu iki düğüm paket tutucu düğümün göndermek istediği veri paketini almaya adaylıklarını bildiren CTS paketini yakın zamanlı gönderdiklerinde paketler çarpışır ve düşer. CTS paketi çarpışmalarının tekrarlanması gereksiz iletim tekrarlarına ve veri

paketinin paket tutucu düğüm tarafından düşürülmesine neden olabilir. Hâlbuki 60 derecelik bölge içerisindeki tüm düğümler fiziki bir engel olmaması durumunda birbirinin komşusu olacağından birbirlerinin gönderdiği CTS paketini duyacak ve göndermeyi planladıkları kendi CTS paketlerini iptal edeceklerdir. Böylece CTS paketlerinden birisi başarılı bir şekilde paket tutucu düğüme ulaşacağından gereksiz iletim tekrarları azaltılır.

Bekleme değerine mesafe ve açı diliminin etkisi Denklem 6.3'de verildiği gibi hesaplanır:

$$\text{Mesafe}_{\text{Etkisi}} = \text{Mesafe}_{\text{Katsayısı}} * \text{AçılıDilim}_{\text{Numarası}} \quad (6.3)$$

Mesafe katsayısı bekleme zamanı hesaplamasında kullanılan diğer katsayıların toplamına göre değişir ve Denklem 6.4'de verildiği gibi hesaplanır:

$$\text{Mesafe}_{\text{Katsayısı}} = 1 - (\text{Enerji}_{\text{Katsayısı}} + \text{Kuyruk}_{\text{Katsayısı}} + \text{İDGO}_{\text{Katsayısı}} + \text{İBO}_{\text{Katsayısı}} + \text{Rastgelelik}_{\text{Katsayısı}}) \quad (6.4)$$

Mesafe dilimi hesaplanırken önce aday olacak düğümün hedef alıcıya doğru sağladığı ilerleme mesafesi Denklem 6.5'de verildiği gibi maksimum iletim mesafesine göre normleştirilir.

$$\text{Mesafe}_{\text{Normleştirilmiş}} = (\text{Mesafe}_{\text{MaksGirişim}} - \text{Mesafe}_{\text{PaketTutucu, Hedef}}) / (\text{Mesafe}_{\text{MaksGirişim}}) \quad (6.5)$$

Mesafe dilimi değeri, Denklem 6.6'da verildiği gibi normleştirilmiş mesafe değeri ile dilim sayısının çarpımının tam kısmına 1 eklenerek hesaplanır.

$$\text{Mesafe}_{\text{Dilimi}} = (\text{int}) (\text{Mesafe}_{\text{Normleştirilmiş}} * \text{Dilim}_{\text{Sayısı}}) + 1 \quad (6.6)$$

Açılı dilim numarası Denklem 6.7'de verildiği gibi mesafe dilimi değerinin 2 katı olarak hesaplanır ve eğer açı 30 derecenin altında ise açılı dilim numarası değeri 1 eksiltir. İlerleme mesafesi ve açı değeri en iyi durumda olan bölgenin açılı dilim numarası 1 olarak numaralandırılırken diğer bölgeler kurala uygun olarak artan şekilde numaralandırılır (Bkz. Şekil 6.7).

$$\text{AçılıDilimNumarası} = (\text{MesafeDilimi} * 2) \quad (6.7)$$

Eğer açı ≤ 30 ise $\text{AçılıDilimNumarası} = \text{AçılıDilimNumarası} - 1$ olarak hesaplanır.

Paket tutucu düğüm gönderdiği her veri paketinin karşılığında ACK paketi alır. Alınan ACK paketi gönüllü komşu düğümün paket tutucu düğümüne göre mesafe dilim bilgisini içerir. Paket tutucu düğüm aldığı ACK paketlerindeki mesafe dilim değerlerinin üssel ortalamasını veri önceliği değeriyle eşleştirerek kaydeder.

b) Negatif iletim yönünde mesafe etkisi: Bekleme değerine açı diliminin mesafe etkisi Denklem 6.8'de verildiği gibi mesafe katsayısı ile açı dilimi numarası değeri çarpılarak hesaplanır:

$$\text{MesafeEtkisi} = \text{MesafeKatsayısı} * \text{AçıDilimiNumarası} \quad (6.8)$$

Mesafe katsayısı bekleme zamanı hesaplamasında kullanılan diğer katsayıların toplamına göre değişir ve Denklem 6.9'da verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{MesafeKatsayısı} = 1 - (\text{RastgelelikKatsayısı} + \text{KuyrukKatsayısı} + \text{İDGOKatsayısı}) \quad (6.9)$$

İletim deneme yönü negatif iken aday düğümün paket tutucu düğüm ile hedef düğüm arasındaki çizgiye olan açısı önem kazanır. Bekleme zamanı hesaplamasında açı değeri yerine açı değerinden hesaplanan dilim numarası kullanılır. Açı dilimi en küçük olan düğümüne bekleme zamanı avantajı sağlanarak sonraki atlama düğümü olma şansı artırılır. Açı değeri 0 ile 180 derece arasında değer alır. İlk 30 derecelik açıdaki düğümler pozitif ilerleme yönünde olacağından hesaplamaya katılmazken daha büyük açı değerleri 30 derecelik dilimlere bölünür.

Açı dilimi numarası Denklem 6.10'da verildiği gibi 30 derece azaltılan açı değerinin 30 değerine bölümününün tam kısmına bir eklenerek hesaplanır.

$$\text{AçıDilimiNumarası} = ((\text{int}) ((\text{açı} - 30) / 30)) + 1 \quad (6.10)$$

6.4.2.2 Kuyruk etkisi

Tasarlanan PBBR protokolünde, her veri önceliği seviyesi için ayrı kuyruk kullanılır. Daha yüksek öncelikli kuyruktaki paketler daha öncelikle gönderilir. Kuyruklarda “ilk giren ilk çıkar” (First In First Out - FIFO) prensibi geçerlidir. Daha yüksek öncelikli kuyruktaki veri paketleri bitmeden diğer kuyruktakilere sıra gelmez.

Kuyruğa alınacak bir paketin hedef alıcıya gecikmesi kuyruk doluluğu arttıkça artacaktır. Bekleme değerine kuyruğun etkisi, Denklem 6.11’de verildiği gibi kuyruk katsayısı ile kuyruk doluluk değeri çarpılarak hesaplanır.

$$\text{Kuyruk}_{\text{Etkisi}} = \text{Kuyruk}_{\text{Katsayısı}} * \text{Kuyruk}_{\text{Doluluk}} \quad (6.11)$$

Kuyruk doluluk değeri, Denklem 6.12’de verildiği gibi toplam kuyruk değerinin maksimum kuyruk değerine bölünmesiyle hesaplanır. Bu bölme işlemiyle kuyruk doluluk değeri 0 ile 1 değer aralığına normalleştirilir.

$$\text{Kuyruk}_{\text{Doluluk}} = \text{Kuyruk}_{\text{Toplam}} / \text{Kuyruk}_{\text{Maksimum}} \quad (6.12)$$

Kuyruk toplam değeri alınmasına aday olunan veri önceliği için kullanılan kuyruğun kendisinin paket sayısı ile daha öncelikli kuyruklardaki paket sayılarının toplamıdır. Kuyruk maksimum değeri kendi kuyruğu ve daha üst öncelikli kuyrukların toplam alabileceği paket sayısıdır.

Kuyruk doluluk değeri, veri paketi göndermek isteyen düğümün iletim ortamını kullanma hakkı elde etme sürecinde geri çekilme süresi hesaplanırken ve veri paketi almaya aday olan düğümün bekleme zamanı hesaplanırken kullanılır.

Kuyruk etkisi hem negatif hem de pozitif iletim deneme yönünde bekleme değeri hesaplamalarında kullanılır. Kuyruk etkisi özellikle iletim deneme yönü negatif iken daha fazla önem arz eder. Bir veri paketinin kuyruk doluluğu yüksek bir düğüme gönderilmesi o paketin gecikme ya da düşürülme olasılığını artırır. Hali hazırda

geriye doğru yönlendirilerek fazladan kaynak tüketen bir paketin kuyruk doluluğundan dolayı düşürülmemesi gerekir.

6.4.2.3 Enerji etkisi

Ağ ömrünün uzun olması her uygulamada istenen temel özelliklerdendir. Ağ ömrünün uzatılabilmesi için enerji etkin yöntemler kullanılması gerekir [75, 11].

Tasarlanan PBBR protokolünde, enerji yönetiminin temel amacı düğüm ölümlerinin geciktirilmesi ve azaltılmasıdır. Düğüm ölümlerinin azalması ile bilginin elde edildiği kapsama alanı daha uzun süre korunur. Enerjisi yüksek düğümler aktarma amaçlı tercih edilirken; enerjisi iyice azalan düğümler algılamaya devam eden düğüm olarak yaşamlarına devam ederler.

Tasarlanan PBBR protokolü, enerji korunumu amacıyla enerji etkin yönlendirme kullanmaktadır. Protokol, aday düğümün kalan enerjisinin etkisini bekleme zamanı hesabında kullanır. Paketlerin aktarılmasında kalan enerjisi diğer düğümlere göre daha uygun aday düğümün seçilme olasılığı artırılarak düğüm ölümleri geciktirilir ve ağ yaşam ömrü uzatılır.

Yönlendirme ya da komşuluk tablosu kullanan protokoller enerji korunumu amacıyla düğümlerin dönüşümlü ve zaman planlı uyutulması için ek mekanizmalar kullanır. Tasarlanan PBBR protokolü, işaretli konum tabanlı olduğundan ek mekanizmalar kullanmadan düğümlerin rastgele olarak uyumasına imkân verir. Ancak her düğüm kendi karar mekanizmalarını kullanarak performansa daha fazla katkı sağlayacak şekilde uyutulmalıdır.

Düğümün kalan enerjisinin değeri dilimlenerek bekleme zamanı hesabına katılır. Enerji dilimleri arasındaki aralık üstel olarak artırılır. Süreç içerisinde düğümler kademeli olarak hep birlikte alt enerji dilimlerine taşınır. Bu işlemin sağladığı katkıyla erken düğüm ölümlerinin önüne geçilir, bağlanabilirlik korunur, ağ ömrü uzatılır ve bilginin okunduğu kapsama alanının genişliği korunur.

Bekleme değerine enerjinin etkisi Denklem 6.13’de verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Enerji}_{\text{Etkisi}} = \text{Enerji}_{\text{Katsayısı}} * 10^{(\text{EnerjiDilimiNo} - \text{EnerjiDilimiSayısı})} \quad (6.13)$$

Enerji katsayısı veri önceliği ve kuyruk sayısı değerlerine bağlı olarak değişir ve Denklem 6.14’de verildiği gibi hesaplanır. Daha yüksek öncelikli veri paketleri için enerji katsayısı azaltılırken mesafe katsayısı artırılır. Böylece hedef alıcıya doğru daha fazla ilerleme sağlayan aday düğümlerin seçilme olasılığı artırılır.

$$\text{Enerji}_{\text{Katsayısı}} = \text{Enerji}_{\text{Katsayısı}} * (\text{Öncelik}_{\text{Veri}} / \text{kuyruk sayısı}) \quad (6.14)$$

Enerji dilimi numarası Denklem 6.15’de verildiği gibi düğümün tükettiği enerji ile enerji dilim sayısı çarpılarak hesaplanır. Aday düğümün kalan enerjisi azaldıkça seçilme olasılığı azalır.

$$\text{Enerji Dilimi No} = \text{Enerji}_{\text{Tüketilen}} * \text{Enerji Dilimi Sayısı} \quad (6.15)$$

Kapsama alanını azaltmamak ve bağlantılılığı sürdürmek amacıyla düğümler, kuyrukları boş olması durumunda, başarılı gönderdikleri ya da başarısız iletim sonucu düşürdükleri her veri paketi sonrasında uyku konumuna geçirilir. Bunların dışında enerji değeri azalan düğümler daha sık ve uzun aralıklarla uyku konumuna geçirilir.

6.4.2.4 İDGO etkisi

Bekleme değerine ileri düğüme gönderme oranı (İDGO) değerinin etkisi, İDGO katsayısı ve veri önceliği ile eşleşen İDGO değeriyle bağlantılı olarak Denklem 6.16’da verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{İDGO}_{\text{Etkisi}} = \text{İDGO}_{\text{Katsayısı}} * (1 - \text{İDGO}[\text{öncelik}]) \quad (6.16)$$

Paket tutucu düğüm veri paketini bir komşusuna başarılı bir şekilde aktarıncaya kadar her veri gönderme teşebbüsüyle ilgili iletim deneme yönü ve iletim deneme

sayısı bilgilerini tutar. Paket tutucu düğüm veri paketini başarılı ilettiği komşusundan ACK paketi aldığı anda kendi tuttuğu iletim deneme yönü bilgisine göre veri öncelik değeriyle eşleşen İDGO değerini günceller.

Paket tutucu düğüm veri paketini başarılı ilettiğinde iletim deneme yönü pozitif ise İDGO değeri Denklem 6.17’de verildiği gibi güncellenir ve değer artar. İDGO değeri Denklem 6.17 ve Denklem 6.18’de verilen oran değişkeni kullanılarak 0 ile 1 arasında normalleştirilir.

$$\text{İDGO}[\text{öncelik}] = (\text{Oran} * \text{İDGO}[\text{öncelik}]) + (1 - \text{Oran}) \quad (6.17)$$

Paket tutucu düğüm veri paketini başarılı ilettiğinde iletim deneme yönü negatif ise İDGO değeri Denklem 6.18’de verildiği gibi güncellenir ve değer azalır.

$$\text{Değilse } \text{İDGO}[\text{öncelik}] = (\text{Oran} * \text{İDGO}[\text{öncelik}]) \quad (6.18)$$

İDGO etkisi hem negatif hem de pozitif iletim deneme yönünde bekleme değeri hesaplamalarında kullanılır. Veri paketinin pozitif ilerleme yönünde aktarılmaya devam edilebilmesi için İDGO değeri yüksek düğümler tercih edilir.

Komşu düğüm, iletim deneme yönü pozitif iken $\text{İDGO}[\text{öncelik}] < \text{İDGO}_{\text{Eşik}}$ ise veri paketini almaya aday olmaz.

6.4.2.5 İBO etkisi

Bekleme değerine iletim başarı oranı (İBO) değerinin etkisi, İBO katsayısı, düğümün veri önceliği ile eşleşen İBO değeri ve normalleştirilmiş hedef alıcıya ilerleme mesafesi değerleriyle bağlantılı olarak Denklem 6.19’da verildiği gibi hesaplanır.

$$\text{İBO}_{\text{Etkisi}} = \text{İBO}_{\text{Katsayısı}} * (1 - \text{İBO}[\text{öncelik}]) * \text{Mesafe}_{\text{Normalleştirilmiş}} \quad (6.19)$$

İBO etkisi yalnızca pozitif iletim denemelerinde dikkate alınır.

Eğer $\dot{I}BO_{\text{Etkisi}} > (\dot{I}BO_{\text{Eşik}})$ ise $\dot{I}BO_{\text{Etkisi}} = \dot{I}BO_{\text{Katsayısı}}$ olarak seçilir.

$\dot{I}BO$ etkisi belirli bir eşikten yukarı olduğunda doğrudan $\dot{I}BO$ katsayısı değerine eşitlenerek hedef alıcıya uzak durumda olan düğümler adaylık yarışında geride bırakılır.

6.4.2.6 Rastgelelik etkisi

Aday olma sürecinde yakın bekleme zamanı hesaplayan komşu düğümlerin CTS paketleri tüm denemelerde çarpışacaktır ve gönüllü düğüm seçilemeyecektir. Bu çarpışmaların önüne geçmek için bekleme zamanı hesaplamasına rastgelelik etkisi eklenir. Rastgelelik etkisi hem pozitif hem de negatif iletim yönü denemelerinde bekleme zamanına katkı sağlar (Denklemler 6.20).

$$\text{Rastgelelik}_{\text{Etkisi}} = (\text{uniform}(0, (\text{Rastgelelik}_{\text{Katsayısı}} * 100)))/100 \quad (6.20)$$

6.5. PBBR Protokolü Yönlendirme Yönetim Aktiviteleri

Her yönlendirme protokolünde istenilen sonuçlara erişilirken kaynakların zamanlı, yerinde ve verimli kullanılması gerekir. Bu amaçla yönetilmesi gereken birden fazla unsur vardır. Tasarlanan PBBR protokolü, işlevselliği artırmak amacıyla aşağıdaki alt bölümlerde açıklanan boşluk bölgesi yönetimi, çekişme süreci yönetimi, tıkanıklık yönetimi ve hareketlilik yönetimi aktivitelerini dikkate alır.

6.5.1. Boşluk bölgesi yönetimi

Kablosuz algılayıcı ağ yönlendirme protokollerinde veri paketini gönderecek pozitif ilerleme yönünde düğüm olmadığı durumlarda boşluk bölgesi yönetimi önem arz eder. Açgözlü yönlendirme protokollerinin çoğunda boşluk bölgesi yönetimi dikkate alınmaz ve sadece düğüm boşluk bölgesinde olarak işaretlenir. İşaretli düğüm yeni paketleri kabul etmez. Boşluk bölgeleri paket kayıp oranını artırır ve gereksiz yere kaynak harcanmasına neden olur.

Daha öncede ifade edildiği gibi PBBR protokolünde bir düğüm hedef alıcıya doğru pozitif ilerleme yönünde paketini başarılı aktarabileceği bir komşuya sahip değilse ya da tüm komşuları boşluk bölgesinde olarak işaretliyse kendisini boşluk bölgesinde olarak işaretler. Paketlerin aktarılması sırasında bu işlem sıralı bir şekilde geriye doğru devam eder. Böylece olası tüm boşluk bölgesindeki düğümler kendilerini işaretler. İşaretli bir düğüm pozitif ilerleme yönünde bir düğüm buluncaya kadar veri paketlerini negatif ilerleme yönündeki düğümler üzerinden iletir.

Tasarlanan PBBR protokolünde, boşluk bölgesi yönetimi hem pozitif hem de negatif ilerleme yönündeki veri paketlerinin gönderilmesinde kullanılır.

PBBR protokolü boşluk yönetimi amacıyla üç değişken kullanır. Bunlar;

- Düğümün İDGO değeri,
- Düğümün paket tutucu ile hedef düğüm arasındaki çizgiye olan açısı ve
- Kuyruk doluluğudur.

6.5.2. Çekişme süreci yönetimi

Kablosuz algılayıcı ağlarda tıkanıklığın iki tipi vardır: radyo çarpışması ve kuyruk doluluğu. Çarpışmanın oluşmaması için “zaman bölümlenmeli çoğullama” (Time Division Multiple Access - TDMA) [76], “frekans bölümlenmeli çoğullama” (Frequency Division Multiple Access - FDMA) [77] ve “kod bölümlenmeli çoğullama” (Code Division Multiple Access - CDMA) [77] ortam erişim protokolleri mevcuttur. Tasarlanan PBBR protokolü çekişme tabanlı MAC katmanı kullanan bir yönlendirme protokolüdür.

MAC katmanı seviyesinde düğümlerin paketlerini iletmek için ortama eş zamanlı erişim çabaları iletişim başarısızlıklarını artırır. Artan iletişim başarısızlıkları düğüm enerjilerinin boşa harcanması, ağ ömrünün azalması, paket gecikmeleri ve paket düşmelerine neden olduğundan çekişme sürecinin iyi yönetilmesi gerekmektedir.

PBBR protokolünde bu amaçla veri gönderme isteği RTS ve veri alma isteği CTS kontrol paketlerinin çarpışma olasılığını azaltmak için iki farklı çekişme yönetimi kullanılmaktadır.

1- CTS paketlerinin çarpışma sayısını azaltmak:

Negatif iletim deneme yönünde paket tutucu düğüm ile hedef alıcı arasındaki çizginin önce altındaki sonra üstündeki düğümlere aday olma hakkı verilir. Bu hakkın sırayla verilmesindeki amaç paket tutucu düğümün komşusu olmasına rağmen birbirine komşu olmayan iki düğümün eş zamanlı CTS cevap paketini göndermeleri sonucu paketin düşmesine engel olmaktır.

2- RTS paketlerinin çarpışma sayısını azaltmak:

RTS paket çekişmelerinin bant genişliğini gereksiz yere tüketmesi göz ardı edilmemelidir. Veri paketi gönderme hakkını elde etmek amacıyla gönderilen RTS paketi çekişmelerinde düğümlerin geri çekilme süreleri aynı zaman aralığından rastgele değerler seçilerek tespit edilir. Bu işlem çarpışma olasılığını bir miktar azaltabilir ancak yetersizdir.

Çekişme sürecinde iki temel amaç göz önünde bulundurulur. Birincisi veri önceliği daha yüksek bir paketin daha önce gönderilmesinin sağlanması iken; ikinci amaç, çekişmeye katılan düğümlerin geri çekilme süresinin çekişme sürecinin erken bitirilmesini sağlayacak şekilde hesaplanmasıdır. Her iki amacı sağlamak için geriye çekilme değeri hesaplanırken kullanılacak bilgiler aşağıda sıralanmıştır.

- Veri paketinin önceliği (802.11 e) [78],
- Düğümün kuyruk doluluğu,
- Düğümün İDGO değeri ve
- Düğümün İBO değeri

Hesaplama kullanılabilecek bu bilgilerin tümü düğümün kendisi tarafından tutulan istatistiki bilgiler olduğundan ek bir kaynak kullanımı söz konusu değildir.

Hesaplama daha öncelikli veriye sahip, kuyruk doluluk oranı düşük, ileri düğüme gönderme başarı oranı ile iletim başarı oranı yüksek düğümlere ek avantaj sağlar ve geri çekilme süresi düşük tutulur. Böylece RTS paketlerinin çarpışma olasılığı düşürülür.

Geri çekilme süresi Denklem 6.21’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Geri çekilme süresi} = \text{Geri çekilme süresi} / \text{Geri çekilme}_{\text{Böleni}} \quad (6.21)$$

Geri çekilme böleni, kuyruk (veri öncelik) sayısı, verinin öncelik değeri ve İBO değeri ile bağlantılı olarak Denklem 6.22’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Geri çekilme}_{\text{Böleni}} = (\text{Kuyruk sayısı} - \text{verinin öncelik değeri}) + (\text{İBO}[\text{öncelik}] / 3) \quad (6.22)$$

6.5.3. Tıkanıklık yönetimi

Kablosuz algılayıcı ağlar çok sayıda kablosuz algılayıcı düğüm ve bir ya da birkaç alıcıdan oluştuğu için kablosuz algılayıcı düğümlerin ürettiği trafik çok düğümden az düğüme doğru iletilmek zorundadır. Çok sayıda kablosuz algılayıcı düğümün ürettiği trafik az sayıda alıcıya doğru iletilmek istendiğinde oluşan aşırı yük ağda tıkanıklığa neden olur. Tıkanıklık kablosuz algılayıcı ağların yaşam ömrünü azaltır ve enerji etkinliği üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Tıkanıklık ayrıca paket kayıplarını artıracığı için veri güvenilirliğini de azaltır [79].

Kablosuz algılayıcı ağlarda genelde düğüm seviyesinde ve bağlantı seviyesinde olmak üzere iki tip tıkanıklık vardır. Veri paketlerinin depolandığı kuyruk alanının taşması durumunda düğüm seviyesinde tıkanıklık gerçekleşir. Bu tıkanıklık tipinde paket kayıpları, kuyruk gecikmesi ve enerji tüketimi artar. Aynı iletim sahasındaki birden fazla düğüm iletim ortamına eş zamanlı erişmek istediğinde çekişme oluşması durumunda bağlantı seviyesinde tıkanıklık gerçekleşir. Bu tıkanıklık tipinde paket

hizmet zamanı artar ve bağlantı yararlılığı azalır. Dolayısıyla, paket gecikmesi ve kuyruktan paket düşürme miktarı artar [79].

Tıkanıklıkta genelde paket üretim oranı kontrolü, paket aktarma oranı kontrolü, aktif/pasif çalışma zamanı ayarı, çekişme pencere ayarı, topoloji bilgisi toplama ve yük dengeleme gibi yöntemler kullanılır [79].

Tasarlanan PBBR protokolü tıkanıklık probleminde çözüm amacıyla kuyruk doluluğu değeri ve kuyruk boşaltma başarı oranı bilgilerini kullanır.

Kuyruk boşaltma hızı oranı (KBHO) Denklem 6.22'de verildiği gibi bir paketin başarılı bir şekilde pozitif ilerleme yönünde iletilmesi için geçen ortalama süre paketlerin kuyruğa ortalama geliş süresine bölünerek hesaplanır.

$$KBBO[\text{öncelik}] = T_{\text{Hizmet}}[\text{öncelik}] / T_{\text{Aralık}}[\text{öncelik}] \quad (6.22)$$

$T_{\text{Aralık}}$: Bir paketin kendinden önceki paketten ne kadar zaman sonra kuyruğa girdiği süre değeridir.

T_{Hizmet} : Bir veri paketinin diğer bir düğüme gönderilmeye karar verildiği zamandan (ilk RTS paketinden) paketin başarılı bir şekilde iletilmesine dair ACK onay paketi gelinceye kadar geçen sürenin değeridir.

Eğer iletim deneme yönü pozitif ve $KBBO[\text{öncelik}] < KBBO_{\text{Eşik}}$ ise $Kuyruk_{\text{Etikisi}} = 0$ olarak hesaplanır.

6.5.4. Hareketlilik yönetimi

Kablosuz algılayıcı ağlar genelde zor coğrafya şartları barındıran yerlere rastgele düzende yerleştirilen kablosuz algılayıcı düğümlerden oluşur. Bu gibi bir ortamda hareket kabiliyetine sahip olmaları zor olmakla birlikte enerji kısıtlı yapıları nedeniyle düğüme kazandırılan hareket kabiliyeti verimli kullanılamayacaktır. Nihai hedef alıcının hareketliliği enerji sınırlılığı olmadığından performans katkı

sağlayabilir. Ancak tasarlanan PBBR protokolünde nihai hedef alıcı hareketsiz kabul edilmiştir.

6.6. Paket Çerçeve Yapıları

Bu bölümde, geliştirilen PBBR protokolünde kullanılan paket çerçeve yapıları açıklanacaktır.

Tablo 6.1’de gösterilen fiziksel katman paket formatı, paket “öncü serisi” (Preamble Sequence - PS), “çerçeve ayırma başlangıcı” (Start of Frame Delimiter - SFD), “çerçeve uzunluğu” (Frame Length - FL) ve MAC katmanı “protokol veri birimi” (Protocol Data Unit - PDU) alanlarından oluşur.

Tablo 6.1. PBBR protokolünün fiziksel katman paket formatı

PS	SFD	FL	MAC PDU
32 bit	8 bit	7 bit	0 – 977 bit

CC2420 radyo alıcısında PS ve SFD alan boyutları değiştirilebilir olmakla birlikte varsayılan olarak PS 32 bit ve SFD 8 bit olarak kullanılır. CC2420 radyo alıcısının alma ve gönderme tamponu 128 baytlık olduğundan FL alanı 7 bittir ve maksimum 127 değerini alır [68].

Protokolde MAC katmanı düzeyinde veri paketi gönderme isteği RTS, veri paketini almaya aday olma CTS, veri paketi (DATA) ve veri paketinin başarılı ulaştığını belirten cevap paketi ACK olmak üzere 4 paket türü tanımlanmıştır. Bu paketlerin her birinde 16 bitlik çerçevenin genel kullanımı ile ilgili bilgileri tutan çerçeve kontrol, 16 bitlik çerçeve hata kontrolü için gerekli “döngüsel artıklık kontrolü” (Cyclic Redundancy Check - CRC) ve 16 bitlik paket iletiminin başarıyla tamamlanacağı süre alanları yer alır. CC2420 CRC hesaplamasını kendisi yapar.

Veri paketinin tekrardan gönderilip gönderilmediğini gösteren paket tekrarı alanı ve paket alt tipi alanları önemli çerçeve kontrol alanlarıdır. Paket alt tipi alanı 3 bit tutularak $2^3 = 8$ farklı paket tanımlanabilmesine imkân verilerek ileride yeni paket

türlerinin eklenebilmesi ihtimali göz önünde bulundurulmuştur. Mevcut paket alt tipi kodları bit olarak Tablo 6.2’de gösterilmektedir.

Tablo 6.2. PBBR protokolünün paket türü kodları

Paket bitleri	Paket alt tipi
000	RTS
001	CTS
010	DATA
011	ACK
111	Yayın

Paket tutucu düğümün gönderecek verisi olduğunda tüm komşularına Tablo 6.3’de paket formatı verilen RTS paketi yayınlar. RTS paketi, komşu düğümlerin veri paketini almaya aday olup olmayacakları ya da aday olacak düğümlerin maliyet hesaplamalarında kullanacağı özel bilgileri içerir. Bu özel bilgilerden paket tutucu düğümün X koordinatı PTX ve Y koordinatı PTY, komşu düğümün paket tutucu düğüme göre hedef alıcıya ilerleme mesafesi, ilerleme yönü ve açısının hesaplamasında gereklidir. RTS paketinde öncelik bilgisi (ÖB) alanı, veri paketinin önceliği bilgisini tutarken; paket tutucu düğümün adresinin yazıldığı KA alanı, veri paketini almaya aday olacak komşu düğümlerin CTS paketini gönderecekleri adres bilgisini tutar.

Tablo 6.3. PBBR protokolünün MAC katmanı RTS paketi formatı

ÇK	Süre	ÖB	PTX	PTY	KA	İletim deneme sayısı	İletim deneme yönü	CRC
16 bit	16 bit	2 bit	16 bit	16 bit	16 bit	3 bit	1 bit	16 bit

RTS paketini alan komşu düğümler, RTS paketindeki ÖB alanı ile eşleşen istatistikî bilgilerini kullanarak adaylık sürecine katılırlar.

Veri paketini almaya aday olan komşu düğüm, Tablo 6.4’de çerçeve formatı verilen CTS paketinin KA alanına kendi adresini ve HA alanına paket tutucu düğümün adresini yazarak CTS paketini gönderir.

Tablo 6.4. PBBR protokolünün MAC katmanı CTS paketi formatı

ÇK	Süre	KA	HA	CRC
16 bit	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit

Veri paketini gönüllü komşu düğüme gönderecek olan paket tutucu düğüm, Tablo 6.5’de çerçeve formatı verilen DATA paketinin KA alanına kendi adresini, HA alanına gönüllü komşu düğümün adresini ve protokolün ileride birden fazla alıcıyı desteklemesi planıyla hedef düğümün adresini BA alanına yazarak DATA paketini gönderir. 16 bitlik boyutuyla YS alanı paket için 65535 milisaniyeye kadar yaşam süresi tanımlanmasını sağlar. RTS paketi gönderme sürecinde yaşam süresi dolan veri paketleri paket tutucu düğüm tarafından kuyruktan silinir. Veri paketinin veri alanı verinin üretildiği zaman, veri kaynağının x ve y konumu, nem ve basınç gibi algılanan değerleri içerir. Veri paketindeki sıra numarası (SN) alanı veri paketlerinin çoğaltılmasının önüne geçilmesinde kontrol amacıyla kullanılır. Paket tutucu düğüm gönderdiği veri paketinin karşılığında gönüllü komşu düğümden ACK paketi alamadığında veri paketini tekrardan gönderir. Kendisine adresli veri paketini alan komşu düğüm, paket tutucu düğümün adresi, verinin tekrar alanı ve SN numarasına bakarak tekrarlayan veriyi kuyruğuna eklemeyi ancak gönderdiği veri paketinin karşılığında paket tutucu düğüme ACK paketi gönderir.

Tablo 6.5. PBBR protokolünün MAC katmanı veri (DATA) paketi formatı

ÇK	Süre	SN	ÖB	YS	KA	HA	BA	Veri	CRC
16 bit	16 bit	16 bit	2 bit	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit	0-847bit	16 bit

Kendisine adresli veri paketini alan komşu düğüm, Tablo 6.6’da çerçeve formatı verilen ACK paketinin KA alanına kendi adresini, HA alanına paket tutucunun adresini ve DN alanına kendisinin paket tutucu düğüme göre hedef alıcıya ilerleme mesafesinin dilim numarasını yazarak paket tutucuya ACK paketini gönderir.

Tablo 6.6. PBBR protokolünün MAC katmanı ACK paketi formatı

ÇK	Süre	KA	HA	DN	CRC
16 bit	16 bit	16 bit	16 bit	3 bit	16 bit

BÖLÜM 7. PBBR PROTOKOLÜ BAŞARIM ANALİZİ

7.1. Giriş

Tasarlanan PBBR protokolünde, veri önceliği kaynak düğüm tarafından belirlenen, tüm veri paketlerini nihai hedef alıcıya gönderirken; kayıp ve gecikme kısıtlı olduklarından yüksek öncelikli verilere daha iyi hizmet sağlayan bir yönlendirme amaçlanır.

Bu bölümde, performansları karşılaştırılacak PBBR, SIF ve MMSPEED protokolleri Omnet++ benzetim aracının 4.1 sürümü ve Mixim 2.0.1 yazılımı modülleri kullanılarak modellenmiştir. Modellenen protokoller için değerlendirme ölçütlerinden yönlendirme yükü, paket teslim oranı, uçtan uca ortalama paket gecikmesi, enerjinin verimliliği ve kapsama alanı açısından performans ölçümleri yapılmıştır. Performans ölçümlerinde aşağıdaki bölümlerde verilen benzetim parametreleri kullanılmıştır.

7.2. Benzetim Parametreleri

Protokol modellerini gerçeklemek için detayları EK.A'da verilen Omnet++ benzetim yazılımı kullanılmıştır. Aşağıda deneylerde kullanılan benzetim parametreleri sıralanmaktadır:

Düğüm sayısı: Benzetim deneylerinde 90, 120 ve 150 düğümlü ağlar kullanılmıştır. Ortam boyutu sabit tutulmuş olduğundan farklı düğüm yoğunlukları için benzetimler gerçekleştirilmiştir.

Ortam boyutu: Düğümler 1250m x 1250m yüz ölçümünde bir sahaya rastgele dağıtılmışlardır.

Veri paketi boyutu: 128 Byte sabit boyutlarda paketler kullanılmıştır.

Kaynak sayısı: Ağda aynı anda veri paketi gönderebilecek düğüm sayısını belirtmektedir. Tüm düğümlerin kaynak olduğu bir ağ kullanılmıştır.

Hareket hızı: Düğümlerin üstel olarak bir yönde hareket etme hızları. Düğümlerin kendileri hareket yeteneğine sahip olmayıp olası dış etkenlerden dolayı hareket ettikleri varsayılarak hareket hızı verilmiştir. Düğümlerin hareket yönleri rastsal seçilmiştir.

Benzetim süresi: Benzetim deneyleri 50 sn çalıştırılmıştır.

Tekrar sayısı: Benzetim yazılımı ile ele alınan her farklı ağ on defa çalıştırılıp, ortalama sonuçlar ele alınmıştır.

Tablo 7.1’de modellenen MMSPEED protokolünün benzetim parametreleri listelenmektedir.

Tablo 7.1. MMSPEED protokolüne ait benzetim parametre değerleri

Parametre adı	Değeri
Komşuluk bilgisi gönderme süresi	0,5s
İstenilen güvenilirlik (0 – 1)	0,5
Yüksek öncelikli veri uçtan uca yaşam süresi	0,3s
Düşük öncelikli veri uçtan uca yaşam süresi	1s
RTS boyutu	26 Bayt
CTS boyutu	14 Bayt
ACK boyutu	16 Bayt

Tablo 7.2’de benzetimde kullanılan ve uygulamaların çoğunda yaygın olarak tercih edilen CC2420 radyo alıcısının parametre değerleri gösterilmektedir.

Tablo 7.2. CC2420 radyo alıcısının parametre değerleri

Parametre adı	Değeri
Frekans	2,4 Ghz
Veri iletim	250Kbps
İletim durumunda akım çekimi	17,4 mA
Alıcı durumunda akım çekimi	18,8 mA
Uyku durumunda akım çekimi	0.000021 mA
Batarya voltajı	3,3V

Benzetimlerde düğüm sayısı, düğüm hareket hızı ve düğüm paket üretme hızları parametre olarak kullanılırken her deney grubunda parametrelerden ikisi sabit tutularak diğer parametrenin üç farklı değeri için sonuçlar alınmıştır. Performansları karşılaştırılacak protokoller için 3 ayrı deney grubu toplam 9 farklı alternatif durumda benzetim yapılmıştır (Tablo 7.3).

Tablo 7.3. Deney gruplarının düğüm ile ilgili parametreleri

		Parametreler		
		Düğüm sayıları	Düğüm hareket hızları	Düğüm paket üretme hızları
Deney Grubu	Deney 1	90	hareketsiz	1, 2 ve 4 paket / saniye
	Deney 2	90	0 - 0,1 ve 1 metre / saniye	1 paket / saniye
	Deney 3	90, 120 ve 150	hareketsiz	1 paket / saniye

Tablo 7.4'de modellenen PBBR protokolünün benzetim parametreleri listelenmektedir.

Tablo 7.4. Benzetimde kullanılan PBBR protokolüne ait parametre değerleri

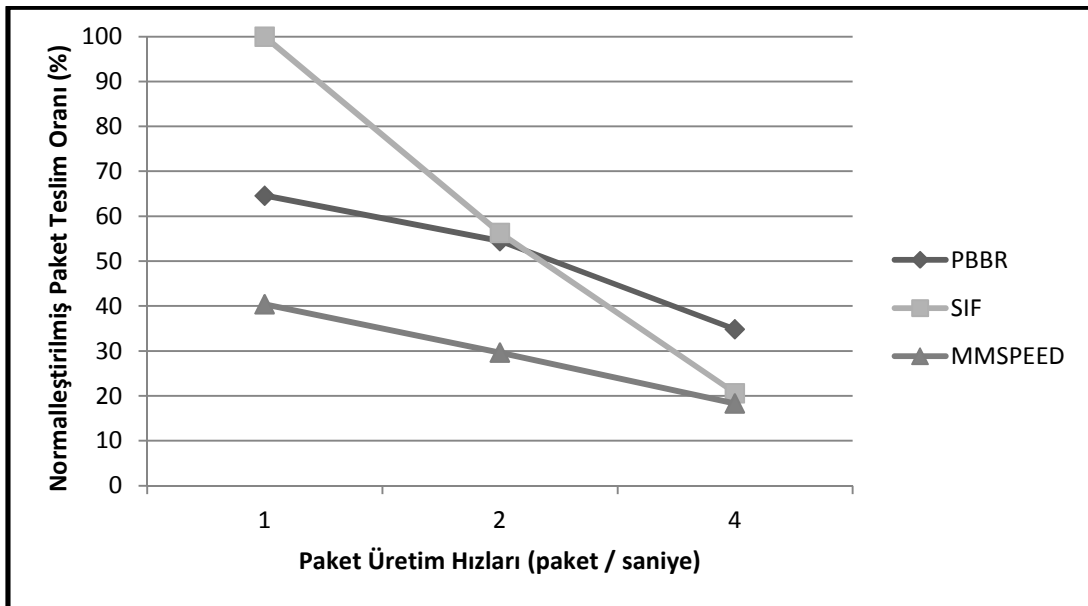
Parametre adı	Değeri
Kuyruk katsayısı	0,1
İDGO katsayısı	0,1
İBO katsayısı	0,1
Enerji katsayısı	0,1
Rastgelelik katsayısı	0,05
İDGO eşik	0,7

PBBR protokolünün benzetim parametreleri için seçilen katsayı değerleri düşük tutularak PBBR protokolünün en temel özelliklerinden biri olan hedefe ilerleme mesafesi ile ilgili mesafe katsayısı değeri yüksek tutulmaya çalışılmıştır (Tablo 7.4). İDGO eşik değeri 0,5'den yüksek herhangi bir değer seçilebilir. Yükün düğümler arasında dengeli dağıtılabilmesi için İDGO değeri çok yüksek tutulmamalıdır. Bu yüzden İDGO eşik değeri 0,7 gibi orta bir değer seçilmiştir.

7.3. Paket Teslim Oranı

Paket teslim oranı (PTO), ağdaki veri gönderici düğümlerin gönderdikleri paketlerin, alıcıya ulaşma oranlarını belirleyen bir performans ölçütüdür. Paket teslim oranının yükselmesi sistemin bir performans göstergesidir. Karşılaştırılan protokollerin arasındaki farkın daha net görülebilmesi amacıyla grafiklerde paket teslim oranları en yüksek değer üzerinden normalize edilerek verilmiştir.

Şekil 7.1'de düğümlerin veri paketi üretim hızları arttıkça her üç protokolün PTO değerlerinin azaldığı görülür. Paket üretim hızı 1 paket / saniye için en yüksek PTO değerini SIF protokolü vermekte ancak paket üretim hızı arttıkça PTO değeri diğer iki protokole göre daha hızlı düşmektedir.



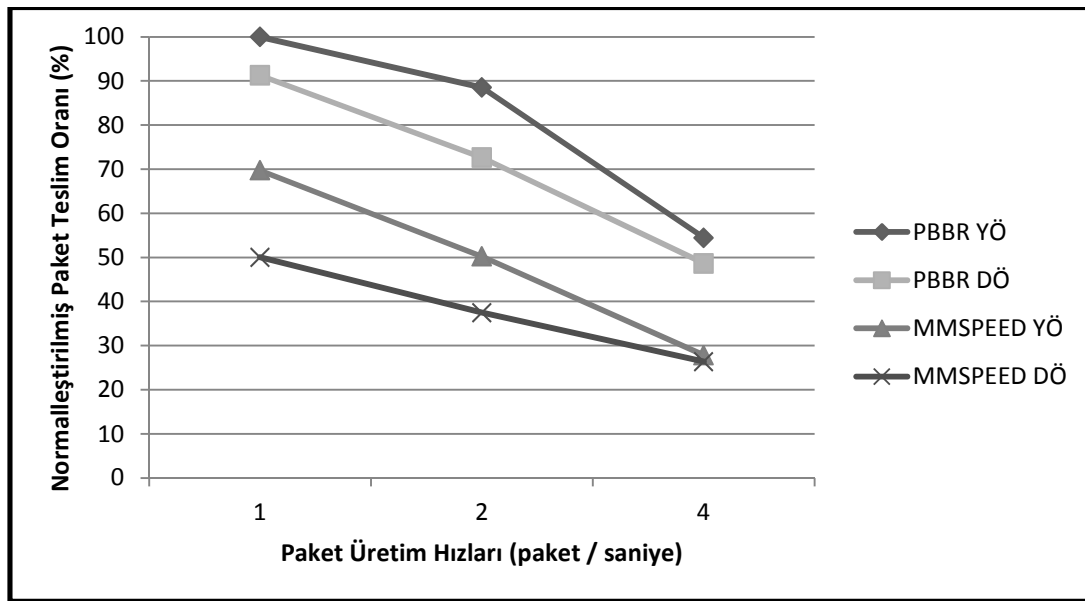
Şekil 7.1. Farklı paket üretme hızlarında normalize edilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Tablo 7.5’deki değerlere göre PTO bakımından SIF protokolü PBBR protokolünden ortalama %15 daha yüksek performans gösterirken, PBBR protokolü MMSPEED protokolünden %60 ile %90 arasında daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.5. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Paket Üretim Hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
1 paket / saniye	64,60	100	40,39
2 paket / saniye	54,49	56,30	29,66
4 paket / saniye	34,84	20,64	18,31

Şekil 7.2’de MMSPEED ve PBBR protokollerinin her ikisinde de yüksek öncelikli paketler için daha yüksek PTO değeri elde edildiği görülür. Ancak paket üretim hızı arttıkça her iki protokolün her iki öncelik seviyesi için PTO değerleri düşmektedir.



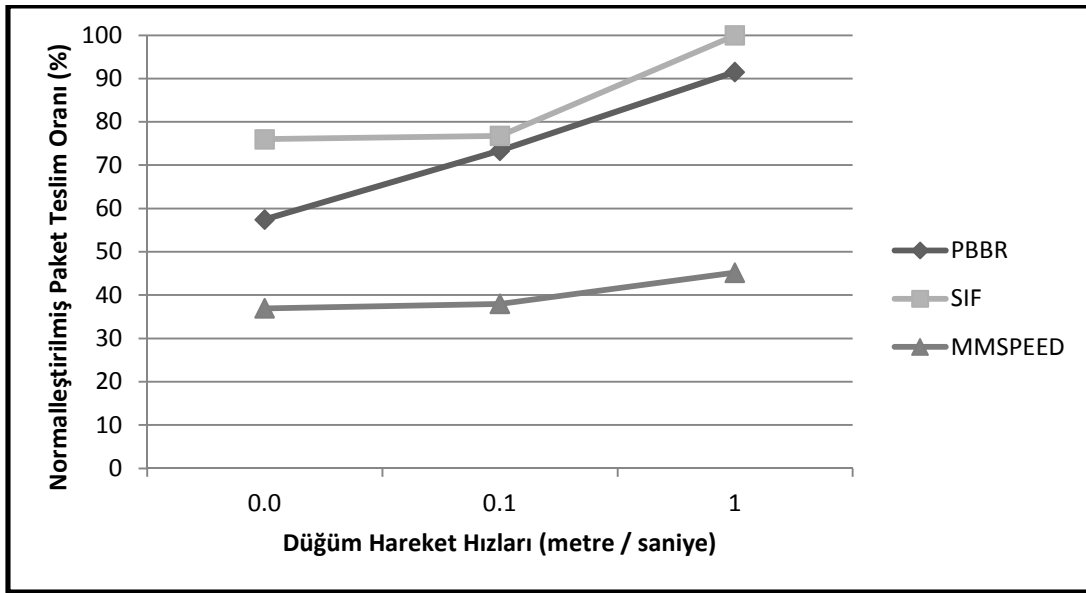
Şekil 7.2. Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Tablo 7.6’deki değerlere göre PTO değeri bakımından PBBR protokolü MMSPEED protokolünden yüksek öncelikli verilerde %12 ile %43 arasında ve düşük öncelikli verilerde %80 ile %93 arasında daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.6. Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Paket Üretim Hızları	PBBR YÖ	PBBR DÖ	MMSPEED YÖ	MMSPEED DÖ
1 paket / saniye	100	91,28	69,74	50,03
2 paket / saniye	88,51	72,63	50,19	37,49
4 paket / saniye	54,46	48,65	27,83	26,36

Şekil 7.3'e bakıldığında değişik düğüm hareket hızlarında PTO değeri bakımından en yüksek performansı SIF protokolünün gösterdiği görülmektedir. Düğüm hareket hızı arttıkça her üç protokolda de PTO değeri yükselmektedir.



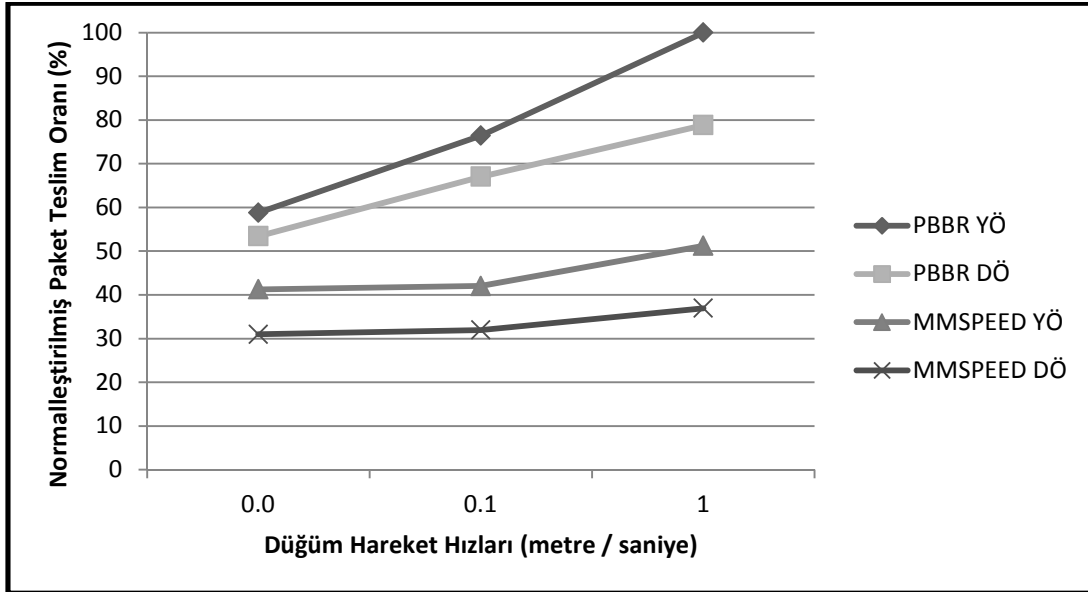
Şekil 7.3. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

Tablo 7.7'deki değerlere göre PTO bakımından SIF protokolü PBBR protokolünden ortalama %13.7 daha yüksek performans gösterirken, PBBR protokolü MMSPEED protokolünden %55 ile %102 arasında daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.7. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

Düğüm Hareket Hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
Hareketsiz	57,44	75,98	36,95
0.1 metre / saniye	73,34	76,79	37,97
1 metre / saniye	91,53	100	45,20

Şekil 7.4'e bakıldığında düğümlerin hareket hızı arttıkça her iki protokolda her iki öncelik için PTO değerinin artmakta olduğu görülür.



Şekil 7.4. Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

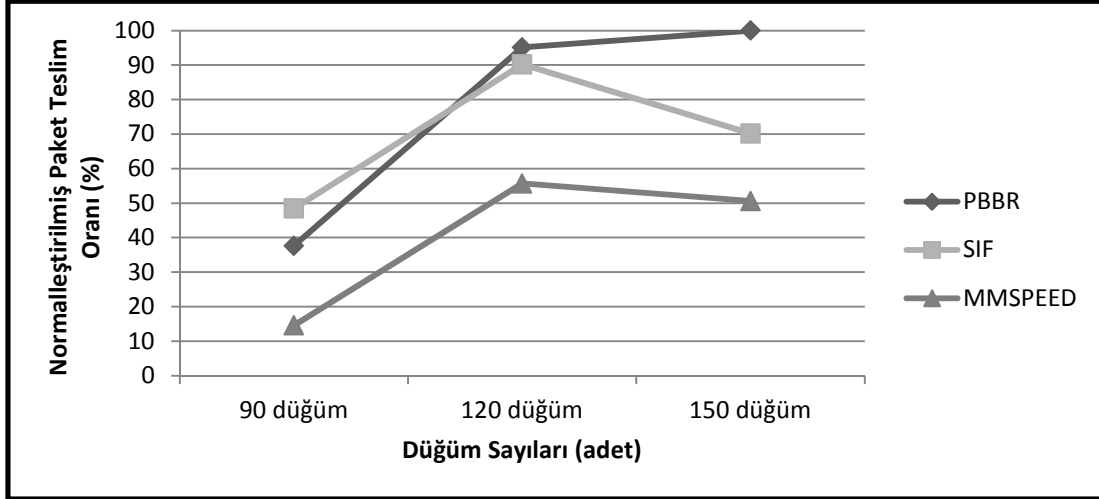
Tablo 7.8'deki değerlere göre PTO değeri bakımından yüksek öncelikli verilerde PBBR protokolü MMSPEED protokolünden %45 ile %95 arasında daha yüksek performans gösterirken; düşük öncelikli verilerde %73 ile %135 arasında daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.8. Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (90 düğüm ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

Düğüm Hareket Hızları	PBBR YÖ	PBBR DÖ	MMSPEED YÖ	MMSPEED DÖ
Hareketsiz	58,77	53,40	41,27	30,96
0.1 metre / saniye	76,41	67,02	42,02	31,94
1 metre / saniye	100	78,82	51,21	36,93

Şekil 7.5'e bakıldığında farklı düğüm yoğunluklarının hepsi için PBBR protokolünün PTO değerinin yükseldiği görülür. SIF ve MMSPEED protokollerinin PTO değerleri düğüm yoğunluğu belirli bir değeri aştığında düşmektedir.

Tablo 7.9'daki değerlere göre farklı düğüm yoğunluklu ağlarda PTO bakımından SIF protokolü PBBR protokolünden ortalama %16 daha yüksek performans gösterirken, PBBR protokolü MMSPEED protokolünden %70 ile %157 arasında daha yüksek performans göstermektedir.

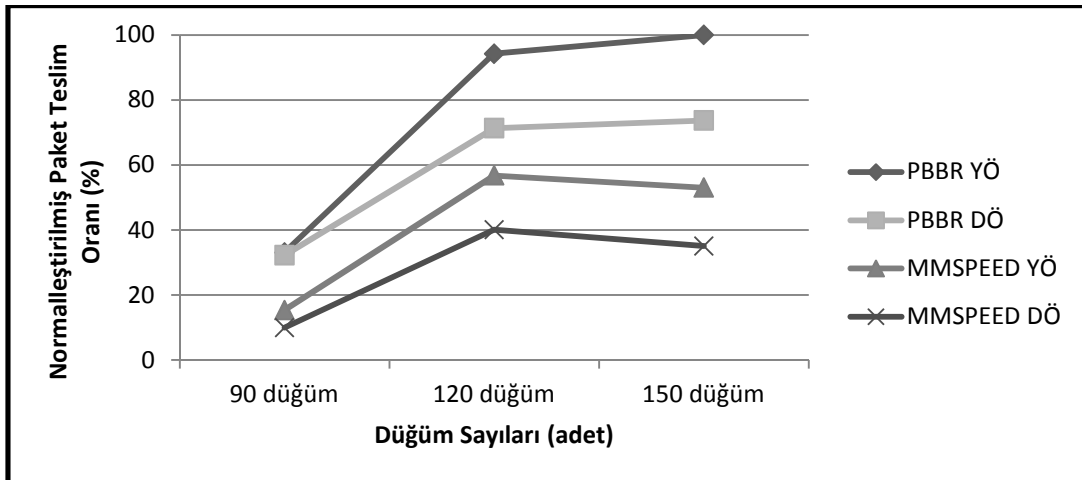


Şekil 7.5. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

Tablo 7.9. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

Düğüm Sayısı	PBBR	SIF	MMSPEED
90 düğüm	37,60	48,39	14,55
120 düğüm	95,11	90,18	55,70
150 düğüm	100	70,14	50,60

Şekil 7.6'ya bakıldığında PBBR protokolünün tüm düğüm yoğunluklarında PTO değerinin arttığı görülür. Ancak MMSPEED protokolünde PTO değeri belirli bir düğüm yoğunluğuna kadar artarken sonrasında azalmaktadır.



Şekil 7.6. Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

Tablo 7.10'daki değerlere göre PTO değeri bakımından yüksek öncelikli verilerde PBBR protokolü MMSPEED protokolünden %66 ile %114 arasında daha yüksek performans gösterirken; düşük öncelikli verilerde %78 ile %222 arasında daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.10. Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre normalleştirilmiş PTO değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket/saniye paket üretim hızı)

Düğüm Sayısı	PBBR Y	PBBR D	MMSPEED Y	MMSPEED D
90 düğüm	33,08	32,26	15,36	9,95
120 düğüm	94,23	71,32	56,78	40,05
150 düğüm	100	73,68	53,01	35,04

Farklı ağ yoğunlukları, düğüm hareket hızları ve düğümlerin veri paketi üretim hızları için yapılan benzetimlerden elde edilen şekiller ve tablolar değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Farklı düğüm hareket hızlarının hepsi için PTO değeri bakımından en yüksek performansı SIF protokolü göstermektedir. Ancak SIF protokolü boşluk yönetimi kullanmadığından boşluk bölgesindeki düğümlerin veri paketlerini iletmez ve kapsama alanını daraltır.

PTO değeri bakımından PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre daha yüksek performans göstermektedir. Düğüm yoğunluğu belirli bir değerden fazla arttığında MMSPEED protokolünde düğümler komşuluk tablolarındaki bilgileri yeterince hızlı gncelleyemediğinden yanlış yönlendirme kararları almakta ve PTO değeri düşmektedir.

Düğümlerin veri paketi üretim hızları arttığında ağdaki trafik miktarı artmakta ve PTO değerleri her üç protokol için düşmektedir.

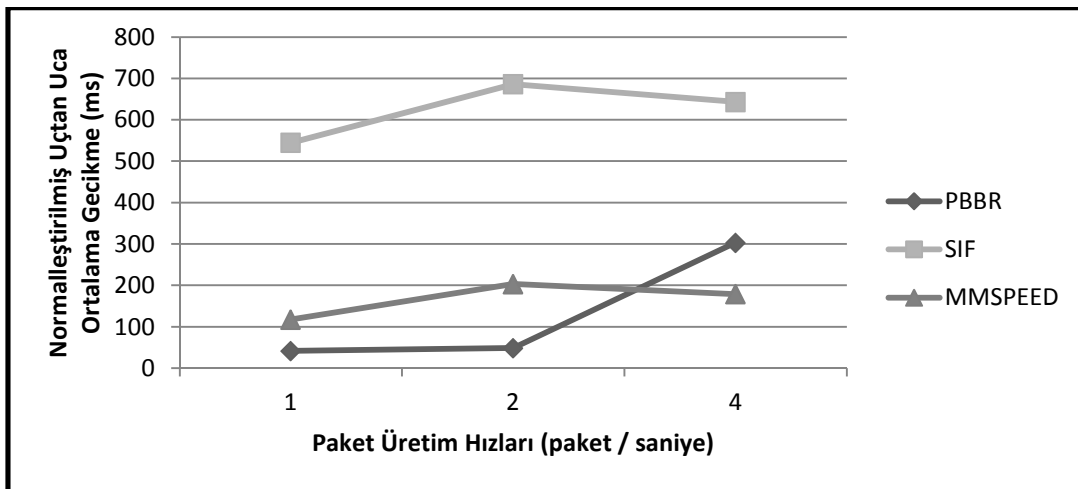
Artan düğüm sayısıyla birlikte düğüm yoğunluğu ve bağlantılılık artar. Bağlantılılığın artmasıyla ağda boşluk bölgeleri azalır ve boşluk yönetimi ihtiyacı azalır. Bu durum PBBR protokolü için avantaj sağlar.

Sonuç olarak farklı ağ yoğunlukları, düğüm hareket hızları ve düğümlerin veri paketi üretim hızları için PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre hem yüksek öncelikli hem de düşük öncelikli verilerde PTO değeri bakımından daha iyi performans göstermektedir.

7.4. Ortalama Paket Gecikmesi

Uçtan uca ortalama paket gecikmesi (UOPG), ağdaki veri gönderici düğümlerin gönderdikleri paketlerin, nihai hedefe ulaşması sürecinde geçen ortalama gecikme değerini belirleyen bir performans ölçütüdür. UOPG değerinin düşmesi sistemin performansının yüksek olduğunun bir göstergesidir. Gecikme değeri kuyruk gecikmesi, anahtarlama gecikmesi ve yayılım gecikmesi değerlerinin toplamıdır.

Şekil 7.7'ye bakıldığında her üç protokolde de düğümlerin 1 ve 2 paket / saniye veri paketi üretim hızları için UOPG değerinin arttığı görülür. Düğümlerin 1 ve 2 paket / saniye veri paketi üretim hızları için en iyi UOPG değerini PBBR protokolü elde etmektedir. Veri paketi üretim hızı 4 paket / saniye için MMSPEED protokolü PBBR protokolünden UOPG performansı bakımından daha yüksek performans göstermesine rağmen PTO değeri bakımından daha düşük performans göstermektedir. Farklı paket üretim hızları için SIF protokolünün uçtan uca gecikme değeri hem PBBR hem de MMSPEED protokolünden daha yüksektir.



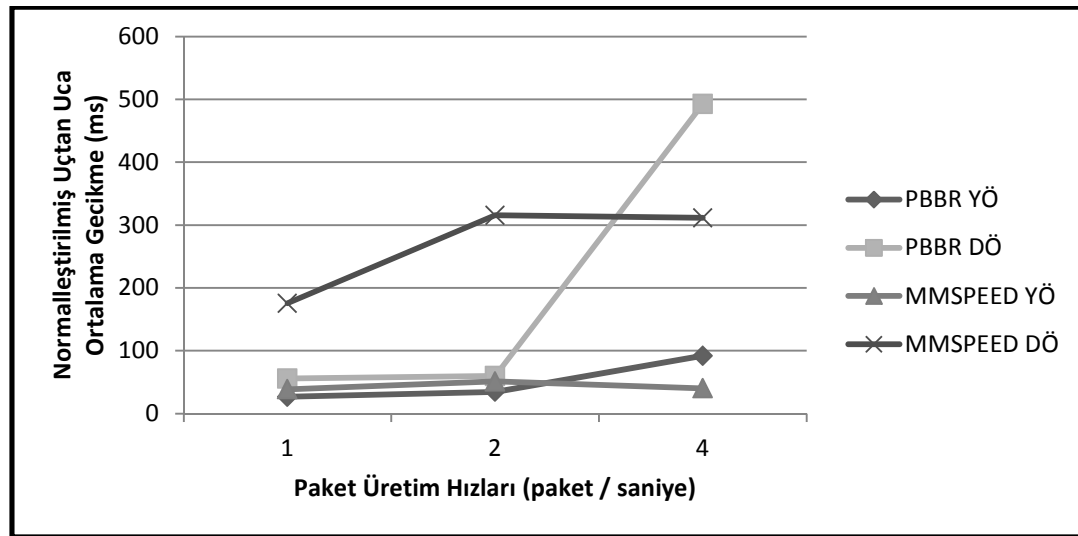
Şekil 7.7. Farklı paket üretme hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Tablo 7.11'deki değerlere göre UOPG değeri bakımından PBBR protokolü SIF protokolünden çok daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.11. Farklı paket üretme hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Paket Üretim Hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
0,5 paket / saniye	41,76	544,44	117,36
1 paket / saniye	48,59	686,15	203,16
2 paket / saniye	303,05	643,08	178,98

Şekil 7.8'e bakıldığında düğümlerin 1 ve 2 paket / saniye veri üretim hızları için PBBR ve MMSPEED protokolleri için hem yüksek öncelikli hem de düşük öncelikli veriler için UOPG değerinin arttığı görülür. Tablo 7.12'deki değerlere göre UOPG bakımından yüksek öncelikli veriler için PBBR protokolü MMSPEED protokolünden ortalama %17 daha düşük performans gösterirken, düşük öncelikli veriler için ortalama %31.8 daha yüksek performans göstermektedir.

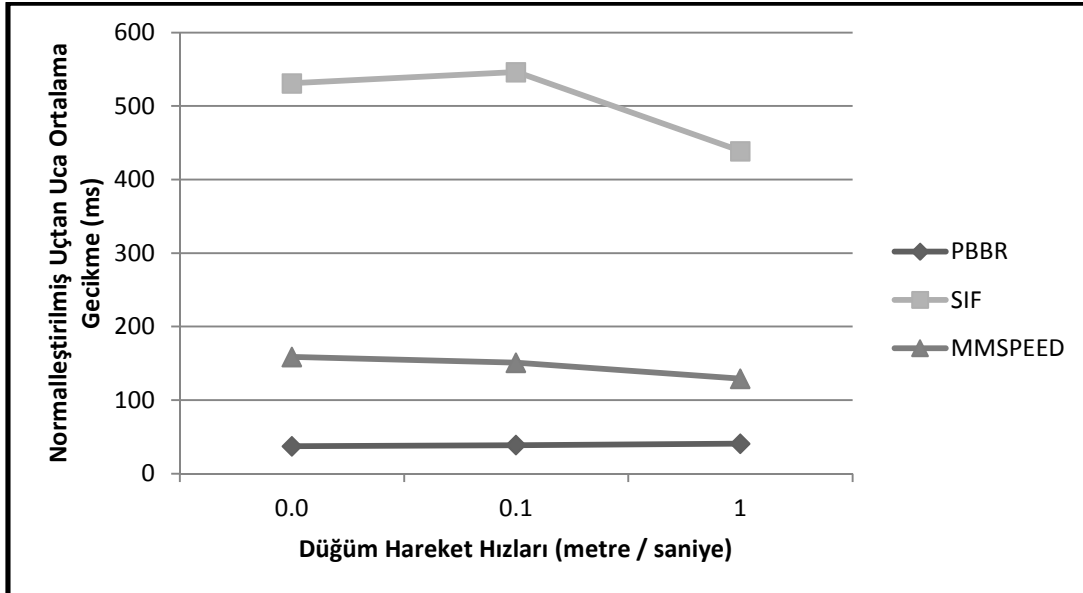


Şekil 7.8. Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Tablo 7.12. Farklı paket üretme hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Paket Üretim Hızları	PBBR YÖ	PBBR DÖ	MMSPEED YÖ	MMSPEED DÖ
0,5 paket / saniye	26,81	55,790	38,62	175,33
1 paket / saniye	34,63	59,90	51,22	315,40
2 paket / saniye	91,82	492,54	40,29	311,36

Şekil 7.9'a bakıldığında düğümlerin farklı hareket hızları için en düşük UOPG değerlerinin PBBR protokolü tarafından gerçekleştirildiği görülür. Farklı düğüm hareket hızlarının hepsi için SIF protokolünün uçtan uca gecikme değeri hem PBBR hem de MMSPEED protokolünden daha yüksektir.



Şekil 7.9. Farklı düğüm hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)

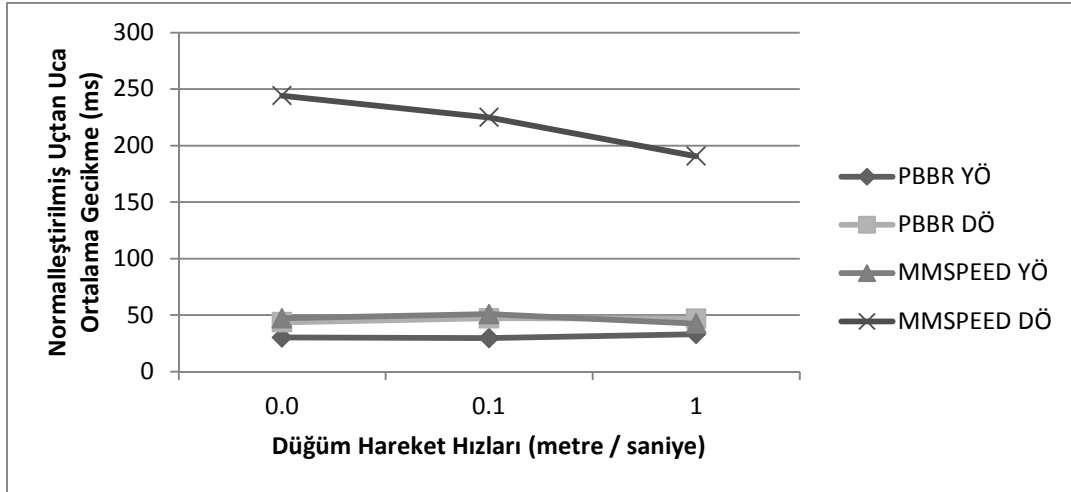
Tablo 7.13'deki değerlere göre UOPG bakımından PBBR protokolü hem SIF hem de MMSPEED protokolünden çok daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.13. Farklı düğüm hızlarında UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)

Düğüm Hareket Hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
Hareketsiz	37,18	530,89	158,62
0.1 metre / saniye	38,80	546,16	150,86
1 metre / saniye	40,81	438,51	128,99

Şekil 7.10'a bakıldığında düğümlerin farklı hareket hızlarında hem yüksek öncelikli hem düşük öncelikli veriler için PBBR protokolünün MMSPEED protokolüne göre daha düşük UOPG değerleri elde ettiği görülür.

Tablo 7.14'deki değerlere göre UOPG değeri bakımından yüksek öncelikli verilerde PBBR protokolü MMSPEED protokolünden ortalama %51 daha yüksek performans göstermesinin yanında, düşük öncelikli verilerde ortalama %378 daha yüksek performans göstermektedir.

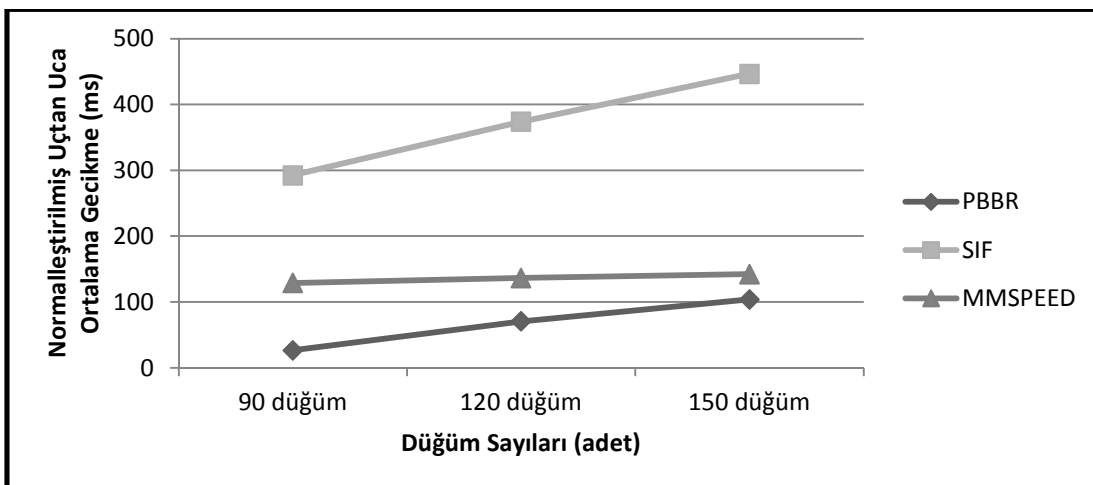


Şekil 7.10. Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)

Tablo 7.14. Farklı düğüm hızlarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretim hızı)

Düğüm Hareket Hızları	PBBR YÖ	PBBR DÖ	MMSPEED YÖ	MMSPEED DÖ
Hareketsiz	30,19	43,67	47,15	244,21
0.1 metre / saniye	29,71	47,27	50,86	224,94
1 metre / saniye	33,21	46,90	42,60	190,66

Şekil 7.11 ve Tablo 7.15'e bakıldığında düğüm yoğunluğu arttıkça her üç protokolün UOPG değeri artarken farklı düğüm yoğunluklarında en iyi UOPG değerini PBBR protokolünün elde ettiği görülmektedir.



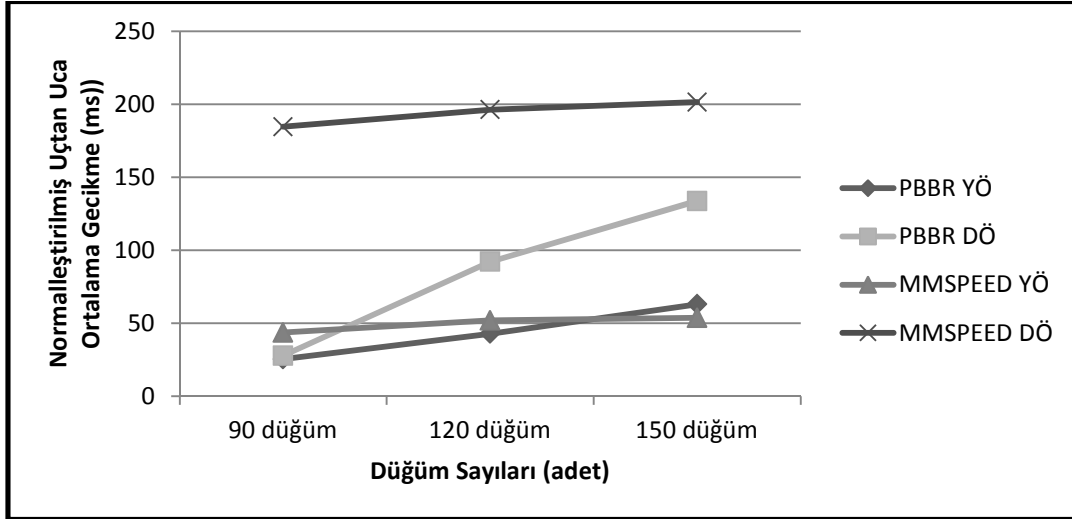
Şekil 7.11. Farklı düğüm yoğunluklarında UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Tablo 7.15’deki değerlere göre farklı düğüm sayılarında SIF protokolünün uçtan uca gecikme değeri hem PBBR hem de MMSPEED protokolünden daha yüksektir.

Tablo 7.15. Farklı düğüm yoğunluklarında UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Düğüm Sayısı	PBBR	SIF	MMSPEED
90 düğüm	26,62	292,40	128,84
120 düğüm	70,64	374,02	136,47
150 düğüm	103,88	446,66	142,18

Şekil 7.12 yüksek ve düşük öncelikli veriler için hem PBBR protokolü hem de MMSPEED protokolünde UOPG değerinin arttığını göstermektedir.



Şekil 7.12. Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Tablo 7.16’deki değerlere göre UOPG değeri bakımından PBBR protokolü MMSPEED protokolünden yüksek öncelikli verilerde ortalama %13.7 ve düşük öncelikli verilerde ortalama %129.4 daha yüksek performans göstermektedir.

Tablo 7.16. Farklı düğüm yoğunluklarında veri önceliklerine göre UOPG değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

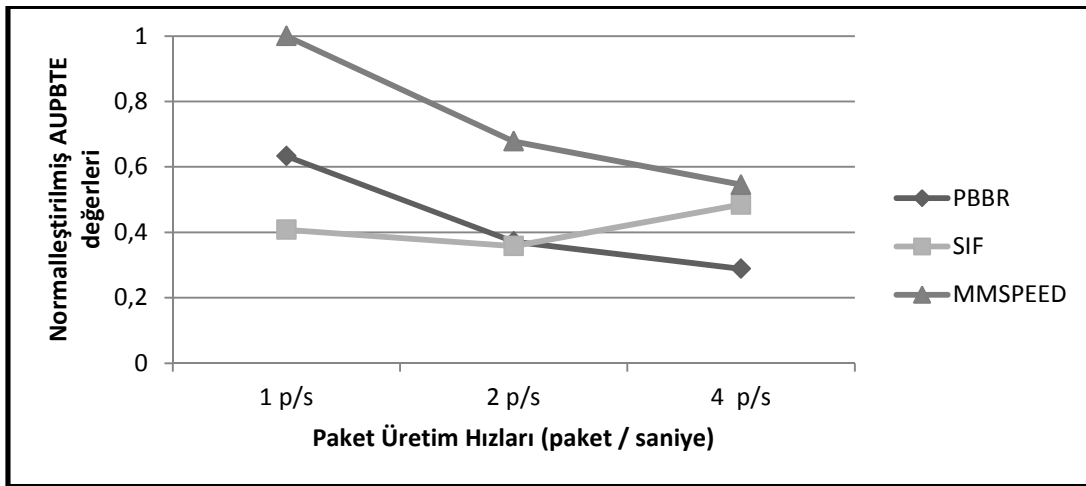
Düğüm Sayısı	PBBR YÖ	PBBR DÖ	MMSPEED YÖ	MMSPEED DÖ
90 düğüm	25,38	27,85	43,60	184,53
120 düğüm	42,80	92,17	51,97	196,21
150 düğüm	63,04	133,70	53,72	201,35

Sonuç olarak PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre yüksek öncelikli verilerde UOPG değeri bakımından daha yüksek performans göstermesinin yanında, düşük öncelikli verilerde de daha yüksek performans göstermektedir.

7.5. Enerji Tüketimi

Çoğu uygulamada, doğrudan ağ yaşamı ile ilgili olan enerji korunumu veri gönderme kalitesi kadar önemlidir. Performans bakımından, alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerji (AUPBTE) değerinin düşmesi iyi bir göstergedir.

Düğümün veri paketi üretim hızı arttıkça AUPBTE değerinin her üç protokolda de düştüğünün görülmesinin yanında, en yüksek AUPBTE değerine MMSPEED protokolünün sahip olduğu görülmektedir (Şekil 7.13). Tablo 7.17'ye bakıldığında AUPBTE değeri bakımından PBBR protokolünün MMSPEED protokolüne göre %58 ile %92 arasında daha düşük olduğu görülür.

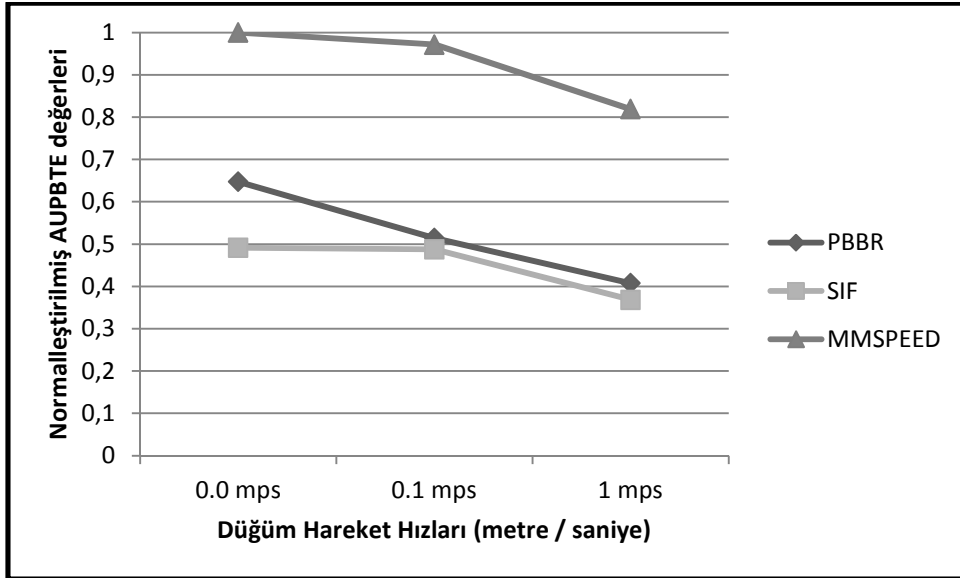


Şekil 7.13. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Tablo 7.17. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Paket Üretim Hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
0.5 paket / saniye	0,63	0,40	1
1 paket / saniye	0,37	0,35	0,67
2 paket / saniye	0,28	0,48	0,54

Şekil 7.14'e bakıldığında düğüm hareket hızı arttıkça AUPBTE değeri bakımından her üç protokolün daha iyi performans sergilediği görülmektedir. AUPBTE değeri bakımından en iyi performansı SIF protokolü gerçekleştirirken en kötü performansı MMSPEED protokolü gerçekleştirmektedir.



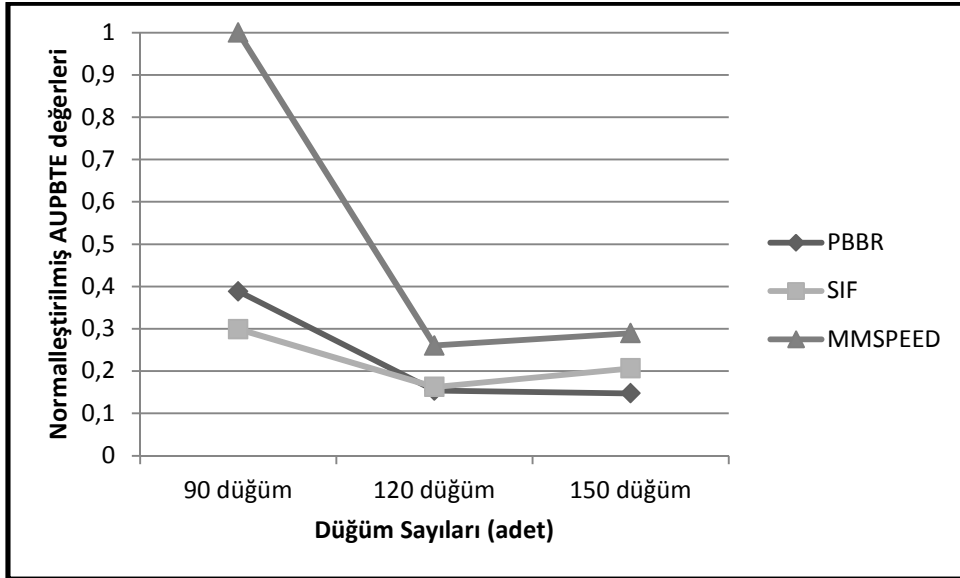
Şekil 7.14. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Tablo 7.18'e bakıldığında AUPBTE değeri bakımından SIF protokolünün PBBR protokolüne göre %5 ile %30 arasında daha iyi ve PBBR protokolünün MMSPEED protokolüne göre %55 ile %100 arasında daha iyi performans sergilediği görülür.

Tablo 7.18. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Düğüm hareket hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
Hareketsiz	0,64	0,49	1
0.1 metre / saniye	0,51	0,48	0,97
1 metre / saniye	0,40	0,36	0,82

Şekil 7.15'e bakıldığında düğüm yoğunluğu arttıkça her üç protokolün AUPBTE değeri artarken en düşük değerlere SIF protokolünün sahip olduğu görülmektedir. Tablo 7.19'a bakıldığında AUPBTE değeri bakımından PBBR protokolünün MMSPEED protokolüne göre %68 ile %157 arasında daha düşük olduğu görülür.



Şekil 7.15. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Tablo 7.19. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerjinin değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Düğüm Sayısı	PBBR	SIF	MMSPEED
90 düğüm	0,38	0,29	1
120 düğüm	0,15	0,16	0,26
150 düğüm	0,14	0,20	0,28

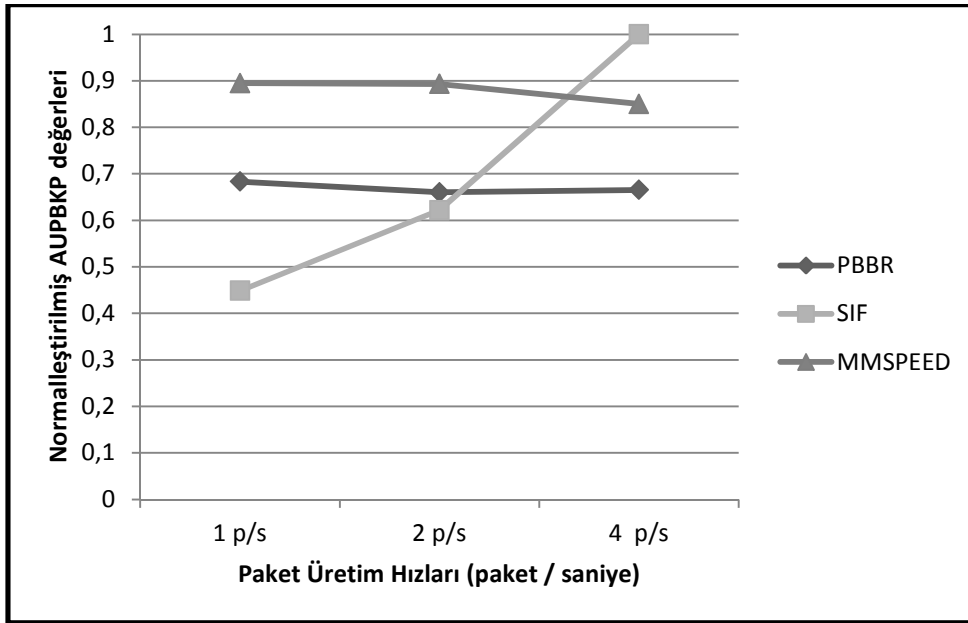
Sonuç olarak farklı düğüm hareket hızları, düğümlerin veri paketi üretim hızları ve düğüm yoğunlukları için PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre AUPBTE değeri bakımından daha düşük değerler üreterek üstünlük sağlamaktadır. Tüm yapılan benzetimlerin sonucunda PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre AUPBTE değeri bakımından en az %55 daha yüksek performans göstermektedir.

7.6. Yönlendirme Yüğü

Yönlendirme yüğü bant genişliği ve enerji gibi kaynakların hangi verimlilikte kullanıldığını gösteren önemli bir performans ölçütüdür. Alıcıya ulaşan veri paketi başına kullanılan kontrol paket sayısı (AUPBKP) olarak ifade edilir. AUPBKP değerinin düşük olması iyi bir göstergedir.

Benzetim programıyla elde edilen yönlendirme yükü sonuçları performans değerlerinin daha net görülebilmesi için hem grafik hem de tablo olarak ifade edilmiştir.

Şekil 7.16'ya bakıldığında düğümlerin veri paketi üretim hızları arttıkça AUPBKP değerinin her üç protokolde de arttığı görülür. AUPBKP değeri en düşük SIF protokolünde ve en yüksek MMSPEED protokolündedir.



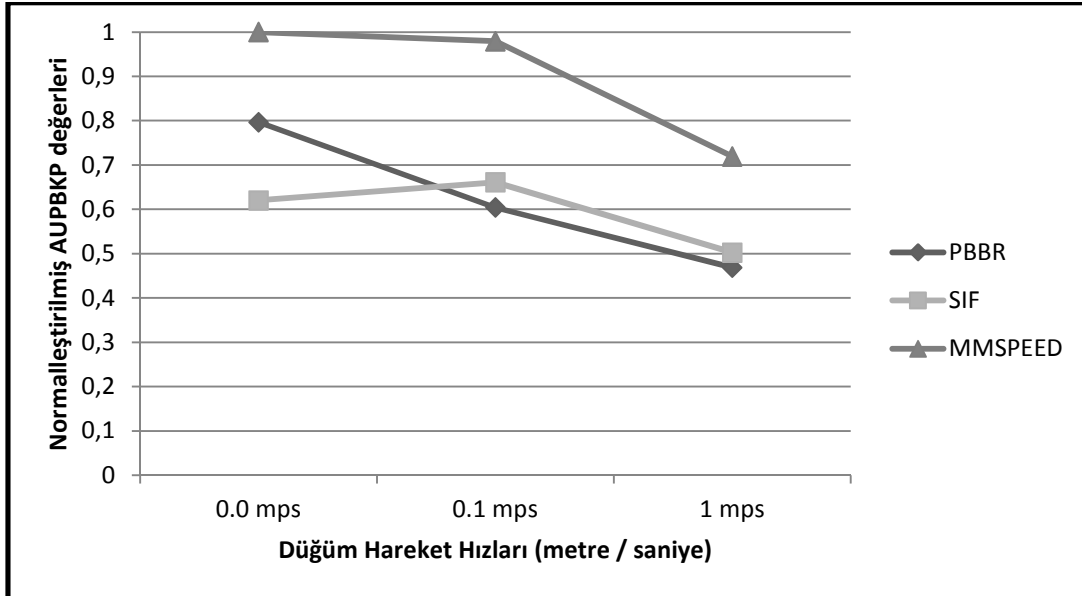
Şekil 7.16. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısının değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Tablo 7.20'deki değerlere göre AUPBKP bakımından farklı veri paketi üretim hızları için PBBR protokolü SIF protokolüne göre ortalama %3 daha iyi performans göstermesinin yanında, PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre %27 ile %38 arasında daha iyi performans göstermektedir.

Tablo 7.20. Farklı paket üretme hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısının değerleri (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Paket üretim hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
0.5 paket / saniye	0,68	0,44	0,89
1 paket / saniye	0,66	0,62	0,89
2 paket / saniye	0,66	1	0,85

Şekil 7.20'ye bakıldığında AUPBKP bakımından en kötü performansı MMSPEED protokolünün gerçekleştirdiği görülür.



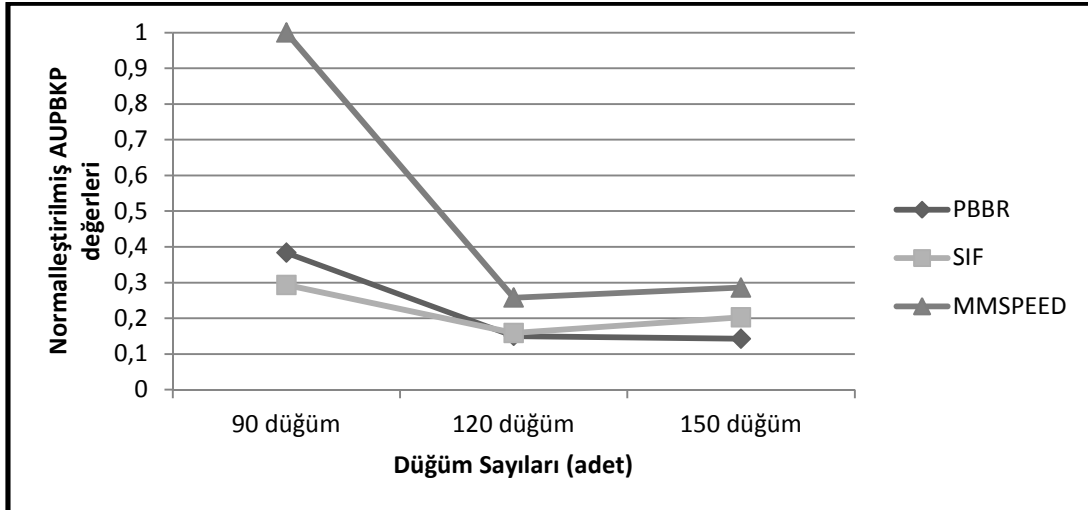
Şekil 7.17. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Tablo 7.21'deki değerlere göre AUPBKP bakımından PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre %26 ile %62 arasında daha iyi performans göstermektedir. Düğümlerin düşük hızlarda hareket etmesi durumunda her üç protokolde de alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı düşmektedir.

Tablo 7.21. Farklı düğüm hızlarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Düğüm hareket hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
Hareketsiz	0,79	0,62	1
0.1 metre / saniye	0,60	0,66	0,98
1 metre / saniye	0,47	0,50	0,72

Şekil 7.18'e bakıldığında farklı düğüm yoğunluklarında AUPBKP bakımından en düşük performansı MMSPEED protokolü gösterirken; PBBR ve SIF protokolleri yakın performans göstermektedir. Tablo 7.22'deki değerlere göre AUPBKP bakımından PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre %71 ile %160 arasında daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 7.18. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Tablo 7.22. Farklı düğüm yoğunluklarında normalleştirilmiş alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı değerleri (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Düğüm Sayısı	PBBR	SIF	MMSPEED
90 düğüm	0,38	0,29	1
120 düğüm	0,15	0,15	0,25
150 düğüm	0,14	0,20	0,28

Sonuç olarak farklı düğüm hareket hızları, düğümlerin veri paketi üretim hızları ve düğüm yoğunlukları için PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre AUPBKP bakımından daha yüksek performans göstermektedir. Tüm yapılan benzetimlerin sonucunda PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre AUPBKP bakımından en az %26 daha iyi performans vermektedir.

7.7. Kapsama Alanı

Enerjisi biten düğümler daha fazla veri algılayamaz ve üretmez. Bu durumda araştırma yapılan sahanın bir kısmından veri elde edilemez ve ağıın kapsama alanı daralmış olur. Ayrıca kapsama alanı yönlendirme protokolü tarafından veri paketlerinin dikkate alınmadığı düğümler olduğunda da daralır. Kapsama alanı daralmış bir sahadan yeterli bilgi elde edilemeyeceği için saha üzerinde yapılacak müdahalenin gerekliliği, zamanı ve türü kestirilemez. Bu nedenle kapsama alanı her uygulamada önem arz eden bir unsurdur.

Yaşayan düğüm olarak ifade edilen enerjisi bitmemiş düğüm sayıları kapsama alanını ifade eder.

Benzetim sonlandığında yaşayan düğüm sayısı bakımından paket üretim hızlarının hepsi için PBBR protokolü en iyi durumdadır (Tablo 7.23).

Tablo 7.23. Farklı paket üretim hızları için süre dolduğunda yaşayan düğüm sayıları (90 düğüm ve düğümler hareketsiz)

Paket üretme hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
1 paket / saniye	3	1	1
2 paket / saniye	2	2	1
4 paket / saniye	2	1	1

Benzetim sonlandığında yaşayan düğüm sayısı bakımından değişik düğüm hareket hızlarında PBBR protokolü en iyi durumdadır (Tablo 7.24).

Tablo 7.24. Farklı düğüm hareket hızları için süre dolduğunda yaşayan düğüm sayıları (90 düğüm ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Düğüm hareket hızları	PBBR	SIF	MMSPEED
Hareketsiz	2	1	1
0.1 metre / saniye	2	1	1
1 metre / saniye	3	1	1

Benzetim sonlandığında yaşayan düğüm sayısı bakımından farklı düğüm sayılarında PBBR protokolü en iyi durumdadır (Tablo 7.25).

Tablo 7.25. Farklı düğüm sayıları için süre dolduğunda yaşayan düğüm sayıları (düğümler hareketsiz ve 1 paket / saniye paket üretme hızı)

Düğüm sayıları	PBBR	SIF	MMSPEED
90 düğüm	2	1	1
120 düğüm	2	2	1
150 düğüm	4	1	2

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, kablosuz algılayıcı ağlarda veri önceliği kaynak düğüm tarafından belirlenen tüm verileri nihai hedef alıcıya gönderirken; kayıp ve gecikme kısıtlı olduklarından yüksek öncelikli verilere daha iyi hizmet sağlayan yeni bir yönlendirme protokolü tasarlanmış ve başarımları analizi yapılmıştır. PBBR protokolünü diğerlerinden farklı kılan özellikleri, düğümlerin yük dağılımını ve enerji tüketimini dengeleyerek düğüm ölümlerinin azaltılması yoluyla ağ ömrünü uzatması, boşluk yönetimi kullanılarak uygulama sahasının her bölgesinden veri alınabilmesini sağlaması ve daha az bellek kullanmasıdır. PBBR protokolünün diğer bir önemli özelliğide kullandığı işaretli mekanizma sayesinde senkronize olmaksızın enerji etkinliğini sağlayacak her türlü uyku düzenine uyumluluk gösterebilmesidir.

Tez çalışması kapsamında önerilen PBBR protokolü, konum tabanlı yönlendirme protokollerinden SIF protokolü ve öncelik tabanlı yönlendirme protokollerinden MMSPEED protokolü ile karşılaştırılarak başarımları incelenmiştir. Sonuçlar grafiklerle analiz edilmiştir.

PBBR protokolünde sonraki atlama düğümü, iletim başarı oranı yüksek, kuyruk doluluk değeri düşük ve hedefe pozitif ilerleme mesafesi en iyi düğümler arasından seçildiğinden yük düğümlere daha dengeli dağıtılır. Bu sayede yapılan benzetimlerde PBBR protokolü SIF protokolüne göre düğümlerin paket üretim hızı artırıldığında paket teslim oranı bakımından, daha yüksek performans göstermektedir.

Boşluk bölgesiyle karşılaşan bir düğüm, SIF protokolünde pasif konuma geçerken PBBR protokolünde paketlerini boşluk yönetimi kullanarak gönderir Boşluk

yönetimi nedeniyle daha uzun yoldan gönderilen paketler düğümlerin hareket hızı arttığında olası topoloji değişimlerinden yararlanarak paketleri daha kısa yollardan da gönderebilir. Dolayısıyla düğümlerin hareketliliği arttığında PBBR protokolü SIF protokolüne göre paket teslim oranı bakımından daha hızlı yükselen bir performans artışı göstermektedir.

Paket teslim oranı bakımından yapılan benzetimlerde düğüm sayısının artırılması durumunda PBBR protokolünün performansı yükselmeye devam ederken SIF protokolünün performansı düşmektedir. Düğüm sayısı arttığında ortama erişim hakkı elde etmek için yarışacak düğüm sayısı artacağından iyi bir önlem alınmaması durumunda iletim başarı oranı düşer. PBBR protokolünde sonraki atlama düğümü seçiminde düğümlerin iletim başarı oranı değeri kullanıldığından başarılı iletim sayısı ve paket teslim oranı artar.

PBBR protokolünde sonraki atlama düğümün seçilmesi sürecine katılan her düğüm kendine ait iletim başarı oranı, ileri düğüme gönderme oranı, ortalama mesafe dilimi gibi istatistiki bilgileri kullandığından SIF protokolüne göre daha uyarlanabilir bir yapıdadır. Yapılan benzetimlerde uyarlanabilir yapısı sayesinde PBBR protokolü SIF protokolüne göre daha düşük ortalama paket gecikmesi elde etmektedir.

Düğümlerin paket üretim hızı, hareket hızı ya da sayısı arttığında alıcıya ulaşan veri paketi başına kontrol paketi sayısı bakımından PBBR protokolü SIF protokolüne göre daha hızlı uyum sağlar ve performansını daha hızlı artırır. Alıcıya ulaşan veri paketi başına kontrol paketi sayısı, düğümlerin paket üretim hızı arttığında SIF protokolünde hızla yükselirken PBBR protokolünde düşme etkisi göstermektedir. Düğüm hareket hızları arttığında alıcıya ulaşan veri paketi başına kontrol paketi sayısı SIF protokolüne göre PBBR protokolünde daha hızlı düşmektedir. Yapılan benzetimlerde düğüm sayısı artırıldığında SIF protokolünün alıcıya ulaşan veri paketi başına kontrol paketi sayısı PBBR protokolüne göre artmaktadır.

PBBR protokolünde işaretli alt yapı kullanıldığından gereksiz trafik azaltılırken sonraki atlama düğümünün seçiminde daha doğru kararlar verilmektedir. Bu becerisi sayesinde PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre paket teslim oranı

bakımından hem yüksek öncelikli hem de düşük öncelikli veri paketlerinde daha yüksek performans göstermektedir.

PBBR protokolünde düğümler kendisine ait tuttıkları ileri düğüme gönderme oranı ve iletim başarı oranı değerlerini kullanarak sonraki atlama düğümünün seçimi sürecine katıldığından başarılı iletim sayısı artmaktadır. Bu becerisi sayesinde PBBR protokolü MMSPEED protokolüne göre uçtan uca ortalama paket gecikme bakımından hem yüksek öncelikli hem de düşük öncelikli veri paketlerinde daha yüksek performans göstermektedir:

PBBR protokolünde sonraki atlama düğümünün seçilmesinde paket tutucu düğümün gönderdiği iletim deneme yönü bilgisinin kullanılmasıyla gereksiz iletim sayısı azaltılmakta ve alıcıya ulaşan paket başına tüketilen enerji miktarı azalmaktadır.

İşaretsiz alt yapı kullanıldığından düğümler aralarında komşuluk bilgisinin karşılıklı değiştirilmediği PBBR protokolünde alıcıya ulaşan paket başına kontrol paketi sayısı MMSPEED protokolüne göre daha düşük gerçekleşmektedir.

Çalışmanın getirdiği katkılar:

- Kablosuz algılayıcı ağlar için “öncelik tabanlı” protokoller sınıfında PBBR adında yeni bir protokol tasarlanmıştır. Tasarlanan protokol ağın bant genişliğini ve düğümlerin batarya ömürlerini daha etkin kullanmayı amaçlamıştır.
- Tasarlanan PBBR protokolü, diğer öncelik tabanlı protokollerin yönlendirme kararı verirken kullanmak için oluşturduğu yönlendirme tablosu ya da komşuluk tablosu oluşturmadığından ek trafik yükünü artırmamaktadır.
- Tasarlanan PBBR protokolünde bellek kullanım oranı belirgin seviyede azaltılmıştır.
- Tasarlanan PBBR protokolünde kullanılan paketlerin çerçeve yapıları belirlenmiştir.

- Omnet++ benzetim aracının Mixim modelleri kullanılarak tasarlanan protokolün benzetimi yapılmıştır.
- Bilinen bir yöntemi yeni bir alana uygulama bakımından: İşaretsiz yönlendirme becerileri öncelik tabanlı protokole alt yapı sağlamıştır.

8.2. Tartışma ve Öneriler

Bu tezden elde edilen sonuçlar ve katkılar doğrultusunda gelecekte yapılabilecek çalışmalar şunlardır:

1. Tasarlanan yönlendirme protokolünün daha iyi optimize edilmesi amacıyla yapay zekâ tekniklerinden faydalanılabilir.
2. Tasarlanan yönlendirme protokolü MAC ve yönlendirme katmanı işbirliği ile çalışmaktadır. Yönlendirme kararlarının alınmasında fiziksel katmanın sağlayacağı bilgilerden yararlanarak performans artırılabilir.
3. Tasarlanan PBBR protokolü günümüz kablosuz algılayıcı düğümleri üzerinde ek bir donanıma ihtiyaç duymadan çalışabilir. Bu sebeple, fiziksel olarak ticari algılayıcı düğümleri üzerinde gerçekleştirilebilir.
4. Tasarlanan PBBR protokolü kablosuz algılayıcı düğümlerin kendi konumlarının farkında olduğu varsayımı üzerine çalışmaktadır. Konum bilgisini daha kesin, daha hızlı ve maliyetsiz bulabilen konum bulma protokolleri ya da kablosuz algılayıcı düğüm tasarımı gerçekleştirilebilir. Kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarının çoğunda ölçülen verilerin hangi konumdan geldiği bilgisi gün geçtikçe daha fazla önem arz etmektedir.
5. Konum bulma hatalarının tasarlanan PBBR protokolünün performansına etkisi ile ilgili çalışmalar yapılabilir.
6. Tasarlanan PBBR protokolü üzerine güvenlik ile ilgili çalışmalar yapılabilir.

7. Uygulama sahasından elde edilen verilerin güvenilirliğini ve ağın performansını artırma gibi nedenlerden dolayı günümüz uygulamalarında çoklu alıcı kullanımı yaygınlaşmaktadır. Tasarlanan PBBR protokolünde çoklu alıcı kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] HUANG, X., FANG, Y., End-To-End Delay Differentiation By Prioritized Multipath Routing In Wireless Sensor Networks, Military communications conference (MILCOM), vol. 2, pp. 1277–1283, 2005.
- [2] KUMAR, R., ROWAIHY, H., CAO, G., ANJUM, F., YENER, A., PORTA, T.L., Congestion Aware Routing in Sensor Networks, Teknik Rapor, http://nsrc.cse.psu.edu/tech_report. 2006.
- [3] BOUKERCHE, A., ARAUJO, R.B., VILLAS, L., A Novel QoS based routing protocol for Wireless Actor and Sensor Networks, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), pp. 4931-4935, November 2007.
- [4] JAFARIAN, M., JASEEMUDDIN, M., Routing of Emergency Data in a Wireless Sensor Network for Mines, IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 2813-2818, May 2008.
- [5] GELENBE, E., NGAI, E., YADAV, P., Routing of High Priority Packets In Wireless Sensor Networks, Defence - Security and Sensing (SPIE), 2009.
- [6] HEY, L., GELENBE, E., Adaptive Packet Prioritisation for Wireless Sensor Networks, Next Generation Internet Networks (NGI), pp. 1-7, 1-3 July 2009.
- [7] CHEN, J., ZHOU, M., LI, D., SUN, T., A Priority based Dynamic Adaptive Routing Protocol for Wireless Sensor Networks, First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS), pp. 160-164, 1-3 Nov. 2008.
- [8] KANDASAMY, T., KRISHNAN, J.K., Using Multipath Priority Routing for Solar Powered Wireless Sensor Networks, International Symposium on Information Technology (ITSim). , vol. 4, pp. 1-6, 26-28 Aug. 2008.
- [9] FELEMBAN, E., LEE, C.G.; EKİCİ, E. , MMSPEED: Multipath Multi-SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.5, no.6, pp. 738- 754, June 2006.
- [10] AKYILDIZ, I.F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y, ÇAYIRCI, E., A Survey on Sensor Networks, IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, August 2002

- [11] CHONG, C.Y., KUMAR, S.P., Sensor Networks: Evolution Opportunities and Challenges, Proceedings of the IEEE, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, 2003
- [12] TAYŞI, Z.C., Telsiz Algılayıcı Düğüm Tasarımı ve Gerçeklenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
- [13] SOHBARY, K., MINOLI, D., ZNATI, T., Wireless Sensor Networks Technology Protocols and Applications, John Wiley & Sons Inc., USA, 2007
- [14] POTDAR, V., SHARIF, A., CHANG, E., Wireless Sensor Networks: A Survey, Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), pp. 636 - 641, 2009
- [15] BACHIR, A., DOHLER, M., WATTEYNE, T., LEUNG, K.K., MAC Essentials for Wireless Sensor Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, pp. 222 - 248, 2010.
- [16] LANGENDOEN, K., MEIER, A., Analyzing MAC protocols for low data-rate applications, ACM Trans. on Sensor Networks, vol. 7, pp. 19:1-19:40, September 2010.
- [17] WEI, Y., HEIDEMANN, J., ESTRIN, D., An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, IEEE INFOCOM, vol. 3, pp. 1567–1576, NY, June 2002.
- [18] EL-HOIYDI, A., DECOTIGNIE, J.D., Wisemac: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks. In Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks: First International Workshop (ALGOSENSORS), Finland, July 16 2004.
- [19] POLSTRE, J., HILL, J., CULLER, D., Versatile low power media access for wireless sensor networks, in Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 95–107, 2004.
- [20] HOESEL, L.V., HAVINGA, P., A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks, In 1st Int. Workshop on Networked Sensing Systems (INSS), Tokyo, Japan, June 2004.
- [21] SHEN, C.C., JAIKAE0, C., SRISATHAPORNPHAT, C., Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, ILYAS M., MAHGOUB I., pp. 155-167, 2005.
- [22] DARGIE, W., POELLABAUER, C., Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice, John Wiley and Sons, pp. 168-183, 2010.
- [23] SOHRABY, K., MINOLI, D., ZNATI T. Wireless Sensor Networks Technology, Protocols and Applications, John Wiley and Sons, pp. 38-75, 2007.

- [24] YICK, J., MUKHERJEE, B., GHOSAL D., Wireless sensor network survey, *Comput. Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008
- [25] FOWLER, K.R., The Future of Sensors and Sensor Networks, *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp. 1-6, 2009.
- [26] AL-KARAKI, J.N., KAMAL, A.E., Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey, *IEEE Wireless Communication*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, Dec 2004.
- [27] ACS, G., BUTTYAN, L., Design Principles of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, *Teknik Rapor, CrySyS Lab, Budapest University of Technology and Economics*, February 2010.
- [28] LEMMON, C., LUI, SM., LEE I., Geographic Forwarding and Routing for Ad-Hoc Wireless Network: A Survey, *Fifth International Joint Conference on NCM*, pp.188-195, 25-27 Aug. 2009.
- [29] SEADA, K., HELMY, A., An Overview of Geographic Protocols in Ad Hoc and Sensor Networks, *The 3rd ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications*, pp. 62, 2005.
- [30] KIAH, L.M., QABAJEH, L.K., QABAJEH MM., Unicast Position-Based Routing Protocols for Ad-Hoc Networks, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 7, no. 5, pp. 19-46, 2010.
- [31] GIORDANO, S., STOJMENOVIC, I., BLAZEVIC, L., Position Based Routing Algorithms For Ad Hoc Networks: A Taxonomy, *Ad Hoc Wireless Networking*, pp. 103-136, Kluwer, 2004.
- [32] GE, W., ZHANG, J., XUE, G., Cooperative Geographic Routing In Wireless Sensor Networks, *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pp. 1-7, 23-25 Oct. 2006.
- [33] SANCHEZ, J.A., RUIZ, P.M., PEREZ, R.M., Beacon-Less Geographic Routing Made Practical: Challenges Design Guidelines and Protocols, *IEEE Communications Magazine*, vol.47, no.8, pp.85-91, 2009.
- [34] KAYA, A., ZENGİN, A., EKİZ, H., Comparison of the beacon-less geographic routing protocols in wireless sensor networks, *7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 1093 - 1098, 2011
- [35] HEISSENBUTTEL, M, BRAUN, T., BLR: beacon-less routing algorithm for mobile ad hoc Networks, *Elsevier's Computer Communications Journal*, pp. 1076–1086, 2004.

- [36] FUESSLER, H., WIDMER, J., KAESEMANN, M., MAUVE, M., HARTENSTEIN, H, Contention-Based Forwarding for Mobile Ad Hoc Networks, *Ad Hoc Networks*, vol 1, no 4, pp. 351-369, 2003.
- [37] WITT, M., TURAU, V, BGR: Blind Geographic Routing for Sensor Networks, In *Proc. of the Third Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES)*, pp. 51-61, May 2005.
- [38] CHEN, D.Z., DENG, J., VARSHNEY, PK., A state-free data delivery protocol for multihop wireless sensor networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1818-1823, 2005.
- [39] BLUM, B., HE, T., SON, S., STANKOVIĆ, J., IGF: A statefree robust communication protocol for wireless sensor networks. Technical report, Department of Computer Science, University of Virginia, USA, 2003.
- [40] ZORZI, M, RAO, R, Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp. 349-365, 2003.
- [41] XU, Y., LEE, WC., XU, J., MITCHELL, G., PSGR: priority-based stateless geo-routing in wireless sensor networks, *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*, pp. -680, 2005.
- [42] CHEN, D., VARSHNEY, PK., A Survey of Void Handling Techniques For Geographic Routing in Wireless Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.9, no.1, pp. 50-67, 2007.
- [43] BAL, M., LIU, M., SHEN, W., GHENNIWA, H., Localization in cooperative Wireless Sensor Networks: A review, *13th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, pp. 438-443, 22-24 April 2009.
- [44] FRANCESCHINI, F., GALETTO, M., MAISANO, D., MASTROGIACOMO, L., A review of localization algorithms for distributed wireless sensor networks in manufacturing, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 22, pp. 698, 2009.
- [45] HANAVELD, P.T.K., Providing a Standard Platform for Localisation Research, *Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology , Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2008.
- [46] ZHOU, Y., SCHEMBRI, J., LAMON, L., BIRD, J., Analysis Of Stand-Alone Gps For Relative Location Discovery In Wireless Sensor Networks, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 437-441, 3-6 May 2009.

- [47] NUAIMI, K.A, KAMEL, H., A Survey of indoor positioning systems and algorithms, International Conference on Innovations in Information Technology (IIT), pp. 185-190, 25-27 April 2011.
- [48] PENG, B., MAUTZ, R., KEMP, A.H., OCHIENG, W. ve ZENG, Q., On the Effect of Localization Errors on Geographic Routing in Sensor Networks, IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 3136-3140, 19-23 May 2008.
- [49] SHAH, R.C., WOLISZ, A., RABAEY, J.M., On the performance of geographical routing in the presence of localization errors, IEEE International Conference on Communications (ICC), vol.5, pp. 2979- 2985, 16-20 May 2005.
- [50] SEADA, K., HELMY, A., GOVINDAN, R., On the Effect of Localization Errors on Geographic Face Routing in Sensor Networks, Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, (IPSN), pp. 71-80, 26-27 April 2004.
- [51] XIA, F., “QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor-Actuator Networks”, Sensors, pp. 1099-1110, 2008.
- [52] CHEN, D., VARSHNEY, P.K., QoS Support in Wireless Sensor Networks A Survey, Proc. International Conference on Wireless Networks (ICWN), pp. 227-233, USA, 2004.
- [53] GELENBE, E., NGAI, C.H., Adaptive QoS Routing for Significant Events in Wireless Sensor Networks, 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), pp. 410-415, 2008.
- [54] NOH, D., KIM, J., LEE, J., LEE, D., KWON, H., SHIN, H., Priority-based Routing for Solar-Powered Wireless Sensor Networks, 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC), 5-7 Feb. 2007.
- [55] ACS, G., BUTTYAN, L., A Taxonomy of Routing Protocols for Wireless Sensor Networks, Teknik Rapor, BUTE Telecommunication department, 2007.
- [56] BIRADAR, R.V., PATIL, V.C., SAWANT, S.R., MUDHOLKAR, R.R., Classification And Comparison Of Routing Protocols In Wireless Sensor Networks, UbiCC Journal, vol. 4, pp. 704-711, 2006.
- [57] VILLALBA, L.J.G., OROZCO, L.S., CABRERA, A.T., ABBAS, C.J.B., Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, Sensors, vol. 9, pp. 8399-8421 , 2009.
- [58] DWIVEDI, A.K., VYAS, O.P., An Exploratory Study of Experimental Tools for Wireless Sensor Networks, Wireless Sensor Network, Vol. 3, pp. 215-240, 2011.

- [59] ÇAKIROĞLU, M., Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Dinamik Kanal Atlamalı Güvenlik Sistemi Tasarımı, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [60] OPNET benzetim yazılımı, OPNET Modeller 11.5 Documentation, OPNET Technologies, Release 11.5, 2006.
- [61] Omnet++ benzetim yazılımı, <http://www.omnetpp.org/>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [62] Ns-3 benzetim yazılımı, <http://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [63] QualNet benzetim yazılımı, <http://www.scalable-networks.com/boards/>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [64] Glomosim benzetim yazılımı, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [65] Omnet++ Mixim modeli, <http://sourceforge.net/apps/trac/mixim/>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [66] Omnet++ Castalia modeli, <http://castalia.npc.nicta.com.au/>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [67] CC1100 radyo alıcısı, <http://www.ti.com/product/cc1100>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [68] CC2420 radyo alıcısı, <http://www.ti.com/product/cc2420>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [69] Omnet++ Mobility Framework modeli, <http://mobility-fw.sourceforge.net/hp/index.html>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)
- [70] HU, Y., LIN, Y., LIU, Y., LI, X., LIN, M., A Simulation System for Modeling and Analysis of Large Scale Sensor Networks, 6th International Conference on Information Communications & Signal Processing (ICICS), pp.1-5, 10-13 Dec. 2007.
- [71] XIAN, X., SHI, W., HUANG, H., Comparison of Omnet++ and Other Simulator for WSN Simulation, 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1439-1443, 3-5 June 2008.
- [72] Omnet++ benzetim yazılımı kullanıcı kılavuzu, <http://omnetpp.org/doc/omnetpp/userguide/index.html>, (Erişim tarihi: Eylül 2011)

- [73] KOPKE, A., SWIGULSKI, M., WESSEL, K., WILLKOMM, D., HANEVELD, P.T.K, PARKER, T.E.V., VISSER, O.Q., LICHTTE, H.S., VALENTIN, S., Simulating wireless and mobile networks in Omnet++ the MiXiM vision, Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops, France, 2008.
- [74] WESSEL, K., SWIGULSKI, M., KOPKE, A., WILLKOMM, D., "Mixim: the physical layer an architecture overview," in Simutools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (ICST), Brussels, Belgium, pp. 1-8., 2009.
- [75] BAGHYALAKSHMI, D., EBENEZER, J., SATYAMURTY, S.A,V., Low latency and energy efficient routing protocols for wireless sensor networks, International Conference on Wireless Communication and Sensor Computing (ICWCSC), vol., no., pp. 1-6, 2-4 Jan. 2010.
- [76] KOUBÂA, A., ALVES, M., TOVAR, E., Lower Protocol Layers for Wireless Sensor Networks: A Survey, IPP-HURRAY Teknik Rapor, 2005.
- [77] DEMIRKOL, I., ERSOY, C., ALAGÖZ, F, MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey, IEEE Communications Magazine, vol.44, no.4, pp. 115-121, April 2006.
- [78] BANCHS, A., AZCORRA, A., GARCIA, C., CUEVAS, R., Applications and challenges of the 802.11e EDCA mechanism: an experimental study, IEEE Network, vol.19, no.4, pp. 52-58, July-Aug. 2005.
- [79] JENOLIN, F.D.F., KAVITHA, V., MUTHUSELVI, M., A survey on congestion control techniques in Wireless Sensor Networks, International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), vol., no., pp. 1146-1149, 23-24 March 2011.

EKLER

Ek A. Kablosuz Algılayıcı Ağlara Yönelik Omnet++ Tabanlı Benzetim Modelinin Tasarımı

Bu tezde, kablosuz algılayıcı ağ uygulaması Omnet++ tabanlı benzetim yazılımını Mixim model yapısı altında geliştirilmiştir. Şekil A.1’de görüldüğü gibi tüm benzetim modeli ile ilgili genel bilgileri tutan “world”, düğümler arası bağlantıların yönetildiği “connectionManager” ve düğümleri temsil eden “node” bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil A. 1. Kablosuz algılayıcı ağ modelinin temel bileşenleri

Şekil A.2 “omnetpp.ini” yapılandırma dosyasının bir kısmını göstermektedir. Bu dosya diğer bileşenler tarafından kullanılacak genel parametre ve değerleri tutar.

```
*.world.useTorus = false  
*.world.use2D = true  
*.world.bitrate = 250000
```

Şekil A. 2. Genel parametre ve değerler

Kablosuz algılayıcı düğümler kablosuz kanal üzerinden paket alır ve gönderir. Şekil A.3’de “omnetpp.ini” yapılandırma dosyasından ayarlanabilen kablosuz kanala ait taşıyıcı frekans “carrierFrequency”, alfa “alpha”, sinyal zayıflaması “sat” ve maksimum güç “pMax” parametreleri ve değerlerini göstermektedir.

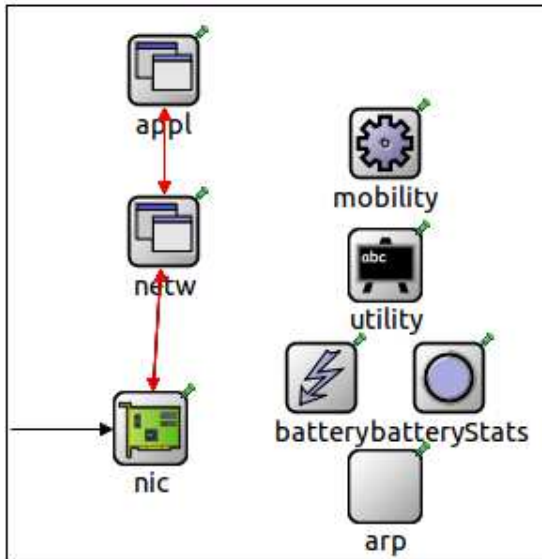
```

.....
*.connectionManager.sendDirect = false
*.connectionManager.pMax = 1.1mW
*.connectionManager.sat = -100dBm
*.connectionManager.alpha = 2.5
*.connectionManager.carrierFrequency = 2.4E+9Hz

```

Şekil A. 3. Kanal parametre ve değerleri

Düğüm bileşeni Şekil A.4’de gösterildiği gibi uygulama katmanı “appl”, ağ katmanı “netw”, MAC ve fiziksel katmanı temsil eden “nic”, düğümlerin hareketliliğini düzenleyen “mobility”, batarya ile ilgili “battery” ve “batteryStats”, adres dönüşümünü gerçekleştiren “arp” ve genel araçları barındıran “utility” bileşenlerinden oluşmaktadır. Aynı ayrı tasarlanmış her bileşen istenildiğinde bir eşleniği ile rahatlıkla değiştirilerek sorunsuz bir şekilde benzetimde kullanılabilir.



Şekil A. 4. Kablosuz algılayıcı ağ düğümü modelinin temel bileşenleri

Düğümlerin konumlandırılması: Omnet++ tabanlı benzetim yazılımı, “omnetpp.ini” yapılandırma dosyasında belirtilen düğüm sayılarına, benzetim alanının büyüklüğüne ve düğüm konumu bilgilerine göre düğümlerin istenilen şekilde konumlandırılabilmesine imkan tanımaktadır. Benzetimi yapılan protokollerde, Şekil A.5’de gösterilen “playgroundSizeX” ve “playgroundSizeY” parametrelerine atanan benzetim alanı büyüklüğüne göre “mobility.x”, “mobility.y” ve “mobility.z” parametrelerine atanan “-1” değeri ile kablosuz algılayıcı düğümler rastgele şekilde yerleştirilir. Bu parametreleri kullanarak değişik büyüklükte ve yoğunlukta benzetimler gerçekleştirilebilmektedir.

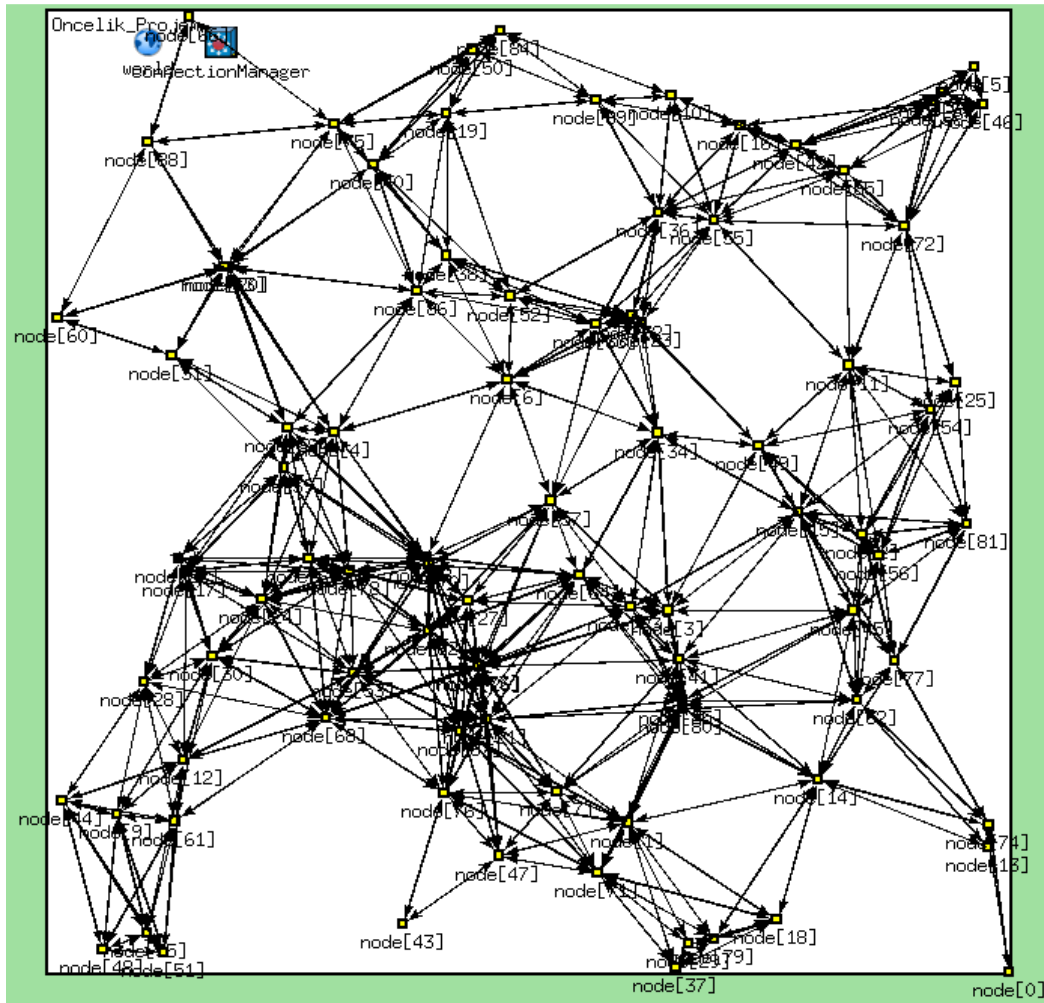
```

*.playgroundSizeX = 1250m
*.playgroundSizeY = 1250m
*.playgroundSizeZ = 0m
*.node[0].mobility.speed= 0.0mps
*.node[*].mobility.speed= 0.0mps #1mps->3.6 km/saat
*.numHosts =90 #${90,120,150}
*.node[0].mobility.x = 1250
*.node[0].mobility.y = 1250
*.node[*].mobility.z = -1
*.node[*].mobility.x = -1
*.node[*].mobility.y = -1
*.node[*].mobility.z = -1

```

Şekil A. 5. Düğüm konumlandırma parametre ve değerleri

Şekil A.6'da 1250 x 1250 metre alana rastgele dağıtılmış, sağ alt köşedeki 0 dizin numaralı düğümün nihai hedef alıcısı olduğu 90 düğümlü bir kablosuz algılayıcı ağ görülmektedir.



Şekil A. 6. 90 düğümlü bir kablosuz algılayıcı ağ

Batarya parametrelerini tutan “battery” ve batarya ile ilgili istatistikleri tutan “batteryStats” bileşenlerine ait bataryanın kapasitesi, voltajı vb. parametreler Şekil A.7’de gösterilmektedir. Batarya bileşeninden her düğümün tükettiği enerji miktarı uyku, alma, gönderme ve dinleme radyo durumlarının her biri için ayrı olarak alınabilmektedir.

```
*.node[0]**.battery.nominal=99999mAh
*.node[0]**.battery.capacity=99999mAh
**.battery.nominal = 0.2200mAh
**.battery.capacity = 0.2200mAh
**.battery.voltage = 3.3V
**.battery.resolution = 0.1s
**.battery.publishDelta = 1
**.battery.publishTime = 0.1s
**.battery.numDevices = 1
**.batteryStats.detail = false
**.batteryStats.timeSeries = true
```

Şekil A. 7. Batarya parametre ve değerleri

Uygulama katmanı kablosuz algılayıcı düğümlerin algılama işlemleri ile ilgili detayları belirleyen katmandır. Omnet++ tabanlı benzetim modelinde kablosuz algılayıcı düğümlerin algılama işlemleri paket üretici ile sağlanmaktadır. Şekil A.8’de “omnetpp.ini” yapılandırma dosyasından ayarlanabilen kuyruk sayısı “ks”, hedef alıcı düğümün adresi “destAddr”, gönderilecek toplam paket sayıları “nbPackets”, birim zamanda üretilecek paket miktarı “trafficParam”, trafik türü “trafficType” vb. uygulama katmanına ait parametreler ve değerleri gösterilmektedir. Sabit hız, tek biçim (uniform) ve üstel (exponential) olmak üzere üç ayrı paket dağılım üretici yardımıyla trafik üretimi gerçekleştirilmektedir.

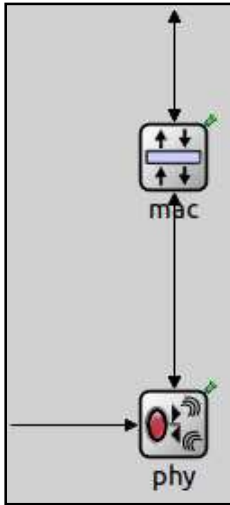
```
*.node[*].appl.ks = 2
*.node[*].appl.destAddr = 0
*.node[*].appl.headerLength = 2byte
*.node[*].appl.initializationTime = 1s
*.node[1].appl.nbPackets = 5000
*.node[*].appl.nbPackets = 5000
*.node[*].appl.stats = true
*.node[*].appl.trafficParam = 1 #
*.node[*].appl.trafficType = 2 # UNIFORM
*.node[*].appl.paketOrani = -1 #Her iki öncelikli veriye üret
*.node[*].appl.paketUretsinmi=true
```

Şekil A. 8. Uygulama katmanı parametre ve değerleri

Şekil A.4’de “netw” bileşeni olarak temsil edilen yönlendirme katmanı, MAC katmanı ile işbirliği halinde çalışarak kaynak düğümlerde üretilen veri paketlerinin çok atlamalı yollar üzerinden nihai hedef alıcıya gönderilmesini sağlamaktadır.

Şekil A.9’da gösterilen “mac” bileşeni kanal erişimi, çerçeve filtreleme ve radyo modlarının ayarlanmasından sorumlu katmandır. Bu bileşen aynı zamanda ağ katmanını temsil eden “netw” bileşeniyle işbirliği halinde çalışarak yönlendirme sürecine katkı sağlamaktadır.

Paket gönderimi ve alımı gibi işlemlerden sorumlu olan fiziksel katman için CC2420 popüler radyo alıcı / verici tüm devresi tercih edilmiştir. Şekil A.10’da “omnetpp.ini” yapılandırma dosyasından ayarlanabilen CC2420 radyo devresinin maksimum gücü, hassaslığı ve kullanılan analog model gibi fiziksel katmana ait parametreler ve değerleri görülmektedir.



Şekil A. 9. Kablosuz algılayıcı ağ düğümünün ortam erişim ve fiziksel katman bileşenleri

```
*.node[*].nic.phy.analogueModels = xmldoc("@Genel/config.xml")
*.node[*].nic.phy.maxTXPower = 1.1mW
*.node[*].nic.phy.sensitivity = -100dBm
*.node[*].nic.phy.usePropagationDelay = false
*.node[*].nic.phy.useThermalNoise = true
```

Şekil A. 10. Fiziksel katman parametre ve değerleri

Şekil A.11’de fiziksel katmandan alınan sinyallerin doğru olarak ulaşıp ulaşmadığının tespitini yapan analog modele ait parametre ve değerlerinin tutulduğu

“config.xml” dosyasını göstermektedir. Analog modeller yol kayıp modellerini, alfa katsayısı ve taşıyıcı frekans değeri gibi sinyalin işlenmesi sürecinde kullanılan parametre ve yordamları içerir. “config.xml” dosyası ayrıca sinyalin paket olup olmadığına karar verilmesi sürecinde kullanılan parametre ve değerlerini içerir.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <AnalogueModels>
    <AnalogueModel type="SimplePathlossModel">
      <parameter name="alpha" type="double" value="2.5"/>
      <parameter name="carrierFrequency" type="double" value="2.4E+9"/>
    </AnalogueModel>
  </AnalogueModels>

  <Decider type="Decider802154Narrow">
    <parameter name="sfdLength" type="long" value="8"/>
    <parameter name="berLowerBound" type="double" value="1e-8"/>
    <parameter name="modulation" type="string" value="msk"/>
  </Decider>
</root>
```

Şekil A. 11. Analog model ile karar verici bileşeni parametre ve değerleri

Şekil A.12 düğümün paket tutucunun göndereceği veri paketini almaya aday olamayacağı durumları göstermektedir. Düğümün hedefe ilerleme yönü iletim deneme yönü ile ters ise ya da hedefe ilerleme yönü pozitif ancak boşluk bölgesi düğümü ise düğüm veri paketini almaya aday olamaz.

```
if (kMesafe<0) yon=false;
else yon=true;
if (yon!=af->getDenemeYon()) {
delete msg;
return;
}
if (yon==true and ileriBO==2) {
delete msg;
return;
}
```

Şekil A. 12. Düğümün aday olamayacağı durumlar

Şekil A.13 hedefe ilerleme yönü pozitif olan düğümün adaylığını ilan etmeden önce bekleyeceği zamanın hesaplanmasını göstermektedir. Bekleme zamanı düğümün kuyruk doluluğu, hedefe ilerleme mesafe dilimi, düğümün başarılı iletim yaptığı ortalama dilim numarası, enerji dilimi, iletim başarı oranı, ileri düğüme gönderme oranı ve rastgele bir değer kullanılarak hesaplanır. Düğüm kuyruk doluluğuyla ve hedefe ilerleme mesafe dilimi ile doğru orantılı olarak bekleme zamanı hesaplar.

Böylece kuyruk doluluğu düşük ve hedefe daha fazla ilerleme yapabilecek düğümlerin seçilme olasılığı artırılır. Bekleme zamanı düğümün kalan enerjisiyle ters orantılı azaltılarak enerjisi az olan düğümlerin yaşam süresi artırılır. Düğümün IDGO değeri belirlenen 0,7 değerine eşit ya da büyük olması durumunda IDGO değeri ile orantılı bekleme zamanı azaltılır. IDGO değeri eşik değerinden küçük olan düğüm paket tutucunun göndermek istediği veri paketini almaya aday olamaz.

```

mKuyrukDegeri=((oncelik+1)*kuzunluk);
kuyruk=(double) (kuyrukDegeri[oncelik]/mKuyrukDegeri);
kuyruk *=kuyrukK;
double kMesafeN=(makGirisimMesafe-kMesafe)/(makGirisimMesafe);
mesafe=kMesafeN;
dNo=(kMesafeN*dilimSay)+1;
dNo *=2;
if (aci<=30) dNo -=1;
mesafe *= (((0.5*dNo) +(0.5*sdDilim[oncelik]))/ (2*dilimSay));
double kBosalt=(tHizmet[oncelik]/paketAraligi[oncelik]);
if (kBosalt<=1) kuyruk=0;
enerji=(1 - dugumEnerjisi->estimateResidualRelative());
ayar=((double)af->getPaketOncelik()+1)/((double)ks);
enerjiK =enerjiK*ayar;
enerji=(1-enerji);
int eDilimNo=(enerji*eDilimSay)+1;
enerji= enerjiK*(pow(10,eDilimNo)/pow(10,eDilimSay));
kayip=ewmaK*kMesafeN*(1-iletimBasariOrani[oncelik]);
if (af->getBolgeNo()==2 or af->getBolgeNo()==3 ) {
    if (kayip>(ewmaK/2)) kayip=ewmaK;
}
if (ileriDugumeGonderiOrani[oncelik]>0.7) {
    ibo=iboK*(1-ileriDugumeGonderiOrani[oncelik]);
}else {
    delete msg;
    return;
}
rastgele=(uniform(0, (rastgeleK*100))/100);
mesafe *= (1-(kuyrukK + iboK + rastgeleK + enerjik + ewmaK));
bekleme = (mesafe+kuyruk+ibo+rastgele+enerji+kayip)*SIFS;

```

Şekil A. 13. Hedefe ilerleme yönü negatif olan düğümün bekleme zamanı hesaplaması

Şekil A.14 hedefe ilerleme yönü negatif olan düğümün adaylığını ilan etmeden önce bekleyeceği zamanın hesaplanmasını göstermektedir. Bekleme zamanı hesaplanırken düğümün kuyruk doluluğu, paket tutucu ile hedef alıcının çizdiği doğruya yaptığı açının dilimi, ileri gönderme oranı ve rastgele bir değer kullanılarak hesaplanır. Düğüm kuyruk doluluğu ve açı dilimi ile doğru orantılı, ileri düğüme gönderme oranı ile ters orantılı olarak bekleme zamanı hesaplar. Düğümler “getBolgeNo” bilgisi ile

ifade edilen iletim deneme sayısına bağı olarak alt – üst bölgede bulunmalarına göre sırayla veri paketini almaya aday olma hakkı elde eder.

```

mKuyrukDegeri=((oncelik+1)*kuzunluk);
kuyruk=(double) (kuyrukDegeri[oncelik]/mKuyrukDegeri);
kuyruk *=kuyrukK;
double m=((xka*xkh)+(yka*ykh))/mesafeka;
double aci=acos(m/mesafekh)*57.29;
double c=(xkh*yka)-(xka*ykh);
int ara=((int)((aci-30)/30))+1; ;
mesafe=((double)ara/5);
if (af->getBolgeNo()==4) {
    if (c>=0) {
        delete msg;
        return;
    }
} else if (af->getBolgeNo()==5) {
    if (c<=0) {
        delete msg;
        return;
    }
}
ibo=iboK*(1-ileriDugumeGonderiOrani[oncelik]);
rastgele=(uniform(0, (rastgeleK*100))/100);
mesafeK=1-(kuyrukK+iboK+rastgeleK);
mesafe=mesafeK*mesafe;
bekleme=(mesafe+kuyruk+ibo+rastgele)*SIFS;

```

Şekil A. 14. Hedefte ilerleme yönü negatif olan düğümün bekleme zamanı hesaplanması

ÖZGEÇMİŞ

Aytaç KAYA, 1975 yılında Sakarya'da doğdu. İlköğrenimini Sakarya'da ve ortaöğrenimini İstanbul'da tamamladı. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Öğretmenliği Bölümü'nden 1997'de mezun oldu. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Bilgisayar EABD'da yüksek lisans programından 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar EABD'da doktora programına başlamıştır. Halen Sakarya Üniversitesi Eğitim Fakültesi Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.