



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



DOKTORA TEZİ

**KABLOSUZ MESH AĞLAR ve KABLOSUZ MESH AĞ
UYGULAMALARI**

Şafak DURUKAN ODABAŞI

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. A. Halim ZAİM

Şubat, 2013

İSTANBUL

Bu çalışma 01/02/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Bilgisayar Mühendisliği programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi


Prof.Dr. A.Halim ZAIM (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof.Dr. Sabri ARIK
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof.Dr. Selim AKYOKUŞ
Doğuş Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof.Dr. Ahmet SERTBAŞ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof.Dr. İlhami YAVUZ
Maltepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliđinin 10266 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında yapılan “Kablosuz Mesh Ağlar ve Kablosuz Mesh Ağ Uygulamaları” adlı doktora tez çalışmasını içermektedir.

Bu tez çalışması boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. A. Halim ZAIM’e, tez izleme komitemde yer alan Prof. Dr. Sabri ARIK ve Prof. Dr. Selim AKYOKUŞ’a çalışmalarım bana yol gösterdikleri ve engin bilgilerini benimle paylaştıkları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım bana yol gösterici olan değerli hocam ve çalışma arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Muhammed Ali AYDIN’a, bu süreçte bilgisini ve desteğini yanımda hissettiğim Araş. Gör. Ergün GÜMÜŞ’e teşekkür ederim.

Yükseköğrenimim ve çalışmalarım süresince bilgisini ve manevi desteğini esirgemeyen, çoğunlukla beni motive edip yapıcı eleştirileriyle her daim yanımda olan çok değerli çalışma arkadaşlarım ve aynı zamanda dostlarım Öğr. Gör. Dr. Rüya ŞAMLI ve Araş. Gör. Dr. Özgür Can TURNA’ya en içten dileklerimle teşekkür ediyorum.

Tez çalışmalarım için yurtdışı araştırmalarım sırasında göstermiş olduğu her türlü destek için Berlin Freie Universität öğretim görevlilerinden sayın Prof. Dr. Mesut GÜNEŞ’e, bu süreçte bana maddi ve manevi desteklerde bulunan Tinçel Kültür Vakfı’na ve İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Proje Birimi’ne içten dileklerimle teşekkür ederim.

Çalışma, eğitim ve özel hayatımda her zaman yanımda olan, sevgisini, saygısını, ilgi ve desteğini bir an olsun esirgemeyen, ablası olmaktan gurur ve mutluluk duyduğum kardeşim Zülfikar Mustafa DURUKAN’a ve eğitim hayatım boyunca başarılarımla gururlanıp, daha iyisi için beni hep teşvik ve motive eden, en ihtiyaç duyduğum anda yanımda olduğu için ömrüm boyunca minnettar kalacağım annem Tülay DURUKAN’a varlıkları için yürekten teşekkür ederim.

Sadece bu tez çalışmasında değil, hayatımın her anında her türlü desteğini, bilgisini ve zamanını esirgemeyen, sabırla ve özenle tüm sıkıntılara katlanan, bıkmadan sorularıma cevap veren sevgili eşim ve en yakın dostum Uğur ODABAŞI’na teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmamı sevgili eşime ve çok yakında ailemize katılacak oğlumuz Rüzgar’a armağan ediyorum.

Şubat, 2013

Şafak DURUKAN ODABAŞI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	viii
ÖZET.....	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. KABLOSUZ MESH AĞLAR	3
2.1.1. Kablosuz Mesh Ağ Mimarisi	5
2.1.2. Kablosuz Mesh Ağların Karakteristik Özellikleri	8
2.1.3. Kablosuz Mesh Ağların Kullanım Alanları	10
2.1.3.1. Geniş Band Internet Erişimi.....	10
2.1.3.2. İç WLAN Kapsamı	11
2.1.3.3. Mobil Kullanıcı Erişimi.....	12
2.1.3.4. Bağlantı	12
2.1.4. WMN’lerin Güçlü Ve Zayıf Tarafları.....	16
3. KABLOSUZ MESH AĞLARDA YÖNLENDİRME.....	17
3.1. YÖNLENDİRME METRİKLERİ.....	17
3.1.1. Sıçrama Sayısı (Hop Count)	19
3.1.2. Bloklama Metriği (Blocking Metric)	19
3.1.3. Beklenen İletim Sayısı (Expected Transmission Count - ETX)	20
3.1.4. Beklenen İletim Zamanı (Expected Transmission Time - ETT)	21
3.1.5. Ağırlıklı Birikimli ETT (Weighted Cumulative ETT - WCETT).....	21
3.1.6. Modifiye edilmiş Beklenen İletim Sayısı (Modified Expected Transmission Count - mETX)	21
3.1.7. Ağ Tahsis Vektör Sayısı (Network Allocation Vector Count - NAVC)	22

3.1.8. Arayüz ve Kanal Anahtarlama Metriği (Metric of Interface and Channel Switching - MIC)	22
3.2. YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ.....	23
3.2.1. Ad-Hoc Tabanlı WMN Yönlendirme Protokolleri	24
3.2.2. Kontrollü Taşmalı WMN Yönlendirme Protokolleri.....	25
3.2.3. Trafik Farkındalıklı WMN Yönlendirme Protokolleri	27
3.2.4. Fırsatçı WMN Yönlendirme Protokolleri	28
4. ÇOKLU KANAL ÇOKLU RADYO KABLOSUZ MESH AĞLAR (MULTI-CHANNEL MULTI-RADIO WIRELESS MESH NETWORKS – MCMR WMNS).....	31
4.1. MCMR WMN'DE KANAL ATAMASI.....	32
4.1.1. Çoklu Kanal Atamalarında Tasarım Sorunları.....	33
4.2. KANAL ATAMA ŞEMALARI	34
4.2.1. WMN'ler İçin Kanal Atama Şemalarının Sınıflandırılması	36
4.2.1.1. Sabit Kanal Atama Şemaları	36
4.2.1.2. Dinamik Kanal Atama Şemaları	37
4.2.1.3. Hibrit Kanal Atama Şemaları	38
5. MALZEME VE YÖNTEM	40
5.1. AĞ MİMARİSİ.....	40
5.1.1. DMesh – Yönlü Antenler Kullanılarak Gerçekleştirilen Bir WMN Mimarisi	40
5.1.1.1. Fiziksel Ağaç Oluşturma	43
5.1.1.2. Yönlendirme Protokolü	44
5.1.1.3. Dağıtık, Yönlü Kanal Ataması.....	46
5.1.1.4. Kanal Atama Şemaları	46
5.1.1.5. OCA/C-DCA/A-DCA/M-DCA için Kullanılan Dağıtık Kanal Atama Algoritması	50
5.1.2. İyileştirilmiş DMesh Kanal Atama Algoritması (Improved DMesh - iDMesh).....	51
5.1.2.1. Kavramlar ve Mesaj Tipleri	52
5.1.2.1. Fiziksel Yönlendirme Ağacının Oluşturulması.....	54
5.2. KANAL ATAMA ALGORİTMALARI	58
5.2.1. DMesh İçin İzlenen Kanal Atama Algoritması.....	58
5.2.2. iDMesh İçin İzlenen Kanal Atama Algoritması	61
5.3. SİMÜLASYON ORTAMI	65
5.3.1. Ağ Mimarisi ve Parametreler.....	65

6. BULGULAR	67
6.1. PERFORMANS SONUÇLARI.....	67
6.1.1. Ağ Topolojileri ve Senaryolar.....	67
6.1.2. Simülasyon Sonuçları	71
6.1.2.1. Ağdaki Düğüm Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi	71
6.1.2.2. Kullanılabilir Kanal Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi	72
6.1.2.3. Ağ Geçidi Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi	73
6.1.2.4. Ağdaki Düğüm Sayısının Trafik Yoğunluğuna Bağlı Olarak İletilen ve Düşen Paket Sayısına Etkisi	74
6.1.2.5. Ağdaki Kullanılabilir Kanal Sayısının Trafik Yoğunluğuna Bağlı Olarak İletilen ve Düşen Paket Sayısına Etkisi	76
6.1.2.6. Ağdaki Ağ Geçidi Sayısının Trafik Yoğunluğuna Bağlı Olarak İletilen ve Düşen Paket Sayısına Etkisi.....	79
6.1.2.7. Trafik Yoğunluğunun Gelen Aramaları Bloke Etme İhtimali Üzerinde Etkisi	82
7. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	85
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ.....	98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Altyapı/omurga kablosuz mesh ağ mimarisi.	6
Şekil 2.2: İstemci tipi kablosuz mesh ağ mimarisi.	7
Şekil 2.3: Hibrit kablosuz mesh ağ mimarisi.	8
Şekil 2.4: Ev içinde –kısa mesafeli- mesh ağı (Akyildiz ve Wang, 2009).	13
Şekil 2.5: Mahalle içinde –çok sıçramalı- mesh ağı (Akyildiz ve Wang, 2009).	14
Şekil 2.6: Örnek ev- ofis ağ gösterimi (Methley, 2009).	15
Şekil 3.1: Kontrollü taşma biçimleri (a) klasik taşma, (b) zamansal taşma, (c) uzamsal taşma (Campista ve diğ., 2008).	26
Şekil 5.1: DMesh’de kullanılan kanal atama şemaları (a) OCA ile her-yönlü (b) C-DCA ile yönlü. (c) A-DCA ile yönlü.	47
Şekil 5.2: Fiziksel yönlendirme ağacı mesaj akış şeması.	55
Şekil 5.3: Fiziksel yönlendirme ağacı mesaj iş-akış şeması.	57
Şekil 5.4: DMesh C-DCA Kanal Atama Prosedürü İş-Akış Şeması.	60
Şekil 5.5: Sistemdeki 4 adet yönlü antene sahip bir düğüm, sapma açısı ve tarama bölgesi.	62
Şekil 5.6: iDMesh Kanal Atama Prosedürü İş Akış Şeması.	64
Şekil 6.1: DMesh için oluşturulan Ağ Senaryosu (1 ağ geçidi, 10 düğüm ve 3 kanal).	68
Şekil 6.2: iDMesh için oluşturulan Ağ Senaryosu (1 ağ geçidi, 100 düğüm ve 3 kanal).	69
Şekil 6.3: Örnek Sonuç Raporu (1 ağ geçidi, 3 kanal ve 20 düğümle oluşturulan bir yapı ile DMesh algoritmasının çalıştırılması sonucu elde edilen rapor).	70
Şekil 6.4: Ağdaki Düğüm Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi.	72
Şekil 6.5: Ağdaki Kullanılabilir Kanal Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi.	72
Şekil 6.6: Ağdaki Ağ Geçidi Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi.	73
Şekil 6.7: Trafik yoğunluğu ve ağdaki düğüm sayısının başarılı iletilen paket sayısına etkisi. ..	75
Şekil 6.8: Trafik yoğunluğu ve ağdaki düğüm sayısının düşen paket sayısına etkisi.	76

Şekil 6.9: Trafik yoğunluğu ve ağdaki kullanılabilir kanal sayısının başarılı iletilen paket sayısına etkisi.....	77
Şekil 6.10: Trafik yoğunluğu ve ağdaki kullanılabilir kanal sayısının düşen paket sayısına etkisi.....	78
Şekil 6.11: Trafik yoğunluğu ve ağ geçidi sayısının başarılı iletilen paket sayısına etkisi.	80
Şekil 6.12: Trafik yoğunluğu ve ağ geçidi sayısının düşen paket sayısına etkisi.....	81
Şekil 6.13: Trafik yoğunluğuna bağlı olarak DMesh ve iDMesh mimarilerinin arama bloklama ihtimalleri.....	84

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: Ana yönlendirme ölçütlerinin karakteristik özellikleri.....	23
Tablo 3.2: WMN Yönlendirme Protokolleri ve Kullandıkları Metrikler.....	30
Tablo 5.1: Çoklu radyolu mesh ağlarda antene göre kanal atama mimarisi seçimi.....	50
Tablo 5.2: iDMesh’de kullanılan kavramlar ve mesajlar.....	53
Tablo 5.3: iDMesh’de kullanılan mesajlar ve içerikleri.....	54

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kisaltmalar	Açıklama
3G	:Third Generation (3. Jenerasyon)
A-DCA	:Aggressive DCA (Girişken/Saldırcı DCA)
AODV-ST	: Ad-hoc on demand distance vector-spanning tree (İsteğe bağlı Ad-hoc Uzaklık Vektörü – Tarama Ağacı)
AP	:Access Point (Erişim Noktası)
CCA	:Common Channel Assignment (Ortak Kanal Ataması)
C-DCA	:Conservative DCA (Korunumlu DCA)
C-HYA	:Central HYACINTH (Merkezi HYACINTH)
CLICA	:Connected Low Interference Channel Assignment (Bağlı Düşük Parazitli Kanal Atama)
CRM	:Child Response Message (Çocuk Cevap Mesajı)
DCA	:Directional/Channel Assignment (Yönlü Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması İle)
D-HYA	:Distributed HYACINTH (Dağıtık HYACINTH)
DMesh	:Directional Mesh (Yönlü Mesh Ağı)
DNOCA	:Directional/No Channel Assignment (Yönlü Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması Olmadan)
DSL	:Digital Subscriber Line (Dijital Abone Hattı)
ETT	:Expected Transmission Time (Beklenen İletim Zamanı)
ETX	:Expected Transmission Count (Beklenen İletim Sayısı)
ExOR	:Extremely Opportunistic Routing (Aşırı Derecede Fırsatçı Yönlendirme)
GPS	:Global Positioning System (Küresel Konum Belirleme Sistemi)
HNA	:Host and Network Association (Sunucu ve Ağ Birlikteliği)
IACA	:Interference aware Channel Assignment (Parazit Haberli Kanal Ataması)
iDMesh	:Improved Dmesh (İyileştirilmiş Dmesh)
LAN	:Local Area Network (Lokal Alan Ağları)
LLP	:Link Layer Protocols for Interface Assignment (Ara yüz Ataması için Link Katmanı Protokolleri)
LOLS	:Localized On-Demand Link State Routing (Merkez İsteğe Bağlı Link Durum Yönlendirmesi)
LoS	:Line of Sight (Görüş Alanı)
LQSR	:Link Quality Source Routing (Link Kalitesi Kaynak Yönlendirme)
MANET	:Mobil Ad Hoc Network (Mobil Ad Hoc Ağları)
MCMR	:Multichannel Multi Radio (Çoklu Kanal Çoklu Radyo)
M-DCA	:Measurement Based DCA (Ölçüm Tabanlı DCA)
mETX	:Modified ETX (Modifiye Edilmiş ETX)
MIC	:Metric of Interface and Channel Switching (Arayüz ve Kanal

	Anahtarlama)
MMRP	:Mobile Mesh Routing Protocol (Mobil Mesh Yönlendirme Protokolü)
MP-MP	:Multipoint-Multipoint (Çoklu noktadan çoklu noktaya iletişim)
MR-LQSR	:Multi Radio Link Quality Source Routing (Çoklu Radyo LQSR)
NAVC	:Network Allocation Vector Count (Ağ Vektör Tahsis Sayısı)
NIC	:Network Interface Card (Ağ Arayüz Kartı)
OCA	:Omni/Channel Assignment (Her Yönlü Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması İle)
OLSR	:Optimized Link State Routing Protocol (Optimize Edilmiş Link Durum Yönlendirme Protokolü)
ONOCA	:Omni/No Channel Assignment (Her Yönlü Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması Olmadan)
P2P	:Peer-to-Peer (Eş Düzeyde)
PIP	:Pointing IP (Yönlendirilmiş IP)
PMP	:Point-to-Multipoint (Tek noktadan çoklu noktaya iletişim)
PRM	:Parent Response Message (Ebeveyn Cevap Mesajı)
ROMER	:Resilient Opportunistic Mesh Routing Protocol (Dirençli Fırsatçı Mesh Yönlendirme Protokolü)
VANET	:Vehicular Ad Hoc Network (Araçlar arası Ad Hoc Network)
VCA	:Varying Channel Assignment (Değişken Kanal Ataması)
WCETT	:Weighted Cumulative ETT (Ağırlıklı Kümülatif ETT)
WiFi	:Wireless Fidelity (Kablosuz Bağlantı)
WiMAX	:Worldwide Interoperability for Microwave Access (mikrodalga erişim için dünya çapında birlikte çalışabilirlik)
WLAN	:Wireless Local Area Network (Kablosuz Lokal Alan Ağı)
WMAN	:Wireless Metropolitan Network (Kablosuz Metropolitan Alan Ağları)
WMNs	:Wireless Mesh Networks (Kablosuz Mesh Ağlar)
WPAN	:Wireless Personal Area Network (Kablosuz Kişisel Alan Ağı)
WSN	:Wireless Sensor Network (Kablosuz Sensör Ağları)

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KABLOSUZ MESH AĞLAR ve KABLOSUZ MESH AĞ UYGULAMALARI

Şafak DURUKAN ODABAŞI

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. A. Halim ZAİM

Günümüzde internet günlük hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Bankacılık işlemlerinden, çevrimiçi eğlenceye kadar birçok alanda giderek büyüyen bir kullanıcı kitlesine sahiptir. Gelecekte internet erişimi hücresel telefonlarda sıklıkla kullandığımız servisler gibi kablosuz olursa, bu durum kullanıcılar açısından oldukça verimli olacaktır. Fakat bunu sağlayabilmek için yeni bir ağ tasarlanması ya da mevcut bir ağın geliştirilmesi aynı zamanda altyapıda birçok değişiklik yapılmasını da beraberinde gerektirmektedir. Mesh ağ yapısı bu noktada devreye girmekte ve yeni bir altyapı için daha az ihtiyaçla daha gelişmiş bir internet erişimi vaat etmektedir.

Mesh ağların en büyük avantajı altyapı olmaksızın çalışabilmeleridir. Mesh ağlar, 4G dediğimiz gelecek nesil ağlar içerisinde bu özellikleriyle yenilenmiş bir teknoloji olmaktan çok, ek bir erişim teknolojisi olarak yerini alacaktır.

Kablosuz mesh ağlarının düşük maliyet, kolay ağ bakımı, sağlamlık, güvenilir servis alanı gibi birçok avantajı vardır. Bu da birçok şirketin bu teknolojinin potansiyelinin farkına varmasına ve kablosuz mesh ağ ürünlerini piyasaya sürmeye başlamasına neden olmuştur. Bu avantajlara ve özelliklere rağmen kablosuz mesh ağlarının araştırılmaya ve geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Mevcut protokollerin yeniden yapılandırılması ya da genişletilmesi gerekmektedir. Optimal bir yönlendirme ve kanal tahsis algoritmasının tasarımı bu noktada bir zorunluluk halini almaktadır. Birçok algoritma kablolu ve kablosuz ağlardan kablosuz mesh ağlar için uyarlanmışsa da, bireysel karakteristiklerinden tam olarak faydalanılamamaktadır.

Bu kavramlara uygun olarak son yıllarda özellikle çoklu kanal, çoklu radyo kablosuz mesh ağlar ve bu ağlarda kanal tahsisi ile yönlendirme konuları üzerine birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır. Çok kanallı yapının getirmiş olduğu daha fazla veri kapasitesi olanağı ile kablosuz mesh ağlar giderek daha popüler bir teknoloji olmaya başlamıştır.

Bu tez çalışmasında genel olarak kablosuz mesh ağlar, kullanılan yönlendirme algoritmaları incelenmiş, çok kanllı yapının ortaya koyduğu avantajlar ve kanal atama sırasında kullanılan algoritmalar açıklanmıştır. Yönlü antenlerin kullanımı esasına dayalı çok kanallı bir yapıyı destekleyen DMesh mimarisi üzerinde odaklanılarak, kanal atama prosedürü incelenmiş ve önerilen yeni yöntem bu protokole dayanarak tasarlanmıştır.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde kablosuz mesh ağların genel mimarisi, avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatürde kullanılan yönlendirme metrikleri ve algoritmalarından bahsedilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde ise çoklu kanal çoklu radyo yapısına sahip kablosuz mesh ağlar, bu ağlarda kullanılan kanal atama şemalarından bahsedilmiştir. Özellikle DMesh mimarisi üzerinde durulmuştur.

Çalışmanın dördüncü bölümünde DMesh mimarisinde kullanılan C-DCA kanal atama protokolünün iyileştirilebilmesi için ortaya konulan iDMesh mimarisinden bahsedilmiş, yeni yöntemde izlenecek olan kanal atama prosedürü açıklanmıştır.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde bu iki mimariyi ağ performansları açısından değerlendirebilmek için simülasyon ortamında değişen metriklere göre ölçümler yapılmıştır.

Tez çalışmasının son bölümünde ise yapılan ölçümler ışığında çalışmayla ilgili sonuç değerlendirmelerine yer verilmiştir.

Şubat 2013, 115 Sayfa.

Anahtar kelimeler: Kablosuz mesh ağlar, yönlendirme, kanal atama.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

WIRELESS MESH NETWORKS and IMPLEMENTATIONS OF WIRELESS MESH NETWORKS

Şafak DURUKAN ODABAŞI

İstanbul University

Graduate School of Science and Engineering

Department of Computer Engineering

Supervisor : Prof. Dr. A. Halim ZAIM

Today, internet becomes a part of our daily life. It has a growing user and usage population from banking applications to online media fun fields. In the future, if internet access become wireless likes our phone services, it will be a practical and efficient situation for users. But this situation needs some new necessities like designing a new network or developing a current network with the changes in the substructure. While trying to find a solution to these problems, mesh networks step in here and they commit a more developed internet with less necessities for a new substructure.

The most important advantage of mesh networks is their capability for working without a substructure. Mesh network will become an additional access technology instead of being a renewed technology in the next generation networks which are called 4G.

Wireless mesh networks have many advantages like small cost, easy maintenance, robustness, secure service. So, this causes various firms realize this technology potential and started to produce and release new wireless network productions. In spite of these advantages and properties, wireless mesh networks need to be researched and developed. It is necessary to configure current protocols again or to expand them. The design of an optimal routing and channel assignment algorithm becomes an obligatory at this point. Although many algorithms were adopted for wired and wireless networks like wireless mesh networks, they do not give efficiency because of their individual characters.

Appropriate to these concepts, in recent years, there are many studies done about mesh networks especially multichannel multiradio wireless mesh networks and routing and channel assignment in these networks. Wireless mesh networks become a more popular technology day by day because of the higher data capacity possibility that multi channel structure presents. In this thesis study, wireless mesh networks and routing algorithms are investigated; the advantages of multichannel structure and algorithms that are used during the channel assignment are explained. By focusing the DMesh architecture that supports directional antenna-based multi-channel structure, channel assignment procedure is analysed and the proposed new method is designed based on this protocol.

In the first section of this thesis study, it is emphasised on general architecture advantages and disadvantages of wireless mesh networks.

In the second section, it is mentioned about routing metrics and algorithms in the literature.

In the third section of thesis, wireless mesh networks with multichannel multiradio and the channel assignment in these networks are explained. Especially, DMesh architecture is analysed in the details.

In the fourth section, it is mentioned about iDMesh architecture which is produced for improving and enhancing the C-DCA channel assignment protocol used in DMesh architecture.

In the fifth section of thesis study, some measurements according to the changeable metrics are done in simulation environment for evaluating both if these architectures according to network performances.

In the last section of the thesis study, the results and conclusions about the study that are done in the consideration of the measurements are presented.

February 2013, 115 Pages.

Keywords: Wireless mesh networks, routing, channel assignment.

1. GİRİŞ

Günümüzde internet günlük hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Bankacılık işlemlerinden, çevrimiçi eğlenceye kadar birçok alanda giderek büyüyen bir kullanıcı kitlesine sahiptir. Gelecekte internet erişimi hücresel telefonlarda sıklıkla kullandığımız servisler gibi kablosuz olursa, bu durum kullanıcılar açısından oldukça verimli olacaktır. Fakat bunu sağlayabilmek için yeni bir ağ tasarlanması ya da mevcut bir ağın geliştirilmesi aynı zamanda altyapıda birçok değişiklik yapılmasını da beraberinde gerektirmektedir. Mesh ağ yapısı bu noktada devreye girmekte ve yeni bir altyapı için daha az ihtiyaçla daha gelişmiş bir internet erişimi vaat etmektedir.

Mesh ağların en büyük avantajı altyapı olmaksızın çalışabilmeleridir. Mesh ağlar, 4G dediğimiz gelecek nesil ağlar içerisinde bu özellikleriyle yenilenmiş bir teknoloji olmaktan çok, ek bir erişim teknolojisi olarak yerini alacaktır.

Kablosuz mesh ağlarının düşük maliyet, kolay ağ bakımı, sağlamlık, güvenilir servis alanı gibi birçok avantajı vardır. Bu da birçok şirketin bu teknolojinin potansiyelinin farkına varmasına ve kablosuz mesh ağ ürünlerini piyasaya sürmeye başlamasına neden olmuştur. Bu avantajlara ve özelliklere rağmen kablosuz mesh ağlarının araştırılmaya ve geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Mevcut protokollerin yeniden yapılandırılması ya da genişletilmesi gerekmektedir. Optimal bir yönlendirme ve kanal tahsis algoritmasının tasarımı bu noktada bir zorunluluk halini almaktadır. Birçok algoritma kablolu ve kablosuz ağlardan kablosuz mesh ağlara uyacak şekilde uyarlanmışsa da, bireysel karakteristiklerinden tam olarak faydalanılamamaktadır.

Diğer taraftan, kablo tabanlı algoritmalar ağdaki her bir linkin bağlantı açısından sadece iki durumda bulunabileceğini varsayar: kablosuz linkler ya mükemmel çalışır ya da hiç çalışmaz.

Bunlara rağmen, kablosuz linkler ideal kablosuz kanal koşullarında –mükemmel görüş alanı ve parazitin olmadığı durumlar da- bile band genişliği bakımından kablolu

linklerle karşılaştırılmaz. Bunlara rağmen, kablosuz mesh ağların yüksek yüklü internet uygulamalarının çalışmasına izin vermesi beklenir. Bu nedenle, kablosuz linklerle uygun bir şekilde ilgilenecek yüksek yük taşıyabilecek yönlendirme algoritmalarının ve var olan kısıtlı sayıdaki kanalların en etkili şekilde kullanımını sağlayacak bir tahsis algoritmasının tasarımı bir gereksinimdir.

Kablosuz ad-hoc ağlardaki yönlendirme protokolü tasarımında ana amaç uçtan-uca bağlantının sağlanmasıdır. Ayrıca bir paketin iletilmesi düğüm enerji kısıtlamaları nedeniyle oldukça masraflıdır. Bu nedenle yönlendirme seviyesindeki araştırma konusu daha ziyade düşük kontrol masraflı yönlendirme teknikleridir.

Bunun aksine, kablosuz mesh ağlarda amaç, bağlantıyı devam ettirmekten ziyade uçtan-uca yollarda yüksek veri yükü seviyelerine ulaşmak, güvenilirlik, esneklik gibi özelliklerin yanı sıra yönlendirme masrafını arttırmak pahasına da olsa en fazla veri yüküne ulaşabilecek yollar seçmektir.

Bu tez kapsamında Kablosuz Mesh Ağlar (Wireless Mesh Networks - WMNs) üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir. WMN sistemlerinin mimari yapıları, geliştirilen standartlar ve var olan yöntemler arasındaki performans farklılıkları üzerinde durulmuştur. Çalışmalar çoklu kanal-çoklu radyo WMN sistemler üzerinde derinleştirilerek, kanal tahsis ve yönlendirme algoritmaları incelenmiş ve kategorize edilmiştir. Çalışmalar neticesinde geliştirilen yönlü antenlere sahip çoklu kanal-çoklu radyo kanal tahsis ve yönlendirme algoritması, DMesh (Incorporating Practical Directional Antennas in Multichannel Wireless Mesh Networks) algoritmasıyla karşılaştırılarak performans değerlendirmeleri yapılmıştır. DMesh algoritmasının kanal tahsis mekanizması üzerinde iyileştirilmesi yapılmış ve bu yeni modelin (iDMesh – Improved DMesh) ağ performansına etkisi ortaya konulmuştur. Son olarak yeni geliştirilen ağ modeli ve algoritmaya konum tespiti özelliği eklenerek, modellenmiş ve sistem üzerindeki parazitlenme açısından artıları ortaya konulmuştur. Tezin tartışma ve sonuç bölümünde elde edilen bulgular yorumlanarak gelecek çalışmalar için fikirler sunulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KABLOSUZ MESH AĞLAR

Kablosuz iletişim hiç şüphe yok ki, hem hücresel hem de kablosuz lokal alan ağlarındaki hızlı büyümeyle arzu edilen bir servis haline gelmiştir. Bu birbirinden farklı iki teknoloji bağlantı ihtiyaçları bakımından birleşmektedir ve bu ortaklıktan faydalanılarak kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda kablosuz bağlantıdan yararlanabilecek birçok uygulama hizmete sunulmaktadır.

Kablosuz ağlar, mobil kullanıcılara her an ihtiyaç duydukları iletişim kapasitesini vermekte ve konuma bakılmaksızın kolay bilgi erişimi sağlamaktadır. İki tür mobil kablosuz ağ vardır (Royer ve Toh, 1999). İlki, altyapılı ağlar olarak bilinen, sabit bir altyapı üzerinde kablolu geçitler, köprüler ve baz istasyonları gibi bileşenler barındıran ağlardır. Bu tür ağların tipik uygulamalarına, Kablosuz Lokal Alan Ağları (Wireless Local Area Networks –WLAN), Kablosuz Metropolitan Alan Ağları (Wireless Metropolitan Area Networks – WMAN) ve hücresel ağlar örnek olarak verilebilir (Chun ve diğ., 2000).

Hücresel ağlar, geniş kapsama alanı sunarlar, fakat daha düşük veri seviyelerini, daha pahalı servis ücretlendirmesiyle gerçekleştirirler. Diğer taraftan WLAN, daha sınırlı bir kapsama alanına sahiptir. WLAN'ların kapsama alanını arttırmak için, çoklu erişim noktalarına bağlı kablolu bir iskelete ihtiyaç duyulur.

WMAN'lar (802.16 ailesi), arzu edilir bir servis kalitesine sahip yüksek veri seviyeleri sağlayarak bu boşluğu bir parça da olsa doldurmaktadır. WMAN'lerdeki ana eksiklik, mobilite desteğinden ve görüş hattı (line of sight - LoS) ihtiyaçlarında yoksun olmasıdır (Sichitiu, 2005). Eğer bir müşteri WMAN baz istasyonuna doğru iyi bir LoS'a sahip değilse, servise ulaşması mümkün değildir. Çok fazla engelin olduğu durumlarda (yüksek binalar, ağaçlar vs.) LoS ihtiyaçlarından dolayı müşterilerin yarısından fazlası servis alamayabilir.

İkinci tür mobil kablosuz ağ ise, altyapısız olandır. Bu tür ağlar öz-organizeli ağlar olarak adlandırıldığı gibi mobil ad-hoc ağlar olarak da bilinirler (MANET). Öz-organizeli ağlar, mevcut ağ altyapısına ya da merkezi sistem yönetimine ihtiyaç duymayan mobil radyo düğümlerinden (host, router ve switch) oluşurlar. Bu ağlar, anlık bir altyapıya ihtiyaç duyulduğu durumlar için uygundur.

Gelecek nesil servisler, yüksek veri seviyelerine, gönderilen ve alınan trafik seviyelerinde tam bir esnekliğe, düşük donanım maliyetine ve servis talebinde bulunan her aboneye ulaşma kapasitesine sahip olmaya ihtiyaç duyacaktır. İşte bu noktada tüm bu sorunları ortadan kaldırabilmek için yeni bir teknoloji ortaya atılmıştır: Kablosuz Mesh Ağlar (Wireless Mesh Networks - WMNs). WMN'ler; hem sabit hem de mobil kullanıcılara düşük masraflı, kablosuz geniş band internet erişimi sağlayarak bu dezavantajların birçoğunu ortadan kaldırır. Mesh kavramı, baz istasyonuna olan ihtiyacı ortadan kaldırarak, bunun yerine kısa menzil noktadan-noktaya bağlantıları kullanarak yeni düğümlerin ağa dahil olmasını sağlar (Whitehead, 2000) . Bu basit kavram, hem operatörler hem de aboneler için, birçok avantaja sahip yeni sistemlerin oluşturulması için kullanılabilir.

WMN'ler teknolojinin yeni bir alanıdır. Yeni nesil internet için çözüm olarak üretilmiştir ve sahip oldukları birçok özellik ile yeni nesil kablosuz mobil ağlar içinde önemli bir rol oynamaktadırlar. WMN'ler, dinamik olarak kendi kendine organize olabilen, yapılanabilen, kendini iyileştirebilen böylelikle esnek entegrasyon sağlayan, hızlı kurulum, kolay bakım, düşük maliyetler, yüksek ölçeklenebilirlik ve güvenli servis özelliklerine sahip sistemlerdir (Aswal ve diğ., 2009).

Bu ağlarda yüksek sayıda düğüm olması, güvenlik, ölçeklenebilirlik, yönetilebilirlik gibi konularda çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmaktadır. WMN'lerin yeni uygulamalarının ortaya çıkması gizlilik korunumunu ve WMN'lerin güvenlik mekanizmalarını bir ihtiyaç haline getirmiştir.

WMN'lerin en büyük sıkıntısı kompleks olmalarıdır. Bir WMN'ü dizayn etmesi, oluşturmak ve paketleri iletmek çok kolay olmasına rağmen güvenlik ve sağlamlığı sağlamak için optimum performansa ulaşabilmek oldukça zordur.

2.1.1. Kablosuz Mesh Ağ Mimarisi

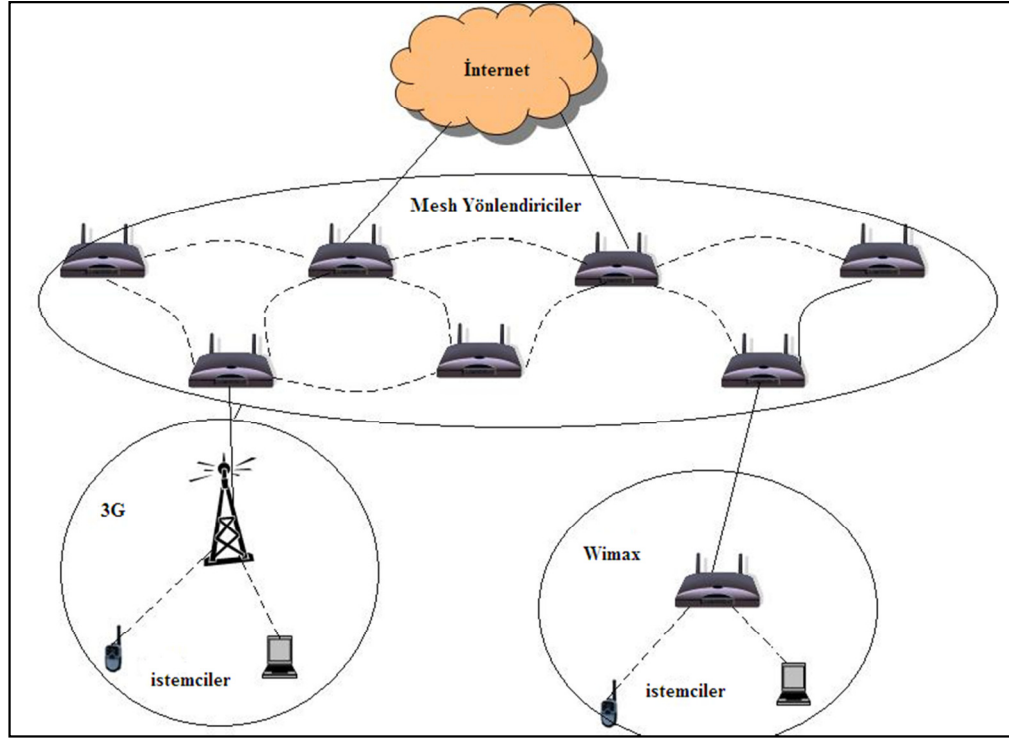
Geleneksel kablosuz ağların aksine, WMN'ler sabit bir altyapı üzerine kurulmuş değildir. Bunun yerine hostlar bağlantıyı korumak adına birbirlerine dayanırlar. Kablosuz mesh ağlar hem ağ operatörleri için hem de kullanıcılar için, sabit ya da mobil hostlara düşük maliyetli internet geniş band erişim, kablosuz LAN kapsamı ve ağ bağlantısı sağlar. Temel olarak kablosuz yönlendiricilerden oluşan ve birbirlerinin paketlerini çok sıçramalı bir şekilde ağ boyunca ileten WMN ağ istemlerinin tercih edilmesinin sebeplerinden biri de kolay, hızlı ve ucuz bir kurulumu sahip olmasıdır. Tipik bir WMN, mesh yönlendiriciler ve mesh istemcilerden oluşur (Zhang ve diğ., 2008). Mesh yönlendiriciler statiktirler. Kablosuz bir altyapıdan oluşur ve mesh istemcilere çoklu sıçramalı bir internet bağlantırlılığı sağlamak için diğer kablolu ağlarla beraber çalışırlar. WMN yönlendiricilerin normal yönlendirici görevlerinin yanında, mesh yönlendirme işlemlerini desteklemek için ekstra işlem kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Bunun için mesh yönlendiriciler birden fazla ağ arayüz kartıyla (Network Interface Card - NIC) donatılır. Mesh yönlendiriciler özel donanım dışında genel amaçlı kullanılan masaüstü bilgisayarlara ve laptoplara kurulabilir.

Mesh istemciler ise ağa mesh yönlendiriciler üzerinden bağlanırlar. Ayrıca birbirleri üzerinden de bağlantı sağlayabilirler. Mesh istemcilerin, yönlendiriciler gibi geçit ve köprü özelliklerine sahip olması gerekmediğinden genelde tek bir kablosuz NIC'a sahiptir.

WMN'ler üç kısımda incelenebilir (Akyildiz ve Wang, 2009):

- **Altyapı/Omurga WMN:** Şekil 2.1'de bir altyapı/omurga WMN'nin temel yapısı gösterilmektedir. Altyapı/omurga WMN'ler kablolu ve kablosuz bağlantıların bir kombinasyonu şeklindedir. Temel topoloji üç seviyeli bir katmandan oluşur: İnternet, mesh yönlendiriciler ve mesh istemciler. Mesh yönlendiriciler bu topolojinin ana iskeletini oluşturmaktadırlar. Mesh

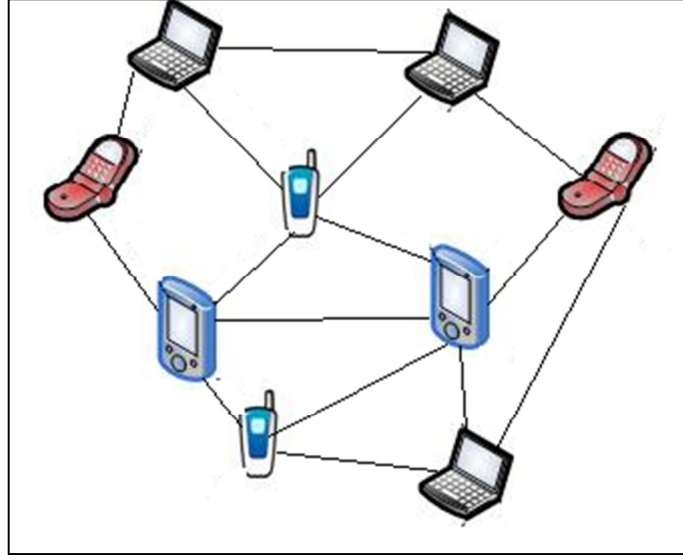
yönlendirici katmanı, internete Ethernet üzerinden bağlanmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi mesh katmanı bağlantıları çeşitli ağ yapılarından oluşabilmektedir. Bu katmandaki istemciler internete direk olarak mesh yönlendiriciler üzerinden ulaşabildikleri gibi ilgili erişim noktası (Access Point - AP) aracılığıyla da ulaşabilirler. WMN omurgası çeşitli kablosuz teknolojiler arasında ağırlıklı IEEE 802.11 teknolojisini kullanır. Altyapı WMN'ler genelde bir topluluk arasında, başka bir deyişle küçük alanlarda kullanılabilir. Diğer yandan mesh omurga iletişimi uzun mesafeleri kapsayacak şekilde tek yönlü antenler tarafından kurulabilir.



Şekil 2.1: Altyapı/omurga kablosuz mesh ağ mimarisi.

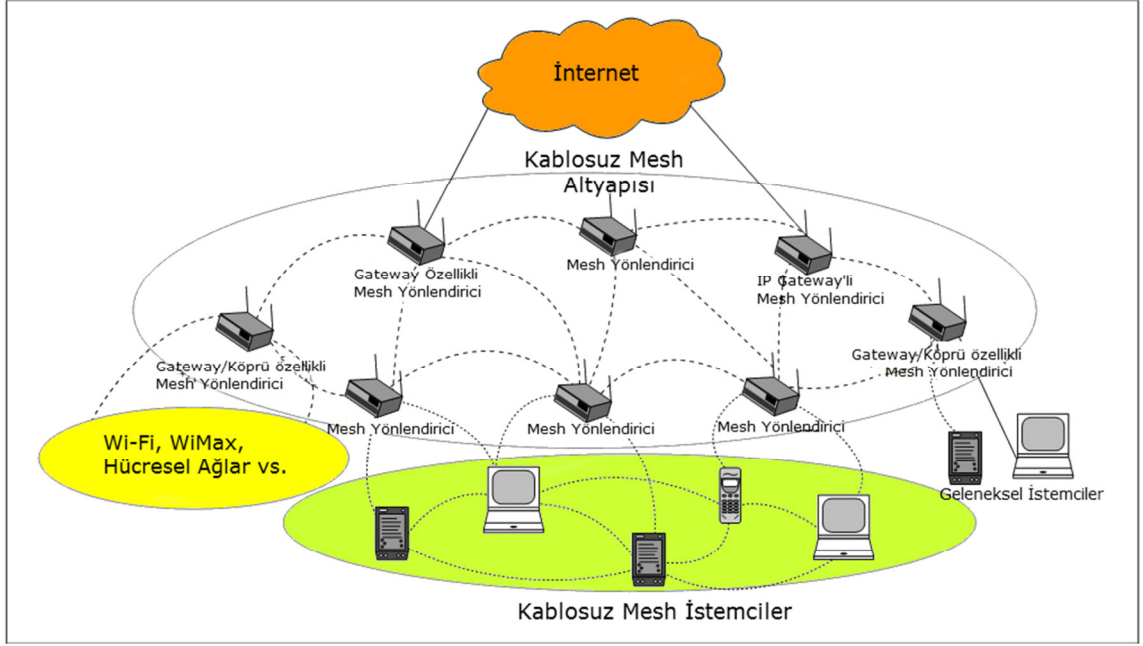
- **İstemci WMN:** İstemci topolojisi, ad-hoc ağlarla çok benzerdir: erişim noktaları ve arka planda iskelet bir ağ yoktur, kendi aralarında organize olmuş şekildedirler. İstemciler mobil telefon, dizüstü bilgisayar, GPS vs. olabilir. İstemciler arasında P2P şeklinde kurulan ağlarda bir yönlendiriciye gerek yoktur. En fazla bu mimaride veri iletişimi gerçekleştirilir. Bir istemci başka bir istemciye paket göndermek istediğinde, bu paket birçok ara düğüm üzerinden

sıçramalı bir şekilde hedefe iletilir. Saf mesh ağının içindeki tüm trafik “Mesh İçi (Intra-Mesh)” olarak nitelendirilmektedir. Tüm trafik tekil düğümler üzerinden geçirilir. Bu türde yapılan iletişimde kablosuz iletişim araçlarının performansı önemlidir, çünkü yönlendiriciler olmadığından kendi iletişimlerinin dışında ağ içindeki paketleri de iletmeleri gerekir. Yani yönlendirme ve öz yapılandırma gibi özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. Bu mimaride, istemci düğümler yapılandırma ve yönlendirme fonksiyonlarını ele alır, ayrıca mesh yönlendiricilerin kullanımını ortadan kaldırmak için son kullanıcı uygulamalarından da sorumlu olurlar. Şekil 2.2’de istemci WMN mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 2.2: İstemci tipi kablosuz mesh ağ mimarisi.

Hibrit WMN’ler: Bu mimari, altyapı ve istemcilerden oluşan karma bir yapıdır. Ek bir ağ yapısı, temel mesh ağının üzerine örterek uzun mesafe paket trafiğini kontrol eder. Altyapı kısmı mesh ağlarla internetin, WiFi ve WiMAX ağlarının iletişimini sağlarken istemciler de yönlendirme işlemlerini düzenlerler. Şekil 2.3’de hibrit WMN mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Hibrit kablosuz mesh ağ mimarisi.

2.1.2. Kablosuz Mesh Ağların Karakteristik Özellikleri

Kablosuz mesh ağlarının mimarisinden gelen karakteristik özellikler aşağıda sıralanabilir (Durukan-Odabaşı ve Zaim, 2011):

- Özellikle merkezi kablosuz ağlardaki görüş hattı (LoS - Line of Sight) problemini çözmek için, birden fazla düğüm üzerinden paketleri göndererek kayıp oranının minimuma indirebilmesi önemlidir. Böylece kanalın kapasitesini çok fazla harcamadan ve LoS sıkıntısını azaltarak daha geniş bir alana hizmet sağlanabilir.
- Ad-hoc ağlar genel ağ performansını artırır; ağın maliyeti ve yapılması gereken yatırım azalır ve ölçeklenebilirlik artar. Ağa sonradan düğüm ekleme ya da çıkartma yapılabilir. Ağ genişletilip daraltılabilir. Kapsama ve etkileşim kontrolsüzdür.
- WMN'ler hem P2P network özelliği taşıırken hem de farklı ağ ortamları ve teknolojilerine kolaylıkla erişim sağlayabilir.
- Enerji tüketiminde, hâlihazırda geçerli olan protokoller gibi kısıtlamalara sahip değildirler. Enerji kısıtlaması olmadığı için, harcama yüksek bir seviyede olabilir. Enerji verimliliği, WMN'da öncelik açısından ilk sırada gelmemektedir.

- Kablosuz mesh ağlar var olan kablosuz ağ teknolojileriyle uyumludur. IEEE 802.11 teknolojisi kullanıldığından iletişim kurulacak diğer ağlar da bu standardı temel almalıdır.
- Düğümler hareketlerinde özgürdürler ve sistemden çıkıp kaybolabilir, kullandığı ağları değiştirebilir ve hücreler arasında gezinebilir. Bu nedenle WMN'ler çok dinamik bir yapıya sahiptir.
- Hareketliliği desteklemek için *kablosuz* operasyon gereklidir, bunu sağlamak için sinyaller veya optik donanım kullanılabilir. Kablolu radyo bağlantıları düşük kalitededir ve paket kaybı bir radyo frekansı üzerinde normal kabul edilebilir. Ancak kablolu ağlar üzerinde paket kaybı, tıkanma sorununu meydana getirir.
- Her düğümün, diğer düğümlerin bilgisine sahip olması gerekebilir. Yani diğer düğümlerin yaptığı işlerden haberdar olmasını gerektiren durumlar meydana gelebilir. Bu durum bant genişliğinin azalmasına neden olabilir.
- Tüm düğümlerin bir yönlendirme protokolüne dahil olması gerekir. Yönlendirme belirli bir protokole bağlı olarak paketlerin yönlendirilmesi işini yapar. Gelen paketlerin nereye iletileceğinin bilgisini sağlar.

Ad hoc ağlar, işleyiş açısından kablosuz mesh ağların bir alt kümesi olarak görülebilir(Camp ve diğ., 2002). Fakat yine de iki ağ arasında belirgin farklar bulunmaktadır. WMN'lerin hibrit olarak çalışan bir altyapıya sahipken ad hoc ağlar tekil kullanıcının bağlantıya katkısı esasına dayanır ki bu da güvenilirliği azaltmaktadır. WMN'ler ayrıca çeşitli ağ yapılarına rahatlıkla entegre edilebilir. WMN'lerde ağ kurulurken fiziksel yapı ve yerleşimi önemli değildir. WMN yönlendiricilerde birden çok kablosuz alıcı/verici vardır. Böylelikle yönlendirme ve köprüleme işlemleri düzenli olarak gerçekleştirilebilir. Bu sayede bir istemcinin gönderdiği paketler birden fazla yol izleyerek hedefe ulaşabilir. Bu durum ağdaki yük oranını dengeleyici bir unsurdur. Diğer yandan ad-hoc ağların genellikle tek bir kablosuz NIC kullanması ağın performansını düşüren büyük bir etkidir. WMN'lerde ağın altyapısını mesh yönlendiricilerin oluşturması taşınabilirlikte performans etkisini dengeleyen bir unsurdur. Ad-hoc ağlarda uçtaki kullanıcıların pozisyonlarına bağlı olarak ağın kapsamı değiştiğinden taşınabilirlikle, pozisyona bağlı sorunlar ortaya çıkacaktır. Uyumluluk alanına baktığımızda, WMN'ler ad-hoc ağları içinde barındırabilmektedir, bu sebeple

önceden geliştirilmiş teknolojiler WMN'lere de uyumludur. Bunun yanında mesh ağları için geliştirilen teknolojiler de kapsama alındığında, varolan ve geliştirilmeye devam edilen teknolojilere uyumluluk, üst düzeydedir.

Çok sıçramalı ihtiyaçların ötesinde, WMN'lerin tasarımında esneklik ve çok yönlülükle sonuçlanabilecek başka bir kısıtlama yoktur (Sichittu, 2005). Mobil kullanıcıları birbirine bağlayan kablosuz linkler, aynı tipte olabildiği gibi tamamen farklı teknolojiler de olabilir (Firetide, 2011). Birçok uygulama WMN'ün alanında olduğu sürece mobil düğümlerin ağa bağlanmalarına izin verir, paketleri aynı çok sıçramalı yöntemle iletirler. Tüm düğümler, istemci düğümleri desteklemek zorunda değildir, servis sağlayıcı ağın kapsamını ya da performansını arttırmak için birkaç ara düğüm görevlendirebilir.

Genişband kablosuz erişim sistemleri, genel olarak baz istasyonları ve abone istasyonlarından oluşan point-to-multipoint (PMP) mimarisine sahiptir. Her baz istasyonu belli bir alandaki belli sayıdaki aboneye servis sağlar. Bu mimari, mobil iletişim sistemleriyle benzerdir. Mesh sistemler ise, multipoint-to-multipoint (MP-MP) olarak tanımlanabilir (Whitehead, 2000). Baz istasyonu yoktur sadece yineleyiciler vardır ve bunlar da çoğunlukla bir abonenin konumuyla ilişkilendirilir. Bir servis erişim noktasından belli bir aboneye bağlantı bir ya da daha fazla birbirini takip eden link üzerinden sağlanır.

2.1.3. Kablosuz Mesh Ağların Kullanım Alanları

Çok yönlülüğünden dolayı WMN'ler birden çok uygulamanın ihtiyaçlarını karşılayabilir (Sichittu, 2005).

2.1.3.1. Geniş Band Internet Erişimi

Günümüzde birçok internet geniş band bağlantısı hem kablo hem de DSL üzerinden sağlanır. Maalesef, özellikle kırsal alanlardaki nüfusun büyük bir çoğunluğu internete bağlanmak için gerekli geniş band altyapısına sahip değildir. İhtiyaç duyulan altyapıyı sağlamak özellikle de internet servis sağlayıcıları için pahalıdır.

Birçok şirket WMN'lerin bir internet erişim çözümü olduğunu fark etmiş ve buna uygun ürünleri piyasaya sürmüştür. WMN'ler internet geniş band erişim teknolojisi olarak dikkate değer avantajlara sahiptir:

- **Düşük Ön Ödeme Masrafı:** Kurulacak hiç kablo olmadığı için, kablo ve DSL ile karşılaştırıldığında, masraf büyük ölçüde azaltılmıştır. İlk kullanıcılar için besleme olarak adlandırılabilen minimal kapsamı sağlayan bir WMN kullanılabilir, kullanıcı sayısı arttıkça ağ da genişletilebilir.
- **Kapsama Alanı:** kablosuz mesh ağlarda bir istemci diğerlerinden biriyle bağlantı sağlayabildiği sürece internet erişiminden yararlanır. Özellikle yüksek binalar ve ağaçlar gibi engellerin çok olduğu senaryolarda, bir PMP (point-to-multipoint - 802.16) ile karşılaştırıldığında bir WMN'ün gözle görülür biçimde kapsama alanını arttırdığı, yapılan çalışmalarla (Karp ve Kung, 2000)'de gösterilmiştir.
- **Hızlı Kurulum:** Mevcut WMN'e yeni bir istemci eklemek, kablolu sistemler ya da DSL'deki gibi uzun süreler yerine kısa bir sürede gerçekleştirilebilir.
- **Dayanıklılık:** Duyarlı bir yönlendirme algoritması bozuk link ya da düğümlerin etrafından yönlendirme yapar, geçit bozulması durumunda buna bağlı düğümler yakındaki geçitlere dağıtılır.

2.1.3.2. İç WLAN Kapsamı

WLAN'larla uyumlu IEEE 802.11'in popülerliği teknolojinin en istenmeyen taraflarını da beraberinde getirmiştir. En küçük binalarda bile kapsamı sağlamak için çoklu erişim noktalarına (Access Point - AP) ihtiyaç duyulmaya başlanmış, tüm bu AP'lerin, bir dağıtım sistemine yani kablolu bir ağa, en çok kullanılan haliyle de bir Ethernet ağa bağlı olma zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Birçok şirket WMN'lerin çoklu sıçrama kapasitelerini bu kablolarla olan ihtiyacı ortadan kaldırmak için kullanmaya çalışmışlardır. Böyle bir kurulumu sağlamak için en azından bir WMN yönlendirici harici ağa bağlı olmalıdır. Diğer tüm WMN yönlendiriciler AP olarak da çalışırlar ve veriyi bir kablosuz istemciden geçite ya da tersi yönde iletirler. WMN'ün başka bir biçimi de AP'lerin bazı modellerindeki köprüleme özelliklerini kullanmak ve birbirlerinin paketlerini iletebilir hale gelmektir. Bunların ana dezavantajı, çok sayıda AP'ye ihtiyaç duyulmasıdır. AP'ler birbirlerinin kablosuz alanı içinde olmak

zorundadırlar. Ayrıca, AP'lerin birbirlerinin verilerini iletebilmek için aynı kanalda olmaları gerektiğinden ve bu durum iletme verimsizliğine neden olduğundan, elde edilen ağ kapasitesi birçok kez geleneksel WLAN'in kapasitesinden daha düşük olabilmektedir.

2.1.3.3. Mobil Kullanıcı Erişimi

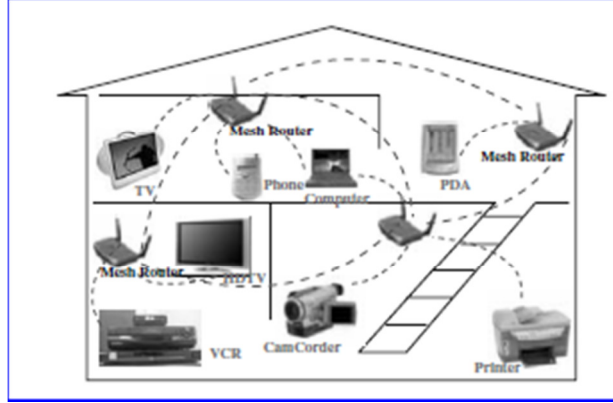
İyi bir şekilde dizayn edilmiş bir kablosuz mesh ağ zorlanmadan en iyi 3G'den daha iyi bir performans sağlar. 3G tarafından sağlanan tüm şeyler WMN'ler tarafından daha az masraflı bir şekilde, büyük ihtimalle de pahalı spektrum lisansına ihtiyaç duymadan sağlanır. Bu da WMN'leri 3G'ye karşı büyük bir rakip haline getirmektedir.

2.1.3.4. Bağlantı

Bazen sağlanan ağ bağlantısı kullanışsız, pahalı, zaman tüketen cinsten ve biçimsiz olabilir. Günümüzde birçok firma, WMN'leri özellikle bağlantıyı sağlamaya yönelik daha dayanıklı bir hale getirmişlerdir. Bu firmaların üretmiş oldukları her bir WMN yönlendiricisi uygun bir Ethernet portuna sahiptir, tüm WMN yönlendiricileri kablosuz bir bulut halini alır, dışarıdan tek bir büyük Ethernet anahtarı gibi görülebilir. Bu sistemlerin dizaynında, internet erişimi ve mobil kullanıcı erişimi isteğe bağlıdır, eğer WMN kapsamına ihtiyaç duyuluyorsa IEEE 802.11 AP'leri WMN düğümlerine bağlanabilir. Geleneksel Ethernet kablolarıyla karşılaştırıldığında geliştirilen bu ürünlerinin ana avantajları şunlardır (Durukan-Odabaşı ve Zaim, 2011):

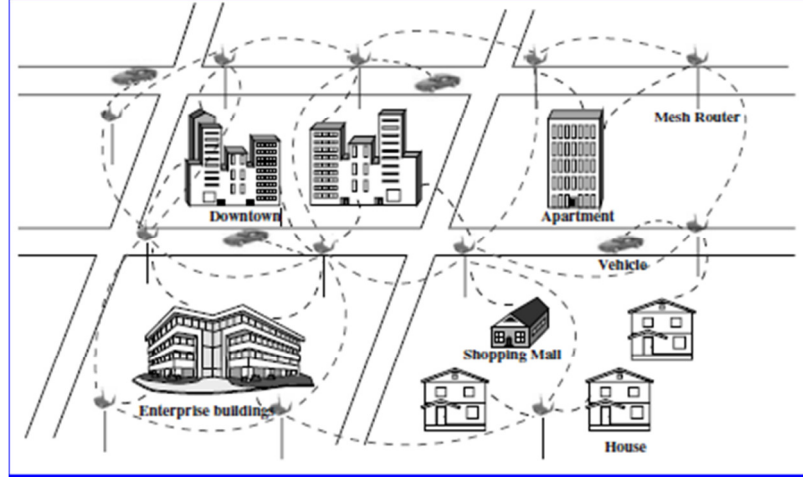
- **Hızlı Kurulum:** Eğer hızlı kurulumla ihtiyaç duyuluyorsa, ağ bağlantısını sağlamak için ihtiyaç duyulan tek şey, uygun alanlardaki güç soketlerine eklenmiş WMN'lerdir. Hızlı kurulumla ihtiyaç duyulmasa bile, bazı durumlarda kabloların döşenmesinin mümkün olmaması WMN'leri avantajlı hale getirir.
- **Estetik Görünüm:** Otel gibi bazı mekânlarda kablolar için delikler açmak pek istenmeyebilir. Bu gibi durumlarda da WMN'ler tercih edilebilir.

Kablosuz ağ uygulamaları mevcut haliyle evlerde birçok “ölü noktalara” sahiptir. WMN ile kurulan bir genişbant ev ağında ise kapsama alanını arttırmak için fazladan fiziksel donanıma gerek kalmadan sadece mesh yönlendiricinin yeri değiştirmek veya sinyal gücünü arttırmak yeterli olabilir. Ad-hoc ve kablosuz algılayıcı ağlar bu türde uygulamaları desteklemek için fazladan veri yüküne sahip olacaktır ama WMN'ler bu konuda yük dengeleme sağladığı için idealdir.



Şekil 2.4: Ev içinde –kısa mesafeli- mesh ağı (Akyildiz ve Wang, 2009).

Aynı şekilde bir mesh yönlendiriciler zinciriyle birden fazla evi hatta bir mahalleyi kapsayacak şekilde mesh yönlendiriciler konumlandırılabilir. Bu duruma bakarak bir iş merkezinin, plazanın veya fabrika kompleksinin bile WMN kapsamına alınabileceğini söylemek yanlış olmaz. Bir şehir için de WMN’ler çok uygundur; doğru konumlandırılmış ve doğru konfigüre edilmiş yönlendiriciler ile bir şehir tümüyle mesh ağ içine dahil edilebilir. Özellikle maliyet açısından kablo ve mevcut IEEE.802.11 kablosuz LAN yönlendiricileri ile kurulmaya çalışacak bir ağın maliyeti, WMN’lere göre çok daha yüksek ve verimsiz olacaktır. Şekil 2.5’de de görüldüğü gibi bir mesh ağ yönlendiriciler zinciri ile şehrin her tarafında hatta araçlarda bile kapsama sağlanması mümkün olmuştur.



Şekil 2.5: Mahalle içinde –çok sıçramalı- mesh ağı (Akyildiz ve Wang, 2009).

WMN’lerin kullanımında farklı örnekleri şöyle sıralayabiliriz (Methley, 2009):

- Topluluk ağı
 - Ev ya da ofis düzeyinde kapalı ağ
 - Mikro baz istasyonu ana taşıyıcısı
 - Araçlar arası ad-hoc ağlar (Vehicular ad hoc Networks-Vanets)
 - Kablosuz Algılayıcı Ağları (Wireless Sensor Networks-WSNs)
- **Topluluk Ağı:** Bu ağda yeni bir alt yapı sistemine ihtiyacı duymadan kapsama alanını geliştirebilecek bir ortam bulunmaktadır. Bir şebekeden yayın yapılır ve evlerde bulunan bir anten ile bu ağa bağlanıp kapsama alanına girilebilir. Her ev bir düğüm olarak düşünülürse, bu ağ yapısını arttırmak ve çoğaltmak internet alt yapısında değişikliğe gitmeden sağlanabilir. Bu da mesh yapısının sağladığı avantajlardan biridir.
 - **Ev Ya Da Ofis Düzeyinde Kapalı Ağı:** Hızlı kurulum yapma ve ağ yapısı oluşturma kablosuz mesh ağlarının temel özelliklerinden biridir. Bu özellikten faydalanılarak bir ev ya da ofis içerisinde hızlı ve ekonomik bir şekilde ağ kurulması mümkündür.

mesh ağ teknolojisini kullanarak hızlı ve verimli denetime imkân tanımaktadır (Durukan-Odabaşı ve Zaim, 2012).

2.1.4. WMN'lerin Güçlü Ve Zayıf Tarafları

Mesh teknolojisinin avantajları çok fazladır. En büyük avantajı altyapıya bağlı olmadan çalışabilmesidir. Düşük maliyet, kolay ağ bakımı, sağlamlık, güvenilir servis alanı gibi avantajları da onun var olan teknolojiler arasından sıyrılmasına olanak tanımaktadır. Mesh sistemlere olan ihtiyacın farkına varan ve pazardaki karını gören birçok şirket Ar-Ge departmanlarında konuyla ilgili çalışmalarını yoğunlaştırmışlar ve mesh sistem parçalarının üretimine ve geliştirilmesine ağırlık vermişlerdir. Mesh ağların avantajlarını kısaca özetlemek istersek (Whitehead, 2000):

- Düşük seviyedeki kullanıcı yoğunluğunda bile yüksek kapsama alanı.
- Mükemmel spektral verim ve kapasite.
- Baz istasyonuna ihtiyaç duyulmaması ve bu nedenle düşük maliyetli olma özelliği.
- Düşük seviyede parazit ile sistem performansında görülen artış.
- Servis alımında esneklik.
- Anten noktalamasının otomatik olarak gerçekleştirilebilmesi.
- Azaltılmış kurulum zamanı.

Tüm bu özelliklerin birleşimi, mesh çözümlerini multimedya çözümleri, yerel ve iş alanları için kitle pazarına uygun hale getirmektedir.

Bu avantajların yanı sıra mesh sistemlerde dikkat edilmesi gereken önemli noktalar da vardır. Mesh ağlarda çok sayıda düğümün bulunması bu ağlardaki karmaşıklığı arttırdığı gibi, bu sistemleri güvenlik, ölçeklenebilirlik, yönetilebilirlik gibi konularda da tehditlerin hedefi haline getirmekte ve bu konularla ilgili önlemlerin alınarak gerekli çalışmaların yapılmasını zorunu kılmaktadır. İhtiyaçlara cevap vermek için geliştirilen her yeni uygulamayla beraber güvenlik ve bilginin korunumu da yeni bir probleme neden olmaktadır. Burada amaç bu sistemler için optimum performansa ulaşabilmektir.

3. KABLOSUZ MESH AĞLARDA YÖNLENDİRME

3.1. YÖNLENDİRME METRİKLERİ

Kablosuz mesh ağlar, uç nokta bağlantının sağlanması için uygun bir çözüm olmasına karşın, iletim ortamının paylaşımlı yapısı nedeniyle bu ağlardan tamamen faydalanmak mümkün olmamaktadır. Radyo kaynaklarının verimli bir şekilde paylaştırılabilmesi için, kablosuz mesh ağlara yönelik birçok yönlendirme metriği dizaynı yapılmıştır. Bu metrikler arasındaki performans farklılıklarını ölçmeye yönelik çalışmalar yapılmışsa da bu farkları tam olarak ifade edebilen bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

Düşük gecikme, yüksek seviyeli iletişim için artan taleplerin olması; Kablosuz Mesh Ağlar'ın (WMNs), kablolu sistemler, 3G hücresel sistemler ve WLAN'lar karşısında alternatif bir çözüm olarak ortaya çıkmasına neden olmuştur (Bellardo ve Savage, 2003). WMN'ler yüksek servis alanı sağlarken, ucuz kurulumla da olanak tanımaktadır. Mevcut kurulumlar (Waharte ve diğ., 2008 - Rayner, 2003), WMN'lerin yüksek potansiyellerini ve ticari değerlerini ortaya koymuştur. WMN'ler düşük gelirli sosyal ağlarda ucuz internet paylaşımı ve üniversite kampüslerinde kapsamayı sağlamak için gerçekleştirilmişlerdir. Bunun sonucu olarak da, Nokia, Microsoft ve Intel gibi büyük firmaların da aralarında oldukları şirketler WMN'ler için tamamen IP-tabanlı çözümler geliştirmektedirler (Bellardo ve Savage, 2003).

Bununla beraber, tüm bu teknolojik gelişmeler ve veriyi çoklu kanallar üzerinden iletme olasılığına rağmen, kablolu ağlarla karşılaştırıldığında iletim seviyeleri sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, artan müşteri taleplerini karşılamak için servis kalitesinin kesinkes sağlanması amacıyla yeterli kaynak yönetimi ve servis sağlama mekanizmaları geliştirilmelidir.

Gerekli kaynak yönetim altyapısını oluşturma işi, etkili bir yönlendirme protokolü ve buna uygun şekilde tasarlanmış bir yönlendirme metriği ile başlar. Son zamanlarda kablosuz mesh ağlar için ortaya konulan yönlendirme metriklerinin sayısında müthiş bir

patlama vardır. Farklı stratejiler ortaya konularak, çakışma seviyesini ölçmek ve trafiği en çok sıkışan alanların etrafından geçirmek amaçlanmaktadır. Fakat bunların hiçbirisi herkes tarafından kabul edilmiş ortak bir metrik değildir. Bunun birçok sebebi vardır:

- **Karmaşıklık seviyesi:** Kolayca elde edilebilecek bazı topolojilerin ya da trafik tabanlı parametrelerin karşısında, çakışma bir problemdir. İlk olarak, kanal kalitesinin değerlendirilmesi, zamanla evrimleştiği ve coğrafik olarak değiştiğinden zor olabilir. Bir gönderici ve alıcı, çakışmanın farklı seviyelerinden etkilenebilir. Bu çakışma eğer iletim seviyeleri uygun bir şekilde belirlenmemişse yüksek paket kaybına sebep olabilecek zayıf kalitede bir ilettime neden olur. İkincisi, bir iletim ortamında, aynı komşuluk içinde ve aynı frekans bandında yapılandırılmış olan tüm düğümlerin iletim ortamına erişmek için mücadele etmeleri uygun bir link tahsisinin gerçekleştirilmesini zorlaştırır. Ayrıca, genellikle link kalitesi ölçümlerinin ağ üzerinde dağıtılması için kontrol mesajlarının değişimi gereklidir. Bu operasyonların masrafı, kayıplı ya da sıkışmış linklerden kaçınarak elde edilen gerçek gelişimi gölgede bırakabilir.
- **Karşılaştırma Yoksunluğu:** Her sunulan metrik, bazı sınırlı senaryolar içinde, belli parametrelerle sadece mevcut yönlendirme metriklerinin küçük bir alt kümesi içinde değerlendirilir. Bu da metrikler arası karşılaştırmanın sağlıklı bir şekilde yapılmasını mümkün kılamaz.
- **Anlayış Eksikliği:** Kablosuz mesh ağlar için farklı yönlendirme metriklerinin mevcut değerlendirmeleri sadece bazı başarılı senaryolar için üretilmektedir. Metrikler açısından bakıldığında, verimlilik çok nadir sağlanabilmektedir. Bu durumlarda, eğer farklı ağ ayarları göz önüne alınmışsa, belli bir metriğin performansını tahmin etmek zor olacaktır.

Bu nedenle, WMN'ler için ortak olarak en çok kullanılan yönlendirme metriklerinin performansını değerlendirmek, bu metriklerin performansını değerlendirmeyi daha da kolay hale gelecektir.

WMN iskelet yönlendiricileri ad hoc ağlarla benzer şekilde çok sıçramalı iletişimi kullanırlar. Diğer taraftan, mobil kullanıcılar iskelete, erişim noktası görevi gören mesh yönlendiriciler üzerinden bağlanırlar. İskelet yönlendiriciler sabittir. Bu da yönlendirme ölçütlerinin basit sıçrama sayısını kullanmak yerine link kalitesini modellemesine izin verir. WMN’lerdeki yaygın uygulamalarda internet erişiminin, trafiğin geçitlere yakın linklerinde biriktiği kabul edilebilir.

Özellikle WMN’ler için ortaya konulan metriklerin yanı sıra ad hoc ağlar gibi diğer tipteki ağlar için geliştirilen fakat WMN’lere adapte edilen metrikler şu şekilde sıralanabilir (Durukan-Odabasi ve Zaim, 2011):

3.1.1. Sıçrama Sayısı (Hop Count)

Sıçrama sayısı, kablosuz çoklu sıçramalı ağlarda en çok kullanılan metriktir. Seçilen yol bir kaynakla hedef arasındaki link sayısından minimize edilmiş olanıdır. Bu metrik, ad-hoc ağlarda oldukça popülerdir, çünkü farklılaştırma kriteri olarak sadece yol uzunluğunu göze aldığı için hesaplama kolaylığı sağlar. Diğer taraftan bu metrik, belirli kablosuz ortamlarda linkler belki farklı iletim seviyelerine, kayıp oranlarına sahip olduğundan başarısız olabilir ve iletim ortamının paylaşılmasından dolayı ortaya çıkacak olan tıkanmayı göz önüne almaz.

3.1.2. Bloklama Metriği (Blocking Metric)

(Schrack ve Riezenman, 2002)’de, sıçrama sayısı metriğini geliştirmek için, belli bir yol boyunca paraziti değerlendirecek bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışmada, parazit seviyesi, *bloklama değeri* olarak iade edilmiş, bir düğümün iletişimine engel olabileceği komşu düğümlerinin sayısı şeklinde ifade edilmiştir. Her düğüm bu bloklama değerine göre bir ağırlık değeri ile ifade edilir. Bu nedenle trafik akışını taşıyacak olan yol en düşük masraf değerine sahip yoldur.

Bu teknik, basit olması, komşuların sayısı bilgisini korumaktan başka ek bir masraf getirmemesi gibi avantajlara sahiptir. Yine de bu metrik, link kapasitesi ya da trafik akışını göz önüne alan hiçbir karakteristiği ortaya koymamakta ve sadece yüzeysel bir

şekilde parazit konusu üzerinde durmaktadır. Bu nedenle de performans açısından sıçrama sayısı metriği üzerinden sadece küçük bir oranda iyileştirmeye neden olmuştur.

3.1.3. Beklenen İletim Sayısı (Expected Transmission Count - ETX)

ETX, bir paketin kablosuz bir link üzerinden başarılı bir şekilde teslim edilmesi için gereken iletimlerin sayısıdır (Wei ve diğ., 2005). Bir yolun ETX değeri yol boyunca yer alan her linkin ETX değerlerinin toplamıdır. p_f ve p_r ileri ve geri yönlerdeki paket kayıp olasılığı olsun. Başarısız bir iletim olasılığı, p :

$$p = 1 - (1 - p_r)(1 - p_f) \quad (3.1)$$

Bundan dolayı, bir sıçrayışta başarılı bir şekilde bir paketi teslim edilebilecek iletimlerin sayısı da;

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} kp^k(1-p)^{k-1} = \frac{1}{1-p} \quad (3.2)$$

ile ifade edilir.

Teslim oranları 134 byte'lık kontrol paketleri kullanılarak ölçülür. Her τ saniyede bir, bir kontrol paketi gönderilir. Paket kayıp oranı, önceden tanımlanmış bir zaman aralığında alınan kontrol paketlerinin sayısı ile hesaplanır.

ETX, artan self-parazit yüzünden, daha uzun yolların daha düşük yük miktarına sahip olması nedeniyle, yolları daha yüksek yük ve daha az sayıda sıçrama ile destekler. Bunun yanında, bu metrik, iletim seviyeleri arasındaki farkı göz önünde bulundurmaz. Bir kontrol paketinin göndericisi, eğer kanalın meşgul olduğunu hissederse paketi göndermeyi erteleyeceğinden, tam anlamıyla iletim ortamındaki paraziti yakalamaya imkân tanımaz. Kontrol paketlerinin iletim seviyesi genellikle düşük olduğundan, bir linkin gerçekten ne kadar meşgul olduğu ve verimli link paylaşımıyla ilgili bilgi vermez.

3.1.4. Beklenen İletim Zamanı (Expected Transmission Time - ETT)

ETT, ETX üzerinden hesaplamaya band genişliğinin de dahil edilmesiyle yapılmış bir geliştirmedir(De Couto ve diğ., 2003). S paket boyutu, B de ele alınan linkin band genişliği olsun. ETT şu şekilde hesaplanır:

$$ETT = ETX \frac{S}{B} \quad (3.3)$$

ETX'le benzer şekilde, bir yolun beklenen iletim zamanı, yol boyuncaki tüm linklerin ETT değerlerinin toplamına eşittir.

3.1.5. Ağırlıklı Birikimli ETT (Weighted Cumulative ETT - WCETT)

(De Couto ve diğ., 2003)'de, farklı kanallara sahip yolları dikkate almak için dizayn edilmiş olan WCETT bir p yolu için şu şekilde tanımlanır:

$$WCETT(p) = (1 - \beta) \sum_{linki \in p} ETT_i + \beta \max_{1 \leq j \leq k} X_j \quad (3.4)$$

Burada β , 1'den küçük ayarlanabilir bir parametredir ve X_j , j kanalının p yolu boyunca kaç kez kullanıldığını göstermektedir.

Yine de bu metrik hala efektif link paylaşımını hesaplamadığı için ETX/ETT gibi aynı kısıtlamalardan etkilenir ve akışlar arası paraziti tam olarak yakalamaz.

3.1.6. Modifiye edilmiş Beklenen İletim Sayısı (Modified Expected Transmission Count - mETX)

(Draves ve diğ., 2004)'de, ETX'in kanal çeşitliliğini göz önüne almadığı ve sadece ortalama kanal davranışını önemseydiği için bu eksikliği gidermek amacıyla bir genişletme yapılmıştır. mETX şu şekilde ifade edilir:

$$mETX = \exp(\mu_{\Sigma} + \frac{1}{2} \sigma_{\Sigma}^2) \quad (3.5)$$

μ_{Σ} ve σ_{Σ}^2 hata olasılığının ortalamasını ve değişebilirliğini göstermektedirler.

Bu metriğin uygulanmasındaki ana engel, iletim kanalının değişkenliğini tam anlamıyla modellemek ve ölçmektir.

3.1.7. Ağ Tahsis Vektör Sayısı (Network Allocation Vector Count - NAVC)

NAVC (Koskal ve Balakrishnan, 2006), verilen bir inceleme periyodu için, bir link boyunca bir düğüm tarafından gözlemlenen ağ tahsis vektörlerinin ortalamasının alınması ile elde edilen akışlar arası parazit ile ilgilidir. Elde edilen değere göre, düğüme bir sıkışma seviyesi atfedilir. Yol bulma işlemi boyunca, 2 parametre elde edilir: heavy_node_number ve nav_sum. Bir ROUTE REQUEST paketinin alınması ile beraber, bir düğüm ölçülen NAVC değerine göre 3 seçeneğe sahip olur:

- I. Eğer $NAVC > 0.65$ ise: heavy_node_number değerini 1 arttır, nav_sum ile $NAVC^2$ 'yi topla.
- II. Eğer $0.25 \leq NAVC \leq 0.65$ ise: nav_sum değerini NAVC kadar arttır.
- III. Eğer $NAVC < 0.25$ ise: hiçbirşey yapma.

Bir düğümün masrafı yol üzerindeki her düğümün heavy_node_number'ları ile nav_sum'larının toplamına eşittir. Yollara ilk olarak heavy_node_number, ikinci olarak da nav_sum değerlerine göre öncelik verilir.

3.1.8. Arayüz ve Kanal Anahtarlama Metriği (Metric of Interface and Channel Switching - MIC)

MIC (NS-2, 2011), WCET üzerinden verimli link paylaşımı ile ilgili daha fazla bilgi edinerek geliştirme yapmak amacıyla tasarlanmıştır. N düğümden ve p yoldan oluşan bir ağ için, MIC mevcut tüm linkler üzerinden iletim yapmak için zamanı ortalara. WCETT'ye benzer şekilde, MIC kanal çeşitliliğini hesaba katmak için Kanal Anahtarlama Masrafı (Channel Switching Cost - CSC) adı verilen bir terim eklemiştir.

$$MIC(p) = \frac{1}{N \times \min(ETT)} \sum_{link \ l \in p} IRU_l + \sum_{node \ i \in p} CSC_i \quad (3.6)$$

$\min(ETT)$, ağdaki en küçük ETT'yi ve IRU_l de aşağıdaki şekilde tanımlanan, parazit haberli kaynak kullanımını temsil eder.

$$IRU_l = N_l \times ETT_l \quad (3.7)$$

$$CSC_i = \begin{cases} w_1, & \text{if } CH(\text{prev}(i)) \neq CH(i) \\ w_2, & \text{if } CH(\text{prev}(i)) \equiv CH(i) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$0 \leq w_1 < w_2$$

N_i , 1 linkinin parazitleştiği düğümlerin sayısı, ETT_i 1 linkindeki beklenen iletim zamanını, $CH(i)$ i düğümün kanal atamasını ve $\text{prev}(i)$ ise p yolu boyunca i düğümünden önceki düğümü gösterir. IRU_l , 1 linki tarafından tüketilen toplam kanal zamanıdır. CSC, belirli bir yol üzerinde bir linkten önceki linkin kullandığı kanalın bir fonksiyonu olarak bir linke atanan bir ağırlıktır. Eğer her iki link de aynı kanalı kullanıyorsa, linke daha büyük bir ağırlık atanır.

Bu metrik, uygulama bakımından, bazı büyük dezavantajlara sahiptir. Her linke ait ETT'nin güncel bilgisini sağlamak için ihtiyaç duyulan masraf trafik yüküne bağlı olarak ağ performansını ciddi şekilde etkileyebilir. İkinci olarak, bu metrik çakışma alanında yer alan tüm linklerin her düğümdeki trafik yükü farklılıklarından habersiz olan aynı seviyedeki parazite katkıda bulunduğunu varsayar.

Her ne kadar birçok yönlendirme ölçütü varsa da, ortak bir görüş yoktur. Şimdiye kadar ETX ve ETT gibi basit tasarım ölçütleriyle tasarım gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.1'de ortaya konulan bu ölçütlerin ana karakterleri belirtilmektedir.

Tablo 3.1: Ana yönlendirme ölçütlerinin karakteristik özellikleri.

Metrik	Kalite Farkındalığı	Veri Seviyesi	Paket Boyutu	Akış İçi Parazit	Akışlar Arası Parazit	Ortam Değişkenliği
Hop	X	X	X	X	X	X
ETX	√	X	X	X	X	X
ML	√	X	X	X	X	X
ETT	√	√	√	X	X	X
WCETT	√	√	√	√	X	X
MIC	√	√	√	√	√	X
mETX	√	√	√	X	X	√

3.2. YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ

Ad-hoc yönlendirme protokolleri genellikle proaktif, reaktif ya da hibrittir. Proaktif strateji, kablolu ağlardaki klasik yönlendirme gibi çalışır. Yönlendiriciler, ağdaki

herhangi bir hedefe giden en az bir tane yolu rezerve ederler. Diğer taraftan reaktif protokoller, bir hedefe giden bir yolu ancak o düğümün gönderecek bir paketi varsa rezerve ederler. Eğer bir düğümün belirli bir hedefe gönderilecek bir paketi yoksa düğüm o hedefe giden bir yol talebinde bulunmaz.

Birçok WMN yönlendirme protokolü benzer stratejileri kullanır. Fakat WMN'lerin özelliklerine cevap verecek şekilde yeniden uyarlanmışlardır. WMN'ler için 4 gruptan oluşan bir sınıflandırma verilebilir (Campista ve diğ., 2008) : ad-hoc tabanlı, kontrollü taşmalı, trafik farkındalıklı ve fırsatçı. Her sınıf, yol keşfi ve koruma prosedürü bakımından farklılaşmıştır. WMN'lerde, birçok yönlendirme protokolü ağın sadece kablosuz iskelet düğümlerden oluştuğunu varsayar ve bu şekilde işleyişini sürdürür.

3.2.1. Ad-Hoc Tabanlı WMN Yönlendirme Protokolleri

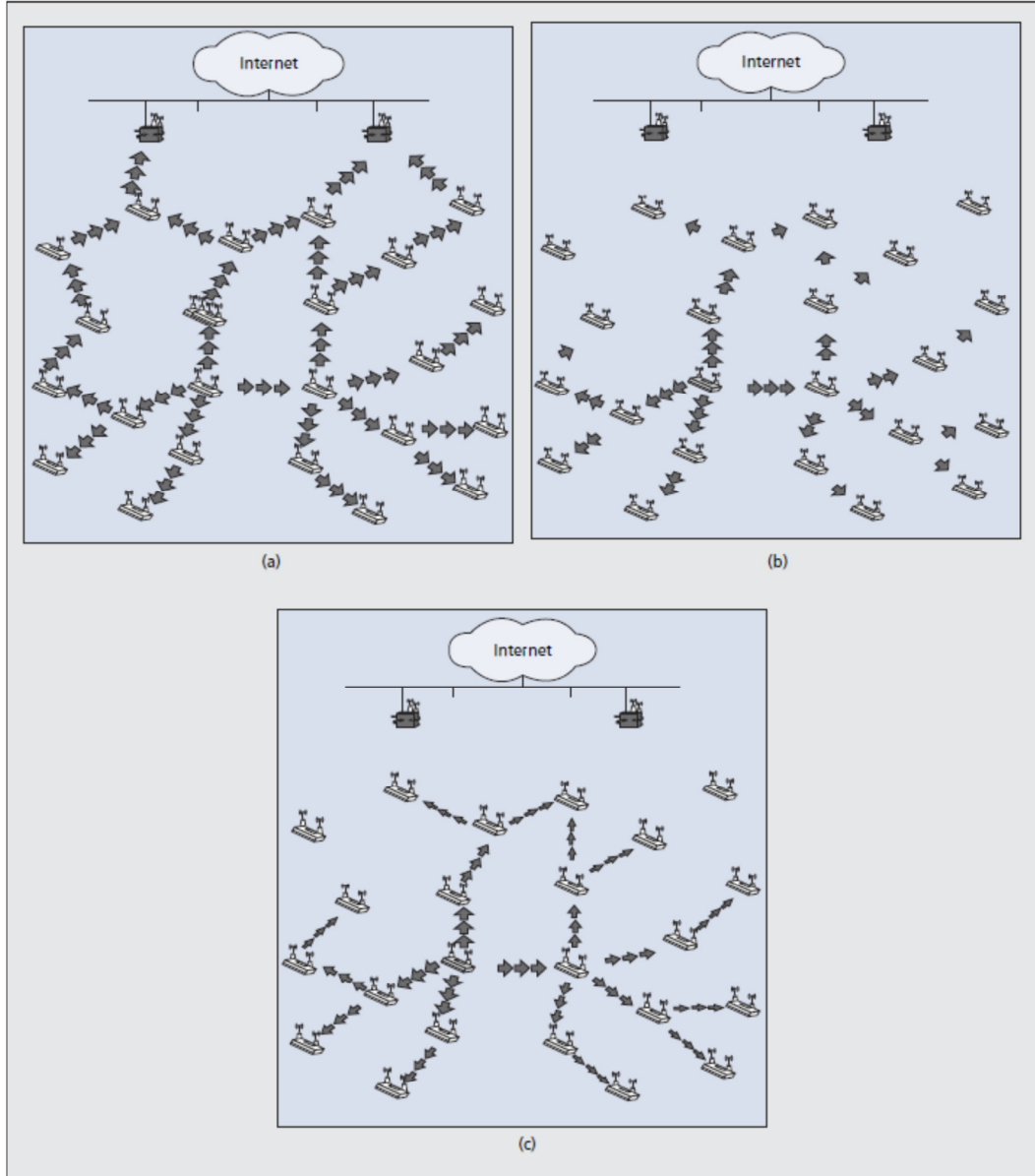
WMN ad-hoc tabanlı protokoller link kalitesi değişimlerine ayak uydurabilmek için ad-hoc yönlendirme protokollerine uyarlanmıştır. Yönlendiriciler, link ölçütlerini devamlı olarak günceller ve bu bilgiyi diğer yönlendiricilere yayarlar. Bu grup altında gösterilebilecek yönlendirme protokolleri şunlardır:

- **Link kalitesi kaynak yönlendirme protokolü (Link Quality Source Routing - LQSR):** (Draves ve diğ., 2004), link konumu proaktif yönlendirmesi ile ad-hoc ağlardaki reaktif stratejiyi birleştirir. Bir link-durum protokolü olarak LQSR, en kısa yolları hesaplamak için ağın tamamı hakkındaki bilgiyi kullanır. Fakat LQSR reaktif protokollerdeki gibi, ortam kararlılığı ve kullanıcı mobilitesi yüzünden yüksek olabilecek yönlendirme protokolü masrafını düşürme amacıyla yol keşif prosedürünü kullanır. Yol keşfi işlemi boyunca, LQSR çapraz linklerin link durum bilgisini toplar.
- **SrcRR:** SrcRR(De Couto, 2004), diğer bir ad-hoc tabanlı protokoldür. Reaktif protokolüne benzeyen, çapraz linklerin yönlendirme bilgilerini güncellemek için sadece bir keşif prosedürü kullanır. Fakat yolları hesaplamak için ağın bütün bilgisini kullanmaz. Hem LQSR hem de SrcRR yol keşif prosedürünü kaynak yönlendirme ve ETX metriklerini kullanarak gerçekleştirirler.

- **Çoklu Radyo LQSR (Multi Radio Link Quality Source Routing - MR-LQSR):** Fiziksel katman teknikleri, genellikle yönlendirme protokollerinin toplam verimliliğini iyileştirmek için kullanılırlar. Çoklu radyo LQSR (MR-LQSR) (Draves ve diğ., 2004), LQSR'ı çoklu kanallar ve arayüzler üzerinden, WCETT metriğini kullanarak çalıştırabilmek için uyarlanmıştır. WCETT minimum masraflı yolları garanti etmese de, MR_LQSR döngüsüzüdür, çünkü kaynak yönlendirmeyi kullanır.

3.2.2. Kontrollü Taşmalı WMN Yönlendirme Protokolleri

Kontrollü taşıma protokolleri, kontrol masrafını azaltmak amacıyla tasarlanmıştır. Ağın yönlendirme ile taşması, özellikle eğer ortam koşullarında sık değişimler meydana geliyorsa ölçekleme problemlerine neden olabilir. Klasik taşmayla karşılaştırıldığında, yönlendirme masrafını azaltacak 2 temel yaklaşım ortaya konulmuştur (Campista ve diğ., 2008) (Şekil 3.1a). Zamansal taşmada (Şekil 3.1b), frekans kaynak yönlendiriciye olan uzaklığa göre belirlenmiştir. Diğer taraftan uzamsal taşmayı kullanarak (Şekil 3.1c), uzak düğümler kaynaktan daha az kesin ve detaylı bilgileri alırlar. Pratikte, birçok protokol yönlendirme bilgisini kendi gördükleri şekilde geçici yaklaşımı kullanarak yayarlar. Temel yargı, ağın taşmasının verimli olmadığı yönündedir çünkü kablosuz ağlarda birçok bağlantı yakın düğümler arasında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, komşu düğümlere gönderildiği sıklıkta uzak düğümlere paket gönderilmesi gerekmez. Masrafı azaltmanın bir yolu da, ağ da taşmadan sorumlu düğüm sayısını sınırlamaktır. Ağdaki tüm düğümlere yönlendirme bilgisini iletmek için gerekli olan minimum düğüm kümesi sayısını bulacak algoritmalar kullanmak genel bir yaklaşımdır.



Şekil 3.1: Kontrollü taşıma biçimleri (a) klasik taşıma, (b) zamansal taşıma, (c) uzamsal taşıma (Campista ve diğ., 2008).

Bu grup altında gösterilebilecek yönlendirme protokolleri şunlardır:

- **Merkezi isteğe bağlı link durum yönlendirmesi (Localized On-Demand Link State Routing -LOLS):** (Nelakuditi ve diğ., 2005), linklere bir uzun süreli bir de kısa süreli maliyet atfetmektedir. Uzun süreli ve sıra süreli maliyetler, sırasıyla genel ve mevcut maliyetleri ifade ederler. Kontrol maliyetini azaltmak için, kısa süreli maliyet sık aralıklarla komşulara gönderilirken, uzun süreli maliyetler uzun periyotlar kullanılarak gönderilir. LOLS algoritması yolları ETX ve ETT kullanarak hesaplar.

- **Mobil Mesh Yönlendirme Protokolü (Mobile Mesh Routing Protocol - MMRP):** Diğer bir tipik örnek de MITRE Corporation tarafından geliştirilmiş olan Mobil Mesh Yönlendirme Protokolüdür. MMRP, yönlendirme protokollerine, open shortest path first (OSPF) protokolünün yaptığı gibi bir yaş ataması yapar. Ne zaman bir düğüm bir yönlendirme mesajı gönderse, mesajı iletmek için gerekli olan zaman yaşından çıkartılır. Zamanı dolduğunda bir mesajın düşürülmesi ve yeniden gönderilmesi sağlanır. MMRP bir yönlendirme ölçütü belirlemez.
- **Optimize Edilmiş Link Durum Yönlendirme Protokolü (Optimized Link State Routing Protocol -OLSR):** Kontrollü taşma protokolünün (RFC 3626) bir başka örneğidir (Campista ve diğ., 2008). OLSR, ETX'in bir WMN metriği olarak kullanılması için uyarlanmıştır. Belirli bir zaman aralığında kaybolan HELLO mesajlarının oranını ETX'i hesaplamak için kullanır. OLSR ayrıca, ad-hoc tabanlı protokol olarak da adlandırılabilir, yine de bir kontrollü taşma tekniği olan çok noktalı yayınları (Multi Point Relays -MPRs) kullanır. OLSR, fazlalığı azaltmak için dağıtılan kontrol mesajlarından sorumlu düğümlerin sayısını da sınırlandırır. Her düğüm ayırıcı düğümlerden alınan yönlendirme bilgisini iletmekle sorumlu düğümlerin bir birleşimi olan kendi MPR'larını seçerler. Her düğüm, tüm iki sıçramalı komşulara erişmeyi sağlayacak olan minimum sayıda tek sıçramalı komşuya sahip MPR kümesini oluşturur.

3.2.3. Trafik Farkındalıklı WMN Yönlendirme Protokolleri

Trafik farkındalıklı ya da ağaç tabanlı protokoller, WMN'lerin genel trafik matrisini dikkate alır. Ana taşıyıcı erişiminin genel durum uygulaması olduğunu kabul edersek, ağaca benzer bir ağ topolojisi göz önüne alınır (Campista ve diğ., 2008).

Bu gruptaki protokoller şu şekilde sıralanabilir:

- **İsteğe bağlı Ad-hoc Uzaklık Vektörü – Tarama Ağacı (Ad-hoc on demand distance vector-spanning tree - AODV-ST):** AODV-ST (Ramachandran ve diğ., 2005), AODV'yi ad-hoc ağlardan adapte ederek mesh ağlarda çalışabilir hale getirmektedir. AODV-ST'de, geçit periyodik olarak ağdaki her düğümden

yönlendirme tablosunu güncellemek için mevcut yol bilgisini ister. Geçit ağacın köküdür. Geçitin dahil olmadığı bağlantılarda orijinal AODV kullanılır. AODV-ST, ETX ve ETT ölçütlerini destekler.

- **Raniwala ve Chiueh'in Önerdiği Protokol:** Raniwala ve Chiueh kablolu ağlarda kullanılan yayılım ağacına dayanan bir yönlendirme algoritması önermişlerdir (Raniwala ve Chiueh, 2005). Yol korunumu isteklerin giriş ve çıkışıyla yapılır. Bu protokol, yük dengeleme için sıçrama metriği ve diğer metrikleri kullanır.

3.2.4. Fırsatçı WMN Yönlendirme Protokolleri

Klasik yönlendirme protokolleri, bir veri paketini göndermeden, hedefe olan sıçrama dizisini hem sıçrama – sıçrama hem de kaynak yönlendirme kullanarak hesaplar. Link hataları durumunda, başarılı link katmanında yapılan tekrar gönderimler, bir sonraki sıçrayışta ulaşılacak komşudaki başarılı alışı ya da maksimum sayıdaki link katmanı tekrar gönderimi sayısına ulaşıncaya kadar yapılır. Bu yaklaşım, yüksek gecikme ve düşük performansa neden olabilir, çünkü kablosuz linkler hataları onarmak için zamana ihtiyaç duyarlar. Diğer taraftan işbirlikçi çeşitlilik şemaları, bir hedefe giden çoklu yolları kurmak için radyo frekans iletişiminin yayılım doğasından yararlanırlar. Alıcı, sinyalleri seçmek ya da bunların bir kombinasyonunu kullanmak için uygun vericilere ihtiyaç duyar. Fırsatçı protokoller, işbirlikçi çeşitliliğini standart IEEE 802.11 vericilerine uyarlar. Bu nedenle, sadece bir düğüm her paketi yönlendirir. Örneğin, fırsatçı protokoller, en iyi yükü vadeden bir sonraki sıçrayış anında seçerler. Bu protokoller, verinin daima en azından bir sıçrayışın olduğu yere iletilmesini garanti eder. Ayrıca, seçilen yol muhtemelen, kısa vadeli varyasyonları içeren en iyi kalitede linkleri kullanır.

Bu gruptaki protokoller şu şekilde sıralayabiliriz:

- **ExOR Protokolü (Extremely Opportunistic Routing):** ExOR yönlendirmeyi MAC katmanı fonksiyonelliği ile kombinler (Biswass ve Morris, 2005). Yönlendiriciler, yayılma paketlerini yığın haline, bir önceki yol hesaplamalarını içermeyecek şekilde gönderirler. Paketler, protokol masrafını azaltmak için yığınlar halinde iletilir. Ayrıca yayılma, veri paketleri güvenilirliği artırır, çünkü bir iletimi ıstimesi için sadece bir ara yönlendiriciye ihtiyaç vardır. Yine

de bu paketlerin alınacağını garanti etmez. Çünkü bu paketler onaylanmamıştır. Bu nedenle, doğru veri alımını göstermek için ekstra bir mekanizmaya ihtiyaç duyulur. İletimi duyan ara yönlendiriciler arasında bir seferde sadece bir tekrar iletim yapılır. Kaynak yönlendirici, bir iletim listesi tanımlar ve veri paketlerinin başlığına ekler. Bu liste ETX'e benzer bir metrikle hesaplanan iletim önceliğine göre sıralanan komşuların listesinden oluşur. ExOR tarafından kullanılan ölçüt, sadece iletim yönündeki kayıp seviyesini dikkate alır çünkü hiçbir doğrulama yoktur. Bir veri paketinin alınmasına bağlı olarak, ara yönlendiriciler iletim listesini kontrol ederler. Eğer adresleri listelenmişse, tüm bir paket yığını almak için bekler. Fakat yine de bir yönlendiricinin tüm yığını almaması olası bir durumdur. Bu problemle başa çıkmak için, paketleri alan en yüksek önceliğe sahip yönlendirici bunları iletir ve iletilen paketleri düşük öncelikli yönlendiricilere gönderir. Bu nedenle, daha düşük öncelikli yönlendiriciler kalan paketleri iki kez göndermekten kaçınarak iletirler. Hedef alımı onaylayana kadar iletim devam eder.

- ***Dirençli Fırsatçı Mesh Yönlendirme Protokolü (Resilient Opportunistic Mesh Routing Protocol - ROMER)***: ROMER (Yuan ve diğ., 2005) uzun süreli en kısa yol ile anında fırsatçı iletimli minimum gecikme yollarını, dayanıklı yollar sağlamak ve ortam kalitesinde kısa süreli varyasyonların üstesinden gelmek için birleştirir. ROMER, uzun süreli yolları hesaplar ve bunları çalışma anında, fırsatçı bir şekilde kısa süreli daha yüksek kalitede linklerden faydalanmak için uzatır ya da kısaltır. Uzun süreli yollar minimum sayıda sıçrama ya da minimum ortalama gecikme kullanılarak hesaplanır. ExOR'un aksine, ROMER ortam değişimlerine daha hızlı ayak uydurabilmek için paket temelinde iletim yapar. En yüksek yüke sahip yol, MAC katmanı tarafından işaret edilen maksimum fiziksel seviyeye göre seçilir.

Tablo 3.2'de yukarıdaki sınıflandırmaya göre yönlendirme protokolleri ve kullandıkları metrikler gösterilmiştir.

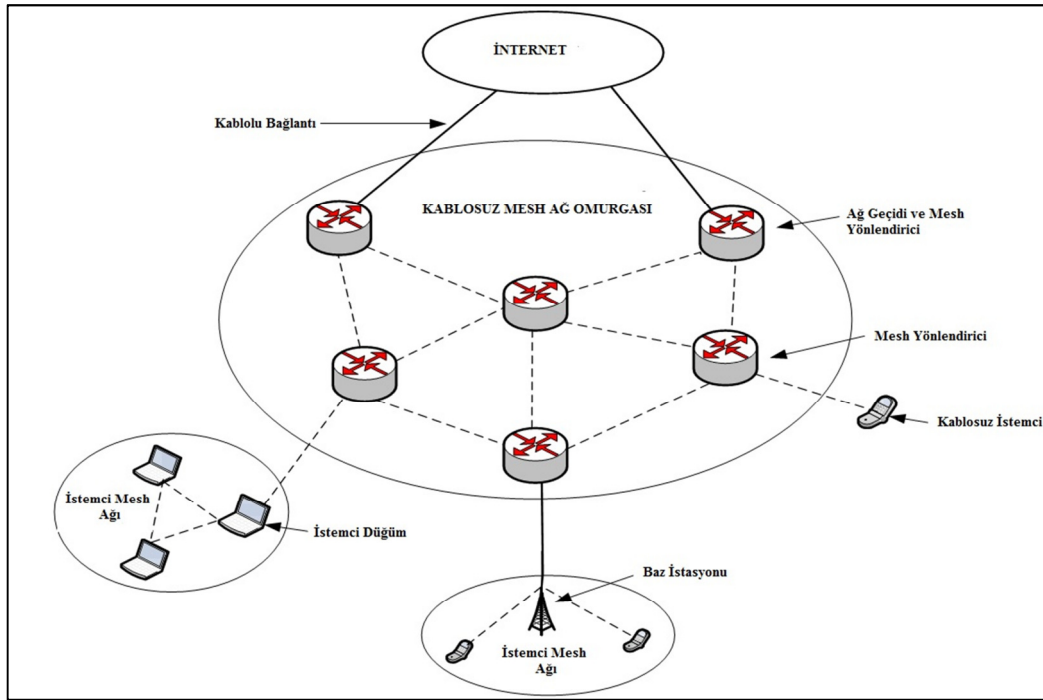
Tablo 3.2: WMN Yönlendirme Protokolleri ve Kullandıkları Metrikler.

Sınıf	Protokol	Kullanılan Metrikler
Ad-Hoc Tabanlı	LQSR	ETX
	SrcRR	ETX
	MR-LQSR	WCETT
Kontrollü Taşmalı	LOLS	ETX ya da ETT
	MMRP	Belirtilmemiş
	OLSR	Sıçrama, ETX, ML ya da ETT
Tarfik Farkındalıklı	AODV-ST	ETX ya da ETT
	Raniwala ve Chiueh'in Protokolü	Sıçrama ya da yük dengeleme metrikleri
Fırsatçı	ExOR	Tek yönlü ETX
	ROMER	Sıçrama ve gecikme

4. ÇOKLU KANAL ÇOKLU RADYO KABLOSUZ MESH AĞLAR (MULTI-CHANNEL MULTI-RADIO WIRELESS MESH NETWORKS – MCMR WMNS)

Kablosuz mesh ağlar, esasında mobil ad hoc ağların bir çeşididir. WMN’ler sabit ve mobil cihazların çok sıçramalı bir ad hoc ağı oluşturmak amacıyla kablosuz linkler yani kanallar üzerinden birbirlerine bağlanmasıyla oluşan bir yapıdır. Kablosuz mesh ağların ana avantajı, esneklik ve bağlantı güvenilirliği açısından ağda tespit edilen bozuklukları giderebilmesi ve çok sıçramalı iletimler sayesinde düşük maliyetli, internet erişimini sağlayarak mevcut ad hoc ağlar, kablosuz lokal alan ağları (WLANs) ve kablosuz kişisel alan ağlarının (WPANs) bu yöndeki eksikliklerini kapatmasıdır (Alzubir ve diğ., 2012).

Tipik bir WMN mimarisi yukarıdan aşağıya doğru üç seviyeden oluşur: ağ geçitleri, mesh yönlendiriciler ve istemciler (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: MCMR WMN Mimarisi.

Bu bileşenleri sırasıyla açıklamak gerekirse:

- **Ağ Geçiti:** Kablosuz mesh ağ bileşenleri ile internet gibi diğer ağlar arasında bir köprü vazifesi görür. Ağ geçidi seviyesinin yokluğu ya da uygun olmaması durumunda WMN sadece lokal ağın bağlantısına hizmet etmek için kullanılır.
- **Mesh Yönlendiriciler:** Paketleri diğer WMN bileşenlerine iletmek ya da onlardan gelen paketleri almak için kullanılırlar. Bu yönlendiricilerin birçoğu sokak lambaları ya da evlerin çatılarına konuşlandırılarak erişim noktalarında olduğu gibi mümkün olan en geniş alanı kapsayacak şekilde hizmet verirler.
- **Mesh İstemciler:** WMN servislerini kullanan kablosuz araçlar ve sabit araçları kapsarlar. Ayrıca, kendi aralarında ve mesh yönlendiricilerle beraber bir istemci mesh ağı oluşturabilirler.

Kablosuz mesh ağlarda, her bir mesh yönlendirici çeşitli kablosuz ağ arayüz kartı (Network interface card -NIC) ya da radyo arayüzü ile donatılmıştır. Her bir radyo bir orthogonal kanal üzerinde çalışabilecek şekilde ayarlanırlar. İki radyo, aynı kanala atanmışlarsa, birbirleriyle haberleşebilirler. 802.11b/g standardı 3, 802.11a standardı ise 12 adet birbirleri üzerine binmeyen orthogonal kanalı destekleyecek şekilde çalışır.

Kanal ataması, var olan kanalların mesh yönlendiriciler (düğümler) arasında uygun bir şekilde dağıtılabilmesi açısından çoklu radyo çoklu kanal WMN'lerde önemli bir konudur. Kanal atamasının ana görevi, kanallar arasındaki paraziti azaltmak ve düğümler arasında paketlerin iletebileceği uygun yolların varlığını garanti altına almaktır.

4.1. MCMR WMN'DE KANAL ATAMASI

Kablosuz mesh ağların kapasitesini arttırmak için ağdaki her bir düğüm çoklu kanallara atama yapılabilecek çoklu arayüzlerle donatılır ve böylece ağda taşınabilen etkin yük artarken parazit seviyesinde azalma gözlenir (Alzubir ve diğ., 2012).

Kanal ataması sırasında ulaşılmak istenen başlıca hedefler şunlardır:

- **Paraziti Minimize Etmek:** Parazit, WMN'lerde kanal ataması sırasında karşılaşılabilecek en önemli zorluklardan bir tanesidir. Birbirine yakın 2 kablosuz link aynı kanalda yani aynı frekansta çalışacak şekilde ayarlandığında, aynı anda veri iletimi yapamayabilirler. Parazit aslında sistem performansını

düşüren en önemli faktörlerden biridir. Kanal atamasındaki ana hedef, çoklu kanal ve radyolar kullanarak WMN’lerdeki paraziti minimize etmektir. Bu amaçla kullanılan ve en çok benimsenen iki model vardır (Alzubir ve diğ., 2012): Protokol Modeli ve Fiziksel Model.

- **Protokol Modeli:** Her radyonun, bir iletim bir de parazit alanı vardır (iletim alanı < parazit alanı). Bir X radyosundan Y radyosuna doğru yapılan bir iletim, Y’nin X’in iletim alanında olduğu fakat X’in dışında o anda iletim yapan başka bir radyonun parazit alanında olmadığı durumda gerçekleştirilebilir.
- **Fiziksel Model:** Bir iletim, alıcıdaki ileticinin eğer Parazit Sinyali ve Gürültü Oranı belli bir eşik değerinin altındaysa iletim başarılı olur. Alıcıdaki parazit ve gürültü enerjisi, diğer iletimler tarafından üretilen gürültü ve ağdaki çevresel gürültülerden oluşmaktadır.
- **Taşınabilir Etkin Yüğü En Üst Seviyeye Çıkarma:** Birçok çalışmada çoklu kanal çoklu radyo (Multichannel-multiradio MC-MR) ataması kullanılarak, paralel iletimlerin sayısını artırma yoluyla WMN’lerin ağda taşınır etkin yük miktarını iyileştirme amaçlanmaktadır.
- **Yük Dengeleme:** Yük dengelemedeki amaç, düğümlere kanal ataması yaparken aynı zamanda ağdaki kanallar arasında yük dengelemesini sağlamak ve paraziti azaltmaktır.

4.1.1. Çoklu Kanal Atamalarında Tasarım Sorunları

MCMR WMN’de kanal ataması sırasında karşılaşılan temel tasarım sorunlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- **Bağlantının Korunması:** Ağ yapısının korunması, ağın alt ağlara bölünmesini engellediğinden ağ kaynakları açısından kullanışlıdır, böylelikle bilgi değişimi ve balım operasyonlarının kolaylaşmasıyla ağ performansı iyileştirilebilir.
- **Yönlendirme:** Bazı durumlarda yönlendirme kanal atamasına bağlı olduğu gibi tersi de mümkündür. Son zamanlarda bu konu üzerinde çalışan araştırmacılar yönlendirme ve kanal atama şemalarının birlikte çalıştığı yapılar üzerinde

durmaktadır. Yönlendirme protokolünün başarılı bir şekilde sisteme entegre edilmesi ile çakışma ve parazitten kaçınmak mümkün hale gelmektedir.

- **Hata Toleransı:** Hata toleransı, yazılım ya da donanımda meydana gelen beklenmedik aksaklıklar, dışsal parazit ya da geçici engellemeler nedeniyle oluşabilecek yönlendirici problemleriyle ilgilenen bağımsız bir çözümdür. Dolayısıyla, kanal atama yaklaşımının hata toleransını destekleyerek ağın kendi kendini onarabilecek bir şekilde çalışmasını sağlaması gerekmektedir.
- **Eşitlik:** Eşitlik kavramı ile kanal atama şemalarının toplam ağ yükünü düğümler arasında uygun bir şekilde dağıtması sağlanmaktadır.

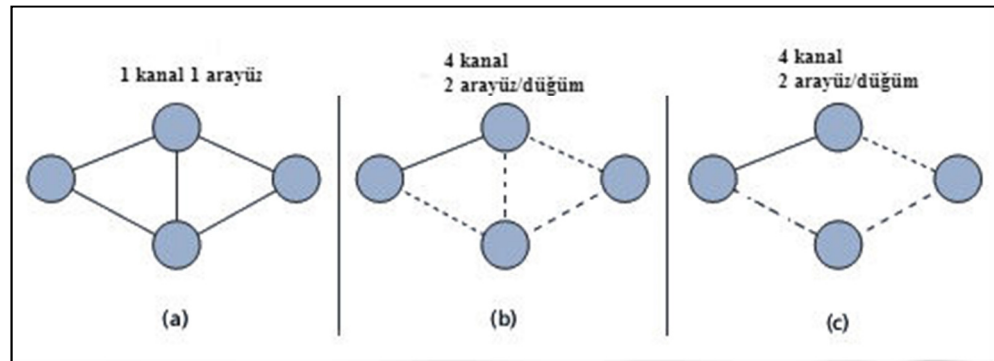
4.2. KANAL ATAMA ŞEMALARI

Yeni nesil kablosuz mobil iletim farklı teknoloji ve servisleri bir araya getiren birleşmiş ağlar mantığı ile hareket eder. Kablosuz mesh ağlar, geniş coğrafik alanlarda esnek bir yüksek band genişliği sağlayarak geleceğin bütünleşik ağlarında ana bileşenlerden biri olması amacıyla tasarlanmıştır. Tek kanalda çalışan tek radyolu mesh düğümleri kapasite kısıtlamalarından etkilenirken, çoklu üst üste binmeyen kanalları kullanan çoklu radyolarla donatılmış mesh yönlendiriciler kapasite problemini azaltarak ağın toplam band genişliğinde artışa neden olabilirler. Bununla beraber, radyo ara yüzlerine kanal ataması yapılması sırasında ciddi sorunlarla karşı karşıya kalınabilir.

Kablosuz mesh ağlarda, kablosuz omurga, bir ya da daha fazla radyo ara yüzleriyle donatılmış kablosuz mesh yönlendiricilerden oluşur. Bu durum mesh ağın kapasitesini önemli ölçüde etkiler. Ayrıca sistemin performansı üzerinde de büyük bir etkisi vardır. Mevcut 802.11 tabanlı ağ kartlarını kullanan mesh ağlar genellikle tek bir radyoyu kullanan tek bir kanal üzerinde çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Bu yapılandırma ağdaki komşu düğümlerin neden olduğu parazit nedeniyle ağ performansını olumsuz yönde etkiler. Bu problemi çözmek amacıyla MAC protokollerinin WMN'lere uyarlanması, tek bir radyoda kanal değiştirme yapılması ve yönlü antenlerin kullanılması gibi çözüm yolları ortaya atılmıştır (Skalli ve diğ., 2007). Yönlü antenler ve uyarlanmış MAC protokollerinin kullanılması geniş bir alanda düşünüldüğünde bu tarzda çözümlerin pratik olarak uygulanmasını mümkün kılmazken, çoklu kanalların tek bir radyo ile kullanılmasındaki ana problem dinamik kanal değiştirmenin düğümler arasında sıkı bir zaman senkronizasyonuna ihtiyaç duymasıdır.

Her düğümün çoklu radyolarla donatılması ise WMN'lerin kapasitesini arttıran bir yaklaşımdır. 802.11 a standardı 12, 802.11 b/g standardı ise 3 adet üst üste binmeyen yani bir komşulukta eş zamanlı kullanılabilen kanalı desteklemektedir. Böylelikle verimli bir spektrum dağılımı sağlanırken ağda kullanılabilen band genişliği miktarı da arttırılabilmektedir. Var olan donanımın rahatlıkla kullanılabilmesi çoklu radyo çözümlerini ekonomik açıdan çekici kılmaktadır. Farklı frekanslarda çalışan, farklı duyma-sezme mesafeleri, band genişliği ve sönme karakterlerine sahip radyoların zamansal ve uzamsal olarak ayrıştırılması ağ kapasitesinde artışa neden olabilir.

Her ne kadar çoklu mesh düğümleri mesh ağların performansını arttırıcı özelliğe sahip olsa da, ağdaki sınırlı sayıda kanalların neden olduğu parazitin olumsuz etkileri azaltılmaya çalışılırken, verimli kanal ataması ağ bağlanabilirliğini korumaya çalışırken çözülmesi gereken ana sorundur. Bir WMN düğümü, iletim alanı içerisinde yer alan ve sanal bir link ya da bağlantı kurmak istediği her bir komşusuyla ortak bir kanal paylaşmak zorundadır. Bunu yaparken, düğümün ortak kanalı paylaştığı komşu sayısını azaltarak paraziti sınırlaması gerekir. Şekil 4.2.'de bağlanırlılığı artırırken parazit seviyesini azaltma arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 4.2.a'da maksimum bağlanırlılık seviyesine ulaşma gösterilmiştir. Şekil 4.2.b ve c'de toplam dört kanalın olduğu durumlar resmedilmiştir. Şekil 4.2.b'de bu kanalların sadece 3 tanesi radyolara atanmakta ve bağlanırlılık maksimum seviyeye çıkarılmaktadır. Diğer taraftan 4 kanalın hepsinin birden kullanıldığı Şekil 4.2.c'de parazit seviyesi en aza indirgenmektedir.



Şekil 4.2: Parazit ile bağlanırlılık arasındaki ilişki a) tek kanallı senaryo; b) maksimum bağlanırlılık; c) minimum parazit.

4.2.1. WMN'ler İçin Kanal Atama Şemalarının Sınıflandırılması

Bir çok radyolu ortamda kanal ataması verimli kanal dağıtımına ulaşmak ve paraziti en aza indirmek için kanalların radyolara atanmasıyla gerçekleştirilir. Bu nedenle, kanal ataması açısından performansta karşılaşılabilecek sorunları çözmek amacıyla birçok araştırma yapılmıştır (Skalli ve diğ., 2007). Mevcut kanal atama şemaları 3 sınıfa ayrılabilir: sabit, dinamik ve hibrit (Skalli ve diğ., 2007). Sabit şemada kanal atama neredeyse statikken, dinamik şemada performansı arttırmak adına sürekli güncellenir. Hibrit şemada ise bazı ara yüzler için sabit bir şema kullanılırken diğerleri için dinamik şema kullanılmaktadır.

4.2.1.1. Sabit Kanal Atama Şemaları

Sabit atama şemaları kanalları arayüzlere ya daimi olarak atar ya da arayüz değiştirme zamanına bağlı olarak daha uzun zaman aralıkları boyunca atar. Bu türdeki şemalar ortak kanal ataması ve değişken kanal ataması olarak iki alt gruba ayrılabilir.

- **Ortak kanal ataması (Common Channel Assignment -CCA):** En basit şemadır. CCA'da (Kysanur ve Vaidya., 2005), her düğümün radyo arayüzleri aynı kanal kümesine atanır. Bu yaklaşımın avantajı, ağ bağlantırlılığının tek kanallı yaklaşımla aynı olması ve çoklu kanallarla da ağdaki etkin yük miktarının arttırılabilmesidir.
- **Değişken kanal ataması (Varying Channel Assignment-VCA):** VCA şemasında, farklı düğümlerin arayüzleri farklı kanal kümelerine atanabilir (Raniwala ve diğ., 2004 - Marina ve Das, 2005). Fakat kanalların bu şekilde atanması ağda bölünmelere ve mesh düğümler arasında daha uzun yollara neden olacak olan topoloji değişikliklerine neden olabilir. Bu nedenle bu şemada atamanın çok dikkatli bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu gruptaki mevcut algoritmalar şunlardır:
 - **Merkezi Kanal Ataması:** Hyacinth'ı temel alan merkezi bir kanal atama algoritması (Raniwala ve diğ., 2004)'de ortaya atılmıştır (C-HYA). Bu algorithmada trafik direk olarak ağ geçidi düğümlerine doğru yönlendirilir. Trafik yükünün bilindiği varsayılarak kanallar atanır, böylece ağ bağlantırlılığı ve her linkin band genişliği sınırlamaları garanti altına alınmış olur. Algoritma öncelikle her trafik akışından aldığı yük bilgisine dayanarak toplam beklenen yük miktarını öngörür. Daha sonra

algoritma beklenen trafik yüküne göre azalan sırada her bir sanal linki ziyaret ederek kanal atamasını yapar.

- **Topoloji Kontrol Yaklaşımı:** (Marina ve Das, 2005)'da Bağlı Düşük Parazitli Kanal Atama (Connected Low Interference Channel Assignment - CLICA) adı verilen verimli ve esnek bir algoritma öne sürülmüştür. Bu algoritmada her mesh düğümünün önceliği hesaplanmakta ve bağlantırlık ve çakışma graflarına göre kanal ataması yapılmaktadır. Algoritmada esnekliğin olmayışı göz önüne almak ve ağ bağlantırlılığını sağlamak adına düğümlerin önceliği görmezden gelinebilir. Bu yüzden algoritma linklerin tekrar tekrar ziyaret edilmesi sorunuyla başa çıkarken WMN'ler için geliştirilen kanal atamasındaki trafik kalıplarıyla beraber çalışamaz hale gelebilir.

4.2.1.2. Dinamik Kanal Atama Şemaları

Dinamik atama yaklaşımı bir arayüzün herhangi bir kanala atanmasına olanak sağlar ve arayüzler sıklıkla bir kanaldan diğerine geçiş yapabilir. Böylece, düğümler iletişim kurma ihtiyacı hissettiğinde bir kontrol mekanizması bu düğümlerin aynı kanalda olduğundan emin olur. Örneğin bu tipteki mekanizmalarda tüm düğümlerin önceden tanımlanmış ortak bir kanalı (So ve Vaidya, 2004) periyodik olarak ziyaret ederek, kanalların iletimin bir sonraki aşaması için müzakere etmesi gerekebilir.

Dinamik atama şemasının avantajı, bir arayüzün herhangi bir kanala rahatlıkla değiştirilebilmesidir, bu da daha az arayüzle daha fazla kanalın kullanımını mümkün kılar. Yine de bu yaklaşımda sıklıkla yapılan kanal değişimleriyle ortaya çıkan gecikmeler göz önüne alınmalı ve düğümler arasında koordinasyonu sağlayan sağlam bir mekanizmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

- **Dağıtık Kanal Atama Şeması:** (Raniwala ve Chiueh, 2004) ve (Raniwala ve Chiueh, 2005)'de dinamik ve dağıtık bir kanal atama kümesi öne sürülmüştür. Bu algoritmalar, ağdaki etkin taşınabilir yükü iyileştirmek ve yük dengesine ulaşabilmek için ağda meydana gelen trafik yükü değişimlerine tepki verebilirler. Hyacinth mimarisine dayanarak ortaya atılan D-HYA algoritmasında her bir ağ geçidinin bir tarama ağacının kökü olduğu ve her bir

mesh düğümün de bu ağaçlardan birine mensup olduğu bir tarama ağacı ağı topolojisi ortaya konulmuştur (Skalli ve diğ., 2007). Kanal atama problemi şu adımlardan oluşmaktadır:

- **Komşu-Ara yüz Bağlantısı:** Her düğüm komşusuyla haberleşmek için bir ara yüz seçer ve dalga etkisinden kaçınmak için ağlar arasındaki bağımlılık ortadan kaldırılır.
- **Ara yüz-Kanal Bağlantısı:** Her arayüze bağlanacak olan kanal seçilir. Burada amaç düğümler arasındaki yükü dengelemek ve paraziti azaltmaktır.

Son olarak kanallar, trafik bilgilerine göre arayüzlere atanırlar.

4.2.1.3. Hibrit Kanal Atama Şemaları

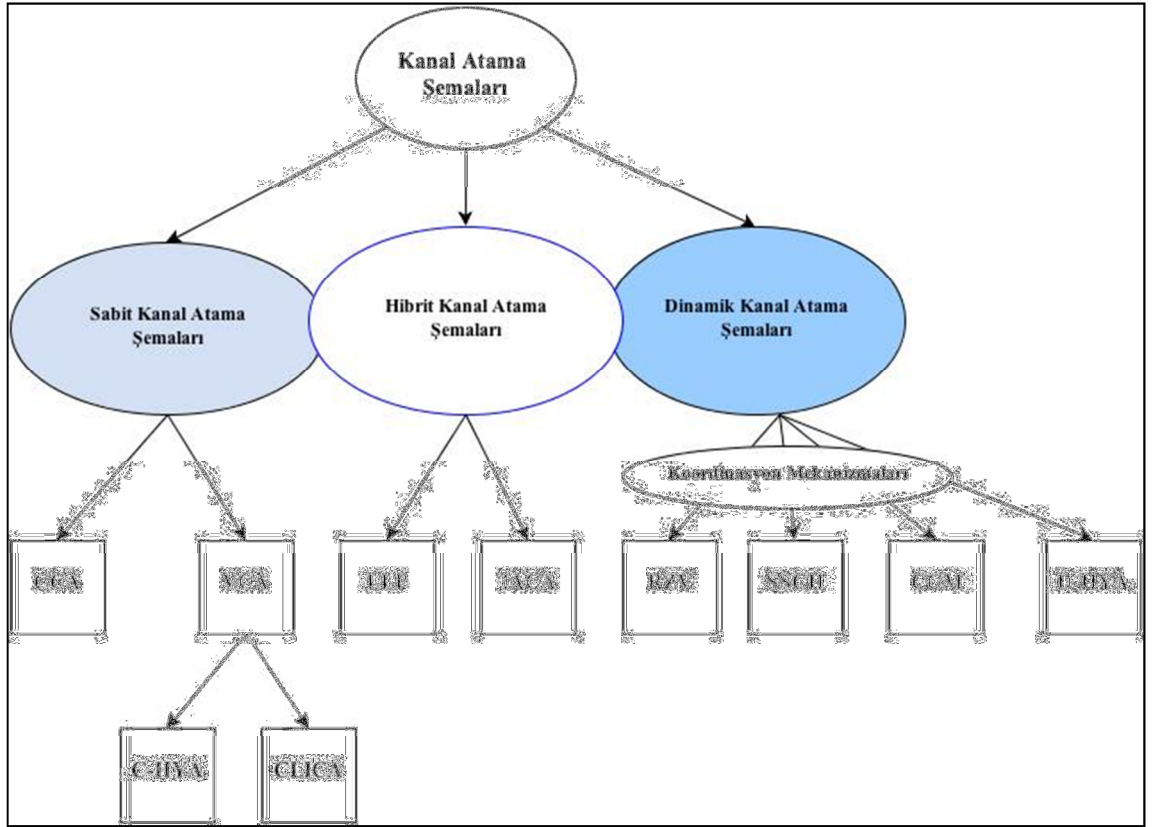
Hibrit kanal atama stratejileri bazı arayüzlere dinamik atama yaparken bazılarını statik atama yapma yoluyla, dinamik ve statik stratejileri birleştirirler. Hibrit stratejiler sabit arayüzlerin ortak bir kanalı mı yoksa değişken kanal yaklaşımını mı kullandığına bağlı olarak sınıflandırılabilir. Sabit arayüzler özel bir kanala (Raniwala ve Chiueh, 2004), bir veri ya da kontrol kanalına (Ramachandran ve diğ., 2006) atanırken, diğer arayüzler kanallar arasında dinamik olarak gezinebilirler. Hibrit şemalar caziptirler çünkü sabit atamayla beraber basit koordinasyon algoritmalarına izin verirken dinamik atamayla da esnekliği korumayı başarırlar.

Hibrit şemalara örnek teşkil eden algoritmalar aşağıda sıralanmıştır:

- **Ara yüz Ataması için Link Katmanı Protokolleri (Link Layer Protocols for Interface Assignment - LLP):** LLP kullanılabilir arayüzleri sabit ve dinamik olarak sınıflar. Sabit arayüzler uzun zaman aralıkları için spesifik sabit kanallara atanır. Diğer taraftan değiştirilebilir kanallar, veri trafiğine bağlı olarak sabit olmayan kanallar arasında kısa aralıklarla değiştirilebilir. Farklı kanallardaki farklı düğümlerin sabit arayüzlerinin dağıtımıyla tüm kanallar kullanılabilirken değişebilir arayüzler de bağlantının sürdürülmesini sağlar.
- **Parazit Haberli Kanal Ataması:** Kablosuz mesh ağlarda kanal ataması yaparken karşılaşılan en büyük sorunlardan biri de parazitlenmedir. Bunun için dinamik ve merkezi bir parazit haberli kanal atama algoritması (Interference

aware Channel Assignment -IACA) ortaya atılmıştır (Ramachandran ve diğ., 2006). Bu algorithmada WMN omurgasının kapasite artırılırken parazit de en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Algoritma çakışma grafi esasına dayanmaktadır. Öne sürülen çözümde her düğümdeki bir radyo ortak bir kanalda çalışacak şekilde atanır. Bu stratejiyle ortak bir ağ bağlantırlık grafi elde edilir, yedek sıkışma yolları sağlanır ve bozuk bir kanal üzerinden trafiğin yeniden yönlendirilmesi ile oluşacak akış bozulmalarından kaçınılır. Bu şema, parazitli radyoların sayısına bağlı olarak parazit ve band genişliği hesaplamaları yapar. Parazitli radyo, bir mesh yönlendirici tarafından görünebilen ama onun ağı için dışsal bir özellik gösteren eş zamanlı çalışan bir radyodur.

MCMR WMN’lerde kullanılan kanal atama şemaları Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Çoklu radyo çoklu kanal kablosuz mesh ağlarda kanal atama şemaları.

5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında üzerinden durulan ilk nokta DMesh'in kanal atama sırasında ortaya çıkacak parazit miktarını azaltarak, ağıın veri iletim kapasitesini arttırmaya yöneliktir. Bunun için DMesh'de kanal katama algoritması olarak kullanılan C-DCA algoritmasını iyileştirmek için kanal kullanımında parazite daha fazla önem veren, parazit-haberli bir kanal atama yöntemi –iDMesh (Improved DMesh)- önermekteyiz. Sonuç kısmında, önerdiğimiz kanal atama mimarisinin kablosuz çoklu kanal çoklu radyolu bir mimaride DMesh ile parazit miktarı açısından performans karşılaştırılmasının yapılması için gerçekleştirilen simülasyon çalışması üzerinden sonuçlar açıklanmaktadır.

5.1. AĞ MİMARİSİ

5.1.1. DMesh – Yönlü Antenler Kullanılarak Gerçekleştirilen Bir WMN Mimarisi

WMN'lerin kullanılabilirliğini etkileyen 3 ana faktör vardır:

- Yüksek yük miktarı
- Masraf verimliliği
- Kurulum kolaylığı

DMesh (Incorporating Practical Directional Antennas in Multichannel Wireless Mesh Networks) modeli (Das ve diğ., 2006), WMN'lerin taşıyabileceği yük miktarını arttırmak için yönlü antenlerdeki uzamsal (mekânsal) ayrışmayı, orthogonal kanallardaki frekans ayrıştırması ile birleştiren bir mimaridir. DMesh, bu yük artırımına, pahalı ve fiziksel olarak fazla yer kaplayan beamforming yönlü antenlerin aksine, kolay bulunan ve ucuz maliyetli pratik yönlü antenleri kullanarak, masraf verimliliği ve kolay kurulum özelliklerini engellemeden ulaşır. Bu nedenle, DMesh için en önemli problem, bu pratik antenlerin elektriksel yönlendirme ve parazit sıfırlama özelliklerinin olmaması ve önemli yan ve arka (side-backlobes) kulaklarının bulunmayışıdır (Durukan-Odabaşı ve Yılmaz-Kaplan).

WMN'ler ile gerçekleştirilebilecek en önemli uygulama, kablolu altyapının zor ya da ekonomik olarak mümkün olmadığı durumlarda, geniş band erişiminin sağlanmasıdır. WMN'lerin 3 ana karakteri, yüksek sayıda kullanıcı desteği sağlarken, aynı zamanda mevcut diğer erişim servisleriyle de rekabet olanağı tanır.

WMN'lerde taşınabilecek yük miktarını arttırmak için yapılan birçok çalışma vardır (Raniwala ve Chiueh, 2005 - Draves ve diğ., 2004). Bu çalışmalar, frekans domaininde çakışan iletimleri ayırmak için çoklu kanalları kullanan çoklu radyolar ile yük miktarını arttırmayı hedeflemektedirler. Fakat bu çalışmalardaki yönlendiriciler, her yönde iletim yapan (omnidirectional) antenlerle çalışıldığı düşünerek tasarlanmıştır. Böyle iletimlerde, bir kanal üzerindeki iletim kapsama alanı içindeki tüm diğer düğümlerin sessiz kalmasına ya da alternatif kanalları kullanmasına ihtiyaç duyar.

Bu nedenle, çoklu kanallar frekans domainindeki iletimleri ayırabilseler bile, bu ayrışmanın içeriği mevcut kanalların sayısına bağlıdır. Kullanılabilir kanalların sayısı, spektrum kuralları nedeniyle sınırlıdır. Örneğin 802.11a'da üst üste binemeyen 12 kanal varken, 802.11b sadece 3 üst üste binmeyen kanala sahiptir. Dahası bazı ülkelerdeki spektrum kuralları daha katı olduğundan ya da başka iletişimlere desteklemeleri için ayrıldığından kullanıma uygun kanal sayısı daha da düşüktür. Üst üste binmeyen kanalların arasında bile önemli miktarda parazit bulunduğundan çakışan iletimlerin arasındaki frekans ayrımının içeriği de sınırlanır. Bu kısıtlamalar nedeniyle, WMN'lerin yük miktarlarını arttırabilmek için çakışan iletişimlerin ayrıştırılması başka yöntemlere ihtiyaç duyar.

Her yönde iletim yapan antenlerle karşılaştırıldığında, yönlü antenler (directional antennas), çakışan iletimler arasında uzamsal ayrışma sunar ve potansiyel olarak WMN'lerin yük miktarını arttırabilir özelliktedirler. DMesh mimarisinin temelinde, çakışan iletimleri ayırmak için, hem uzamsal hem de frekans domaininde çoklu kanallar ve yönlü antenlerden yararlanan mesh yönlendiriciler için dağıtık, yönlü bir kanal tahsis algoritması yatmaktadır. Bu sayede DMesh, sıkışık iletimler arasında 2 seviyeli bir ayrıştırma yapabilir. DMesh ile aşağıdaki hedefler gerçekleştirilmiştir (Cheekiralla ve Engels., 2007):

- Yüğü önemli ölçüde arttırmak amacıyla, uzamsal ayrıştırma için yönlü antenler, frekans ayrıştırması için ise çoklu orthogonal kanalları kullanan bir mimari öne sürölmüştür.
- Gerçekçi ve detaylı bir anten modeli kullanılarak, öne sürölen mimariden tam olarak yararlanacak dağıtık bir yönlendirme algoritması ile buna bağı kanal tahsis algoritmaları tanımlanmış.

DMesh'i gerçekleyebilmek için her bir yönlendirici k tane ara yüze, yani çoklu radyolara sahip olabilir. Bunların her biri de kendi pratik yönlü antenine sahiptir. DMesh'teki pratik yönlü antenler yönlendirilemezler ve ağı kurulumu sırasında nereye yönlendirilmişlerse o noktada kalırlar. Mesh yönlendiriciler, PDA gibi diğerkablosuz araçlardaki şekil faktörü kısıtlamalarına bağı olmadıklarından, çoklu radyo ve antenlerin kullanılmasına elverişlidirler. Omni-ara yüzü “*KONTROL*” ara yüzü olarak da kullanılabilir.

DMesh'de uygun ağı senaryosunu gerçekleştirmek için, trafiğin ağı geçitlerinde köklendiğı, yüksek yüke sahip yönlendirme ağaaları geliştirilmiştir. DMesh bu ağaaları gerçeklemek için 3 temel aşama içermektedir:

- Yönlü antenleri kullanarak ağı geçidi bağlantısını sağlamak için fiziksel ağağı oluşturma.
- Ağağı boyunca paketlerin başarılı bir şekilde teslim edilmesi için yönlendirme durumunun oluşturulması ve sürekliliğinin sağlanması.
- Yüğü arttırmak için, ne zaman mümkün olursa, çakışan iletimleri uzamsal olarak ayırmak amacıyla kanal tahsisinin gerçekleştirilmesi.

Optimize edilmiş link durum yönlendirmesi (OLSR – Optimized Link State Routing) (Jacquet ve diğ., 2001), tek radyolu, tek kanallı her-yönlü mesh ağlarda çoklu yönlendirme protokolü olarak kullanılmıştır. DMesh ile ağaaların pratik, yönlü antenler kullanılarak fiziksel olarak oluşturulması, ilgili yönlendirme durumunun belirlenmesi ve bakımının yapılması ile kanal tahsisinin gerçekleştirilmesi için OLSR algoritmasını geliştirerek, DOLSR algoritması öne sürölmüştür (Das ve diğ., 2006).

5.1.1.1. Fiziksel Ağaç Oluşturma

Ağa her yeni mesh düğüm katılmak istediğinde, DOLSR arka plan programı, bir her yönde iletim yapan antene atanan ara yüzü tanımlamak için bir konfigürasyon dosyasını (olsr.config) okur ve tek kanal, tek ara yüz modunda çalışmaya başlar. Konfigürasyon dosyası, düğüm üzerinde bulunan ağ ara yüzlerin, ara yüzlere eklenmiş antenlerin tiplerinin ve her bir ara yüz için atanmış olan yönlendirilmiş IP (PIP - pointing IP adresses) adresinin bulunduğu bir listeye sahiptir. Bu modda düğüm kendi her yönde iletim yapan anteninden Host ve Ağ Birliği (Host and Network Association - HNA) mesajlarını dinlemeye başlar.

İnternet erişimi olan düğümler yani ağ geçidi düğümlerinin kendileri ya da bu düğümle doğrudan ya da dolaylı bağlantısı olan düğümler, periyodik HNA paketlerini kullanarak, kendi her yönde iletim yapan anten ara yüzleri üzerinden bu bağlantılarını ilan ederler. Ağa yeni katılacak olan düğüm, HNA mesajlarını aldığı düğümden belli bir metriğe bağlı olarak, bir sonraki sıçrama düğümü seçimini yapar. Metrik farklı türlerde olabilir (sıçrama sayısı, ETX gibi). Yeni düğüm ağa katıldıktan sonra, bir sonraki sıçramasını yeniden değerlendirmek için HNA mesajlarını aynı şekilde almaya devam eder.

Bir mevcut ağa, yönlü antenleri dahil etmek için, HNA mesajları, bu bilginin yanı sıra, bir düğümün yönlü ara yüzlerini komşuları için kullanıma açmaya niyetli olup olmadığı bilgisini de taşıyacak şekilde modifiye edilmiştir. Bir düğüm, yönlü ara yüzlerini, eğer bu ara yüzleri üzerinde kendi internet bağlantısı varsa ya da düğümün kendisi bir ağ geçidi ise kullanıma açabilir. Ayrıca düğümün yeni çocuklara bağlanabileceği kullanılabilir ara yüzleri de olmalıdır. Örneğin ağ geçidi düğümü kendi HNA paketi içerisinde yönlü ara yüzlerini kullanırmaya dair istekli olduğu bilgisini yayınlayarak, DMesh'in ön yüklemesini yapar. Ağ geçidi özelliği taşıyan düğüme bir sıçrama uzaklıktaki komşular bu HNA paketlerini alırlar.

DOLSR, her yönde iletim yapan antenin ara yüzünde isteğin belirtildiği HNA paketlerini aldığı anda, uygun bir metrik kullanarak, en iyi potansiyele sahip, yönlü bir sonraki sıçrama düğümünü (PARENT) hesaplar. Örneğin her yönde iletim yapan antenin ara yüzü kullanılarak yapılan yük ölçümleri, PARENT seçimini yapmak için kullanılabilir. PARENT seçimi daha sonra rapor edilir; PARENT ve CHILD (katılımcı) düğümdeki yönlü antenler birbirlerine bakacak şekilde kurulur ve PARENT ve CHILD

düğümdeki olsr.conf dosyasındaki ilgili girişler, yeni, yönlü ara yüzü içeren bilgiyle güncellenir. Spesifik olarak, PARENT düğümü ara yüzü “*DIR*” olarak işaretlenir ve işaret ettiği CHILD düğümünün ara yüzünün IP’sini kaydeder, aynı şekilde CHILD düğümde de bu işlemler tekrarlanır. Bu IP adresi PIP adresini temsil etmektedir ve sadece bu PIP adresinden gelen paketlerin DOLSR protokolüne gönderilmesi için filtreleme amaçlı kullanılır. Yönlü antenler başlangıçta, bağlantırlığı sağlamaları için ön tanımlı bir kanalda çalışacak şekilde yapılandırılır.

Kurulum tamamlandıktan ve güncellenmiş yapılandırma dosyası DOLSR arka plan programı tarafından okunduktan sonra, PARENT düğümü READY paketlerini yeni kurulan yönlü ara yüzden gönderir. READY mesajları CHILD düğümde, yönlendirme durumunu hazırlamak amacıyla yönlendirme protokolü için bir tetikleyici görevi görür. Yönlendirme durumu hazırlandığında CHILD düğümü yönlü ara yüzlerini ağa yeni katılacak olan ya da mevcut komşu düğümler için kullandırma isteğini belirtir ve böylece daha çok düğüm ağaca katılabilir. Bu şekilde düğümler kendi ara yüzlerinde en az bir tanesi PARENT düğümü işaret edecek şekilde bir yönlü anten kurarlar ve ağaç fiziksel olarak ağ geçidi düğümüne yönelecek şekilde oluşturulur.

5.1.1.2. Yönlendirme Protokolü

Yönlü antenlerin DMesh’de fiziksel yerleşimleri doğal olarak bir ağaç yapısı oluşturur. Bu fiziksel ağacın tepesinde, ağaç boyunca paketleri yönlendirmek için DOLSR iletim girişleri kurulur. Yönlendirme durumu şu şekilde yapılandırılır: T_a herhangi bir PARENT düğüm olsun. T_a periyodik olarak READY mesajlarını yeni kurulan yönlü ara yüzden gönderir. PIP’deki filtre sayesinde sadece ilgili CHILD düğümü bu mesajı alabilecektir. T_a ’dan READY mesajını alınca, CHILD T_a ’ya bir JOIN mesajı göndererek yönlendirme işlemine dahil olmak istediğini belirtir. T_a , JOIN paketinden aldığı IP adresini kullanarak, katılımcı düğüme doğru bir iletim girdisi oluşturur. Katılımcı düğüm READY mesajından aldığı PARENT’ın IP’sini geçerli yol bilgisi olarak kullanır ve yönlendirme tablosuna bu bilgiyi girer. Bu değişim tamamlandığında, katılımcı düğüm ağacın bir parçası olur ve kendi HNA paketlerini göndererek başka düğümler için potansiyel PARENT haline gelir.

Ağ geçidine direk bağlı düğümler, PARENT düğüm olarak “*SUPERPARENT*” şeklinde adlandırılırlar.

JOIN paketi alındığında, T_a tarafından oluşturulan bir ROUTE-SETUP mesajı, ağ boyunca her bir düğümün rekürsif olarak mesajı aktif ara yüzlerine göndermesi sayesinde ağ üzerinde bu bilginin dağıtılmasını sağlarlar. Çoklu gönderme işlemi, ağ geçidine ulaşıncaya kadar devam eder, çünkü ağ geçidi bu mesajı diğer SUPERPARENT'lara tekrar göndermez. ROUTE-SETUP paketi, katılımcı düğümün, JOIN paketinde kullandığı ara yüzün IP adresini içerir. Bu bilgi yeni katılan düğüme erişmek için, ağ geçidi de dahil olmak üzere, alt ağaındaki tüm düğümlerin yönlendirme tablolarındaki iletim girişlerini oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu bilgi ayrıca, mesh yönlendiriciler arasındaki peer-to-peer yönlendirmeyi de mümkün kılar. Bir mesh yönlendirici, kendi SUPERPARENT'ında köklenmiş, kendi alt ağaındaki tüm mesh yönlendiricilere giden bir yol bulabilir ve başka bir SUPERPARENT'ın çocukları olan mesh yönlendiricilere de ağ geçidi üzerinden ulaşabilir. Bir düğümün herhangi bir paket için bir sonraki sıçramayı tanımlayabilmek amacıyla sadece iletim tablosunu dikkate alması yeterlidir. Herhangi bir iletim girişiyle eşleşmeyen bir paket, ağ geçidine doğru varsayılan yol üzerinden gönderilir.

- **Ebeveynleri (Parent) Değiştirme:** Bazı durumlarda, metrikler sayesinde daha iyi bir hedef bulunursa ya da ağa yeni bir ağ geçidi eklenirse, bir düğüm ebeveynini değiştirme ihtiyacı hissedebilir. Örneğin yeni bir ağ geçidi kurulumu yapılıyorsa, bunların her biri kendi HNA'sını göndermeye başlar. Eğer farklı bir ağ geçidinden alınan bir metrik, düğümün mevcut kullandığından daha düşük bir değere sahipse düğüm bunun daha iyi bir çözüm olduğunu düşünecek ve bağlı olduğu PARENT'ı değiştirmek isteyecektir.

Bir düğüm ebeveynini değiştirdiğinde, eski yönlendirme girişlerini geçersiz kılmak için ROUTE-SETUP mesajına benzer bir LEAVE mesajını yayınlar. Bir düğüm ebeveynini değiştirdiğinde bu düğümde köklenen alt ağa da yeni ebeveyne geçecektir. Yeni ebeveyn, bir ROUTE-SETUP mesajını yayınlayarak kendi SUPERPARENT'ındaki tüm düğümlerin yönlendirme girişlerini günceller. Böylelikle, yönlendirme durumu fiziksel değişimler karşısında güncellenmiş olur.

- **Arıza Yönetimi:** DMesh’de, sadece PIP eşleşmesiyle belirlenmiş bir düğüm bir ara yüze eklenebileceğinden, eş zamanlı katılım ya da salınımlar nadir görülür. Eğer bir düğüm kendi ara yüzlerinden bir mesajı almazsa dayanıklı bir bağlanabilirliğin desteği olarak, yönde iletim yapan antenin ara yüzü kullanır.

Sonuç olarak, DOLSR, fiziksel DMesh ağaçlarının oluşturulması, fiziksel topoloji değişimleri nedeniyle yönlendirme durumunun belirlenmesi ve bakımı ile ilgilenir.

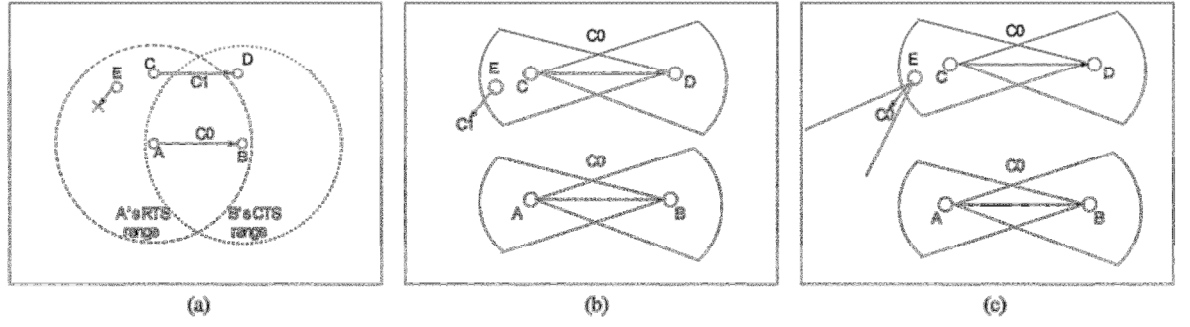
5.1.1.3. Dağıtık, Yönlü Kanal Ataması

Yönlendirme durumu bir kez kurulduktan sonra, daha fazla paralel iletim gerçekleşeceğinden ayrıştırmanın ilk aşaması başarıyla yerine getirilmiş olur. Fakat pratik, yönlü antenler, yan ve arka kulakların varlığı nedeniyle tam olarak uzamsal yalıtma sağlayamazlar. Bu nedenle DMesh, mesh ağın yükünü arttırmak için ayrıca yönlü kanal atamasını da kullanır, böylece uzamsal olarak çakışan iletimleri ayırarak ikinci derecede ayrışmayı da sağlamış olur.

Yönlü kanal ataması, ağa bir CHILD düğüm katıldığında, onun PARENT’ı tarafından gerçekleştirilir. Daha önce de değinildiği gibi, her iki ara yüz de bağlanırlığı mümkün kılmak için aynı ön tanımlı kanala ayarlanır. PARENT, bir kanal atama şemasını kullanarak, yeni bir kanal seçer ve CHILD’a bir ASSIGN mesajı gönderir. Hem PARENT hem de CHILD daha sonra seçilen kanaldaki ilgili ara yüzlerini kurarlar. Bunun arkasından iki yönlü iletişim meydana gelir. Kanal ataması her 300 sn.de bir yeniden değerlendirilir.

5.1.1.4. Kanal Atama Şemaları

Tasarımda ulaşılmak istenen ana hedef, kolay kurulum ve uygulaması olan, iyi performans sağlayan, dağıtık, yönlü bir kanal atama algoritmasıdır.



Şekil 5.1: DMesh’de kullanılan kanal atama şemaları (a) OCA ile her-yönlü (b) C-DCA ile yönlü. (c) A-DCA ile yönlü.

Şekil 5.1.’de 5 yönlendirici (A-E) ve 2 akış (A->B ve C->D) görülmektedir. Bu mimari üzerinde kullanılan kanal atama şemaları şu şekilde sınıflandırılabilir:

- **Her Yönde İletim Yapan Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması Olmadan (Omni/No Channel Assignment- ONOCA):** Bu şemada, her yönde iletim yapan antenler, çoklu kanal teknikleri olmadan kullanılırlar. Eğer, A B’ye her-yönlü olarak iletim yaparsa, kanal tüm bölgede RTS (ready-to-send) ve CTS (clear-to-send) nedeniyle rezerve edilecektir. Bu nedenle sadece 1 akış gerçekleşebilir. Bu ağda, uzamsal olarak ya da frekans domaininde bir ayırıştırma mümkün değildir.
- **Her Yönde İletim Yapan Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması İle (Omni/Channel Assignment - OCA):** Bu şemada, her yönde iletim yapan antenler, çoklu kanal teknikleriyle kullanılır. Önce her düğüm, kendi PARENT’ı ile iletişim kurmak için, başka bir iletişim tarafından kullanılmayan, eşsiz bir kanalı tahsis etmeye çalışır. Eğer düğüm kullanılmayan bir kanalı almayı başaramazsa, kendi parazit bölgesindeki düğümler tarafından seçilen, en az yüklü kanalı tekrar kullanır. Bu algoritma, dağıtık bir bağlamda, kanal kullanım bilgisinin ve en az yüklü kanal seçiminin periyodik değişimiyle gerçekleşir. En az yüklü kanal, en az sayıda çıkış tarafından kullanılan kanal demektir. Eğer bir kanal çifti aynı sayıda akış tarafından kullanılıyorsa, son bilgi değişimi periyodu üzerinden iletilen trafik en az yüklü kanalı belirlemek için kullanılır. Bu nedenle OCA, aynı çakışma domaininde çekişen iletişimlere izin vermek için çoklu kanalların sunduğu frekans ayırımından faydalanır. Eğer bu Şekil 5.1.(a)’ya

uygulanırsa ağda, $A \rightarrow B$ ve $C \rightarrow D$ akışlarını taşıyacak C_0 ve C_1 adlı iki farklı kanal olduğu düşünülebilir. Fakat E hala iletim yapamaz, çünkü E diğer iki akışın çakışma alanı içinde bulunmaktadır. E, kanal kullanım bilgisi değişimleri sayesinde bu durumu fark eder ve kendi çevresindeki en az yüklü kanalı iletimini gerçekleştirmek için tahsis etmeye çalışır.

- **Yönlü Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması Olmadan (Directional/No Channel Assignment -DNOCA):** Burada yönlü antenler, çoklu kanal teknikleri olmadan kullanılır. Buna göre $A \rightarrow B$ ve $C \rightarrow D$ akışları, parazit konileri (iletim yapan düğümlerin daire dilimleri tarafından belirlenen alan) uzamsal olarak ayrıştıgında gerçekleşir. Fakat E, tek uygun kanal olan C_0 'ı kullanan $C \rightarrow D$ akışının parazit konisinde olduğundan iletim yapamaz.
- **Yönlü Antenleri Kullanarak / Kanal Ataması İle (Directional/Channel Assignment - DCA):** Yönlü antenler çoklu kanal teknikleriyle kullanılır ve çekişen trafik frekans domaininde yönlü olarak ayrıştırılır. İki iletim, iletimi oluşturan düğümlerden biri diğerinin parazit konisinde yer alıyorsa “*yönlü olarak çekişmeli*” şeklinde tanımlanır. 3 çeşit DCA şeması vardır:
 - **Korunumlu DCA (Conservative DCA/C-DCA):** Verilen bir C kanal kümesinde, bir X düğümü bir CHILD'a kanalı iki aşamada atar:
 - Önce serbest bir C_i kanalı bulmaya çalışır. X düğümü için serbest bir kanal, X ya da X'in CHILD'ının parazit konisi içinde yer alan bir düğüm tarafından, kullanılmayan kanal olarak tanımlanır.
 - Eğer böyle bir kanal yoksa X en az yüklü C_i kanalını seçer.

Şekil 5.1. (b)'de, E düğümü iletim için, iletimi yönlü olarak çekişen iletimlerden izole eden C_1 kanalını seçecektir. C-DCA korumalıdır, çünkü başka bir iletimin parazit konisindeki bir iletime daima yeni bir kanal atar. C-DCA, kanalların seçimi için lokal bir alandaki kanal kullanım bilgisi değişimine ihtiyaç duyar. Örneğin E, C-DCA algoritmasını çalıştırırken, D'nin parazit konisinde olduğunu anlayabilmek için geometrik hesaplamalar yapmaya ve C ile D'den kanal kullanım bilgisini almaya ihtiyaç duyar. Parazit konisini hesaplamak için C ve D'nin konumları bilinmelidir.

Mobilitenin olmadığı bir mesh ağda, mesh yönlendiriciyi yerleştirirken ya da kurarken, yönlendiricinin konumunu kodlamak yeterli olur, yönlendirici içerisinde daima yer alacak bir GPS donanımına ihtiyaç duyulmaz.

C-DCA, antenin potansiyel olarak herhangi bir yönden parazit alacağını varsayarak, alıcı düğümün antenindeki yan kulaklardaki paraziti etkili bir şekilde hesaba katar. Yani C-DCA, eğer bir düğüm komşu düğümlerin iletim konisi içinde yer alıyorsa, düğümün kendi konumu ne olursa olsun parazit olasılığının var olduğunu düşünür.

E, eğer akışı C ya da D'ye yönlendirmemişse, C_0 'ı kullanabilir. Fakat bu E'yi, C_0 'daki yan kulaklardan alınan güç nedeniyle parazite açık hale getirir. C-DCA, bu tarz bir parazitten kaçınmak için C_0 'ın seçilmesine izin vermez.

Ayrıca, C-DCA, bir komşu antenin yan kulaklarının iletim enerjisinin neden olacağı parazitte de ilgilidir. C-DCA, geometrik hesaplamalar için, flat-topped iletim konisinin daha kolay ve her antene uygulanabilir olduğunu düşündüğünden, bir komşu düğümün sadece ana kulağından gelen iletimin neden olduğu paraziti göz önüne alır. Komşu düğümün yan kulaklarının enerjisini dikkate alabilmek için kanal atamasında şu şekilde genişletmelere gidilmiştir: Her düğüm, tüm yönlü ara yüzlerindeki iletimlere ve bir ara yüzdeki IP'si, bu ara yüzde kullanılan kanaldaki paraziti işaret eden ara yüz için, PIP'den farklı olan herhangi bir düğümden alınan veriyi izler.

- **Girişken/Saldırcı DCA (Aggressive DCA/ A-DCA):** A-DCA, kanal atamasını, C-DCA gibi yapar ama aralarında önemli bir fark vardır: X'in başka bir Y düğümünün parazit konisinde bulunduğu ancak hem X'in hem de Y'nin birbirlerinin parazit konilerinde olması ile kabul edilir. Bu nedenle Şekil 5.1(c)'de görüldüğü gibi, E, D'nin parazit konisinde olmasına rağmen, D, E'nin parazit konisinde olmadığından; E A-DCA ile C_0 kanalını yeniden kullanabilir.

A-DCA, yönlülüğe bağlı olarak kanalın yeniden kullanılabilmesi fırsatların belirlenmesinde daha girişkendir ve bu nedenle de kanal kullanımı azalır. Bu daha fazla parazite neden olabilir. Diğer iletimlerden gelen paraziti düzenlemek için, A-DCA,

kanalın *saldırganlığını* düzenlemek adına “*gözcü açısı*” denen bir yapıyı şu şekilde kullanır: Geometrik hesaplamalar süresince tüm iletim ve alım konilerinin ışın demeti genişliği, gözcü açısı derecesi ile arttırılır. Bu nedenle daha yüksek gözcü açısı A-DCA’yı kanalın yeniden kullanımında daha korumacı yaparken, düşük gözcü açısı daha saldırgan hale getirir. İletime yakın olan düğümler parazit konisi daha geniş olacağı için, frekansta ayrılmaları olası bir durumdur. A-DCA ölçüm tabanlı iyileştirmeleri saldırganlığını kısıtlayacağından kullanmaz.

- **Ölçüm Tabanlı DCA (Measurement Based DCA/ M-DCA):** İki düğüm arasındaki paraziti göstermek için geometri yerine sadece ölçümleri kullanır. M-DCA, her düğümün yönlü ara yüzlerindeki iletimlerin dinlendiği C-DCA’daki ölçüm tabanlı geliştirme ile benzer şekilde çalışır ve bu bilgiyi parazitleyici düğümleri bulmak için kullanır.

Tablo 5.1’de çoklu radyo mesh ağlarda kullanılan kanal atama mimari seçimi gösterilmektedir.

Tablo 5.1: Çoklu radyolu mesh ağlarda antene göre kanal atama mimarisi seçimi.

Antenna	Channel Assignment
Omni	ONOCA, OCA
Directional	DNOCA, C-DCA, A-DCA, M-DCA

5.1.1.5. OCA/C-DCA/A-DCA/M-DCA için Kullanılan Dağıtık Kanal Atama Algoritması

Bir düğümün lokal bilgiyi kullanarak dağıtık bağlamda bir kanalı seçmek için çevresindeki kanal kullanım bilgisine ihtiyacı vardır. Bu bilgi, kanal yeterli bir uzaklıkta yeniden kullanılabileceğinden lokal olarak değiş tokuş edilir. Bu nedenle her düğüm kendi kanal kullanım bilgisini yaymak için, periyodik olarak bir omni KONTROL ara yüzünü kullanır. Yayılım sırasında çift gönderimleri engellemek için sıra numaraları kullanılır. DMesh’de bir düğümün yönlü antenler kullanılarak ulaşılabilirliği, yönlü ara yüzlerdeki iletim enerjisinin ayarlanması ile her yönde iletim yapan antenlerin kullanılması sırasındaki erişilebilirlikle aynıdır. Ayrıca yönlendirilemeyen antenleri kullanan yönlü ara yüzler, kanal kullanım bilgisine ihtiyaç duyan tüm olası düğümleri kapsayamayacaklarından bu bilgiyi yaymazlar.

OCA/C-DCA/A-DCA'da her düğüm, her bir C_i kanalını kullanıp kullanmadığını belirleyen bir C kanal vektörü ve son 60 sn. boyunca her C_i kanalı üzerinden iletilen trafik miktarının bir zaman ortalamasını belirleyen bir R oran vektörü yayınlar. A-DCA ve C-DCA için, düğümler, mesh yönlendiriciler statik olduğundan konum bilgilerini değiştirirler ve bunu gelecek kullanımlar için saklarlar. Her C_i kanalı ile iletişim yapılacak hedefi gösteren bir D hedef vektörü, yönlendirme bilgisi için eklenir. Her düğümde tutulan sonuç kanal haritası, komşu düğümlerden alınan özgün durum vektörlerinden ($\langle C, R, D \rangle$) oluşturulur. Ayrıca her CHILD, CHILD'ın komşuluklarında kullanılan tüm kanalları içeren kendi kanal haritasında hesaplanmış kanalların listesini kendi PARENT'ına yollar.

Bir düğüm, parazitleyici komşularından kanal kullanım bilgisini topladığında, kanalları yeni bir CHILD'a atamak ya da periyodik olarak kanal atamalarını kendi mevcut çocukları için yeniden hesaplamak için kanal atama algoritmalarını kullanır.

Sonuç olarak, her düğüm ilgili kanal seviye vektörlerini içeren düğüm kimliklerinin olduğu bir listeyi saklayan bir kanal kullanım haritası alırlar. A-DCA ve C-DCA için, ayrıca bir hedef vektörü alınır. M-DCA için düğümler arasında bilgi değiş tokuşuna gerek yoktur. Her düğüm atanan çocuktan başka bir düğümden bir veri alınmasına karşılık tüm yönlü ara yüzlerini izler. Çocuğu olmayan bir düğümden alınan bir veri, bu ara yüz tarafından kullanılan kanaldaki paraziti gösterir. Bu parazitleyici düğüm, kanal kullanım haritasına eklenir.

5.1.2. İyileştirilmiş DMesh Kanal Atama Algoritması (Improved DMesh - iDMesh)

DMesh mimarisinde yapılan ölçümler sonrası performans açısından en iyi çalışan kanal atama algoritmasının C-DCA olduğu tespit edilmiştir. Bu algoritmada kanal atama işlemi aşağıdaki adımlar takip edilerek yapılmaktadır:

- **Directional / Channel Assignment (DCA):** 2 akışın yönlü olarak birbirini parazitlediğini söyleyebilmek için iletimi oluşturan düğümlerden birinin diğerinin parazit konisinde olması gerekir.

○ **Korunumlu Yönlü Kanal Ataması (Conservative DCA / C-DCA):**

Verilen bir kanal kümesi içinden bir X düğümü, kendi CHILD'ına kanal atamasını 2 aşamada yapar:

- I. Boş bir C_i kanalı bulmaya çalışır. X düğümü açısından boş kanal demek, X'i ya da X'in CHILD'ını parazit konisi içine alan düğümler tarafından kullanılmayan kanaldır.
- II. Eğer böyle bir kanal yoksa X en az veri yüküne sahip kanalı seçer.

Algoritma incelendiğinde, kanal atama işlemi sırasında, ağın henüz dolu olmadığı yani yoğunluğunun az olduğu aşamada boş kanalların dağıtıldığı, yoğunluk arttıkça boş kanal bulmak zorlaşacağından bu kanallar arasından en az yoğunluklu olanın seçildiği görülmektedir. Bu yaklaşım, sistemin maksimum doluluk yaşadığı anlarda kanalların tümünün dolu olması ihtimalini göz ardı etmekte, dolayısıyla hem çakışma hem de parazit seviyesinde ciddi artışlara neden olmaktadır.

5.1.2.1. Kavramlar ve Mesaj Tipleri

Örnek mimari üzerinde ve tasarlanan kanal atama mekanizmalarında kullanmakta olduğumuz kavramlar ve iDMesh'de kullanılan mesaj tipleri bu bölümde belirtilmektedir.

Tablo 5.2 kullanılan mesajları ve kavramları kısaca özetlemektedir.

Tablo 5.2: iDMesh’de kullanılan kavramlar ve mesajlar.

PARENT	Ağ geçidi özelliği taşıyan ya da direk ya da dolaylı olarak bir ağ geçidine bağlı olan düğümler
CHILD	Ağa yeni katılacak olan ve bunun için bir Parent seçme hazırlığındaki düğüm
HNA	(Host Network and Association) Parent özelliği taşıyan bir düğümün iletim alanı içindeki diğer düğümlere, konumunu ve yönlü ara yüzlerini internet bağlantısı için kullandırmaya istekli olup olmadığı bilgisini içeren mesaj.
READY	Bir Parent düğümün, Child ile bağlantıyı sağladıktan sonra, yönlendirme işlemi için hazır olduğunu belirtmek amacıyla kullandığı mesaj.
JOIN	Bir Child düğümün Ready mesajını aldıktan sonra, Parent düğüme yönlendirme aşamasına katılmaya hazır olduğunu bildirmek amacıyla kullandığı mesaj.
ROUTE_SETUP	Parent ve Child düğümler arasında yönlendirme durumu kurulduktan sonra, ağa katılan Child düğümün konumunu ve bağlı olduğu Parent bilgisini yaymak amacıyla Parent düğüm tarafından tüm ağa yayılan bilgilendirme mesajı.
LEAVE	Bir düğümün bağlı bulunduğu Parent düğümü dışında başka bir düğümden aldığı HNA mesajları sonucu, bu düğümün daha iyi bir Parent seçeneği olduğunu tespit etmesi halinde, kendisinin ve alt ağacındaki tüm düğümlerin yeni Parent’a geçtiğini bildirmek için tüm ağa yaydığı bilgilendirme mesajı.
CRM	(Child Response Message) Bir Child düğümün Parent düğüm ile iletişim kurmak için kullandığı genel mesaj tipi
PRM	(Parent Response Message) Bir Parent düğümün Child düğümü ile iletişim kurmak için kullandığı genel mesaj tipi.
PIP	(Pointing IP) Bir Parent’ın kendisine bağlanan Child düğümün IP’sini kendi kayıtlarında tutmak için kullandığı adres.
.conf	Yönlendirme algoritmasının kontrol amaçlı kullandığı konfigürasyon dosyası

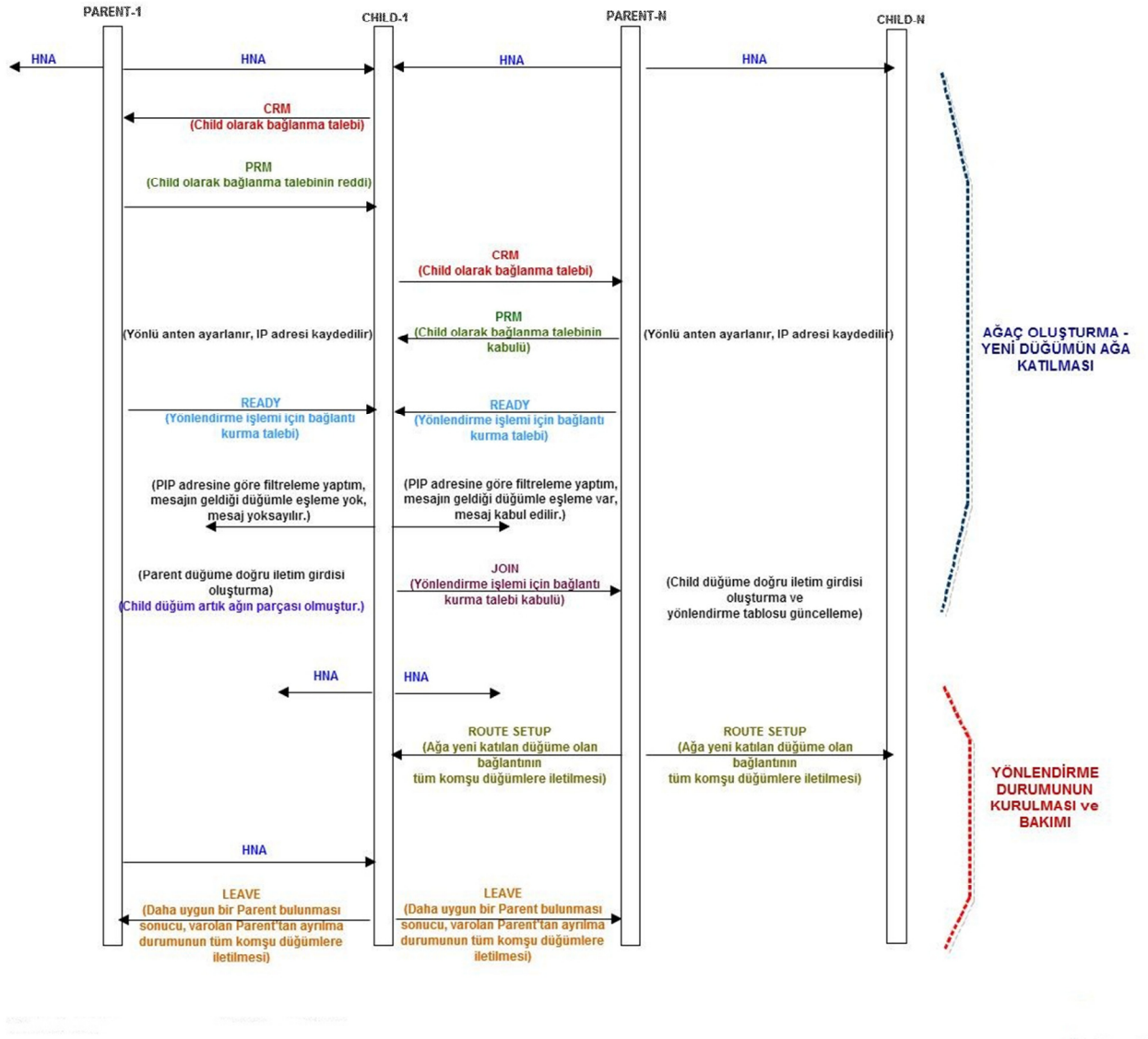
Tablo 5.3, iDMesh prosedüründe kullanılan mesajları, içeriklerini ve görevlerini ayrıntılı şekilde göstermektedir.

Tablo 5.3: iDMesh’de kullanılan mesajlar ve içerikleri.

Mesaj Adı	İçerik	Açıklama
HNA	nodeIP intList netmask chList location avCh	Bir PARENT düğüm, her yönlü arayüzü üzerinden her 60 sn.de bir periyodik olarak iletim alanı içindeki diğer düğümlere, konumunu ve yönlü ara yüzlerini internet bağlantısı için kullandırmaya istekli olup olmadığı bilgisini içeren HNA mesajını gönderir.
READY	intIP msg	Bir Parent düğüm, periyodik olarak READY mesajlarını ağa yeni katılan Child ile iletişim kurmak için ayarladığı yönlü ara yüzden gönderir. PIP’deki filtre sayesinde sadece ilgili Child düğümü bu mesajı alabilecektir.
JOIN	intIP msg	Child düğüm, READY mesajını alınca, Parent düğüme yönlendirme prosedürüne katılmak istediğine dair bir katılım mesajı gönderir. Katılımcı düğüm READY mesajından aldığı PARENT’ın IP’sini geçerli yol olarak kullanır ve yönlendirme tablosuna bu bilgiyi girer. Bu değişim tamamlandığında, katılımcı düğüm ağacın bir parçası olur ve kendi HNA paketlerini göndererek başka düğümler için potansiyel PARENT haline gelir.
ROUTE_SETUP	childIP parentIP childLoc interNodeIP	JOIN paketini alan Parent düğüm tarafından oluşturulan bir ROUTE_SETUP mesajı, ağaç boyunca her bir düğümün rekürsif olarak mesajı aktif ara yüzleri üzerinden göndermesi sayesinde ağ geçidine ulaşıncaya kadar devam eder. Böylece ağ geçidi de dahil olmak üzere, alt ağağtaki tüm düğümlerin yönlendirme tablolarındaki iletim girişlerini güncellemeleri sağlanır.
CRM	nodeIP intIP msg location	Bir Child düğümün Parent düğüm ile iletişim kurmak için kullandığı genel mesaj tipidir. Hangi ara yüz üzerinden gönderildiği bilgisi ve mesaj içerir.
PRM	nodeIP intIP msg location	Bir Parent düğümün Child düğüm ile iletişim kurmak için kullandığı genel mesaj tipidir. Hangi ara yüz üzerinden gönderildiği bilgisi ve mesaj içerir.
.conf	intIP antType PIP freq/ch	Her düğüm üzerinde “Hangi arayüz, hangi tipten antene bağlı, hangi frekans üzerinden, hangi düğümlerle (PIP), hangi kanaldan konuşuyor.” bilgisini barındıran, yönlendirme algoritması tarafından okunan konfigürasyon dosyasıdır.

5.1.2.1. Fiziksel Yönlendirme Ağacının Oluşturulması

Her iki algoritma için aynı yönlendirme ağacı oluşturma prosedürü izlenmiştir. Şekil 5.2’de ağa yeni bir düğüm katılması ve yönlendirme ağacının oluşturulması sırasındaki mesaj akış şeması görülmektedir.



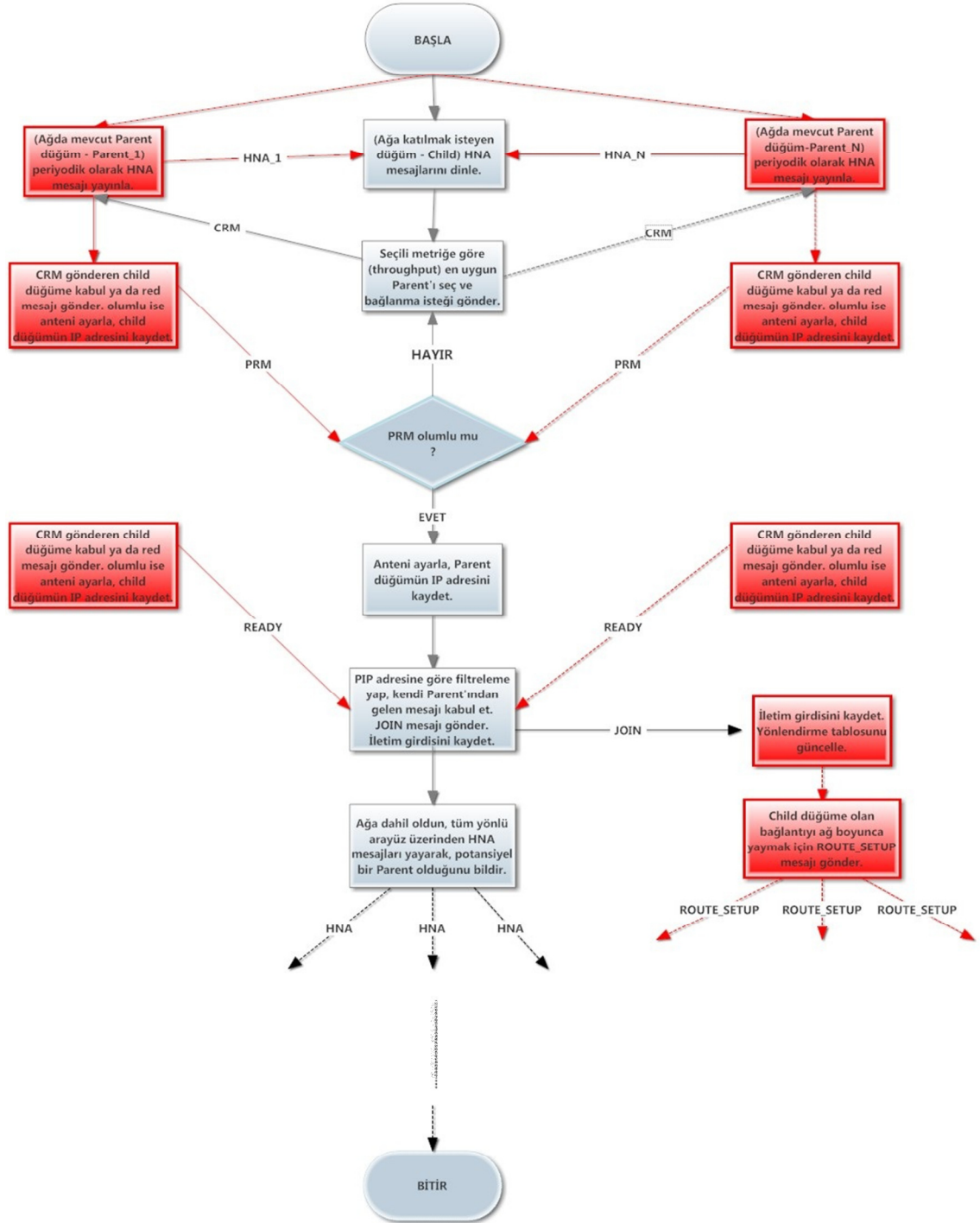
Şekil 5.2: Fiziksel yönlendirme ağacı mesaj akış şeması.

Buna göre yönlendirme ağacı oluşturma adımları şunlardır:

- 1: Yeni bir düğüm ağa katılmak istediğinde, tek kanal – tek arayüz modunda yönde iletim yapan anteninden, internet bağlantısı olan ya da gateway düğüm özelliği taşıyan 1 sıçramalık komşu düğümlerden gelecek olan HNA (Host and Network Association) mesajlarını dinlemeye başlar. Bu mesajlar arasından uygun bir ölçeğe göre belirlediği en iyi PARENT'ı seçer.
- 2: Uygun PARENT seçildikten sonra bu seçim bildirilir. PARENT ve CHILD düğümdeki yönlü antenler birbirini işaret edecek şekilde ayarlanır ve konfigürasyon dosyasındaki ilgili girişler güncellenir.

- 3: Bu işlemlerden sonra PARENT düğüm periyodik olarak READY mesajını CHILD'a bağlanırken kullandığı yönlü arayüzü üzerinden yayınlamaya başlar. READY paketini alan CHILD, bu paketteki PARENT'ın arayüz IP'sini kullanarak karşılığında JOIN paketini gönderir. PARENT ve CHILD düğümler, READY ve JOIN paketlerinde arayüz IP'lerini birbirlerine bildirdikten sonra bu adreslerle kendi yönlendirme tablolarını düzenlerler. Artık CHILD ağın bir parçası haline gelmiş demektir ve potansiyel bir PARENT olarak kendi HNA mesajlarını yaymaya başlayabilir.
- 4: JOIN paketi bir kez alındığında PARENT tarafından bir ROUTE_SETUP mesajı oluşturulur ve bu mesaj ağ boyunca her bir düğümün aktif arayüzleri üzerinden rekürsif bir şekilde ağ geçidine varıncaya kadar yayılır. ROUTE_SETUP paketi, ağa yeni katılan düğümün JOIN paketinde belirttiği arayüzün IP'sini içerir. Bu bilgi, gateway düğüm de dahil olmak üzere ağ üzerindeki diğer düğümlerce ağa yeni katılan düğüme nasıl erişileceğinin belirlenmesi için iletim tablolarının kurulması için kullanılır.
- 5: Belirli koşullarda PARENT değiştirilmek istenebilir. O zaman ROUTE_SETUP mesajına benzer yapıda bir LEAVE mesajı ile eski girdilerin geçersiz hale gelmesi sağlanır.

Şekil 5.3'de yönlendirme ağacının kurulması sırasındaki işlem adımları bir iş-akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 5.3: Fiziksel yönlendirme ağacı mesaj iş-akış şeması.

5.2. KANAL ATAMA ALGORİTMALARI

5.2.1. DMesh İçin İzlenen Kanal Atama Algoritması

DMesh algoritması için yapılan çalışmalar sonucunda en etkili kanal atama algoritmasının C-DCA olduğu gözlenmiştir. C-DCA algoritmasının işleyişi şu şekildedir:

- Verilen bir kanal kümesi içinden bir X düğümü, kendi CHILD'ına kanal atamasını 2 aşamada yapar:
 - Boş bir C_i kanalı bulmaya çalışır. X düğümü açısından boş kanal demek, X'i ya da X'in CHILD'ını parazit konisi içine alan düğümler tarafından kullanılmayan kanaldır.
 - Eğer böyle bir kanal yoksa X en az yüklü kanalı seçer.

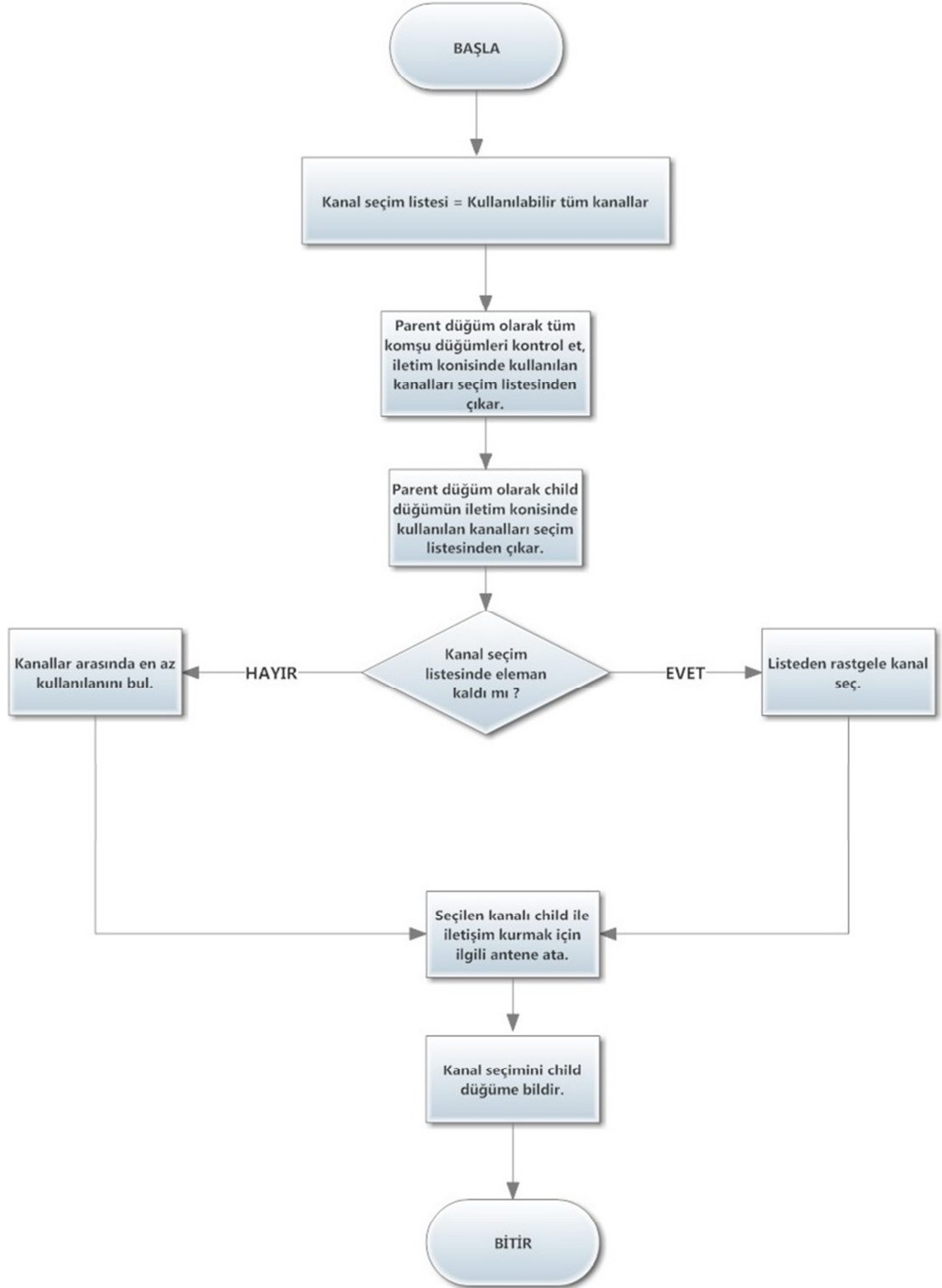
Bir düğümün lokal bilgiyi kullanarak dağıtık bağlamda bir kanalı seçmek için çevresindeki kanal kullanım bilgisine ihtiyacı vardır. Bu bilgi, kanal yeterli bir uzaklıkta yeniden kullanılabileceğinden lokal olarak değiş tokuş edilir. Bu nedenle her düğüm kendi kanal kullanım bilgisini yaymak için, periyodik olarak her yöne iletim yapan bir KONTROL ara yüzünü kullanır. Yayılım sırasında çift gönderimleri engellemek için sıra numaraları kullanılır. DMesh'de bir düğümün yönlü antenler kullanılarak ulaşılabilirliği, yönlü ara yüzlerdeki iletim enerjisinin ayarlanması ile her-yönlü antenlerin kullanılması sırasındaki erişilebilirlikle aynıdır. Ayrıca yönlendirilemeyen antenleri kullanan yönlü ara yüzler, kanal kullanım bilgisine ihtiyaç duyan tüm olası düğümleri kapsayamayacaklarından bu bilgiyi yaymazlar.

C-DCA'da her düğüm, her bir C_i kanalını kullanıp kullanmadığını belirleyen bir C kanal vektörü ve son 60 sn. boyunca her C_i kanalı üzerinden iletilen trafik miktarının bir zaman ortalamasını belirleyen bir R oran vektörü yayınlar. C-DCA için, düğümler, mesh yönlendiriciler statik olduğundan konum bilgilerini değiştirirler ve bunu gelecek kullanımlar için saklarlar. Her C_i kanalı ile iletişim yapılacak hedefi gösteren bir D hedef vektörü, yönlendirme bilgisi için eklenir. Her düğümde tutulan sonuç kanal haritası, komşu düğümlerden alınan özgün durum vektörlerinden ($\langle C, R, D \rangle$) oluşturulur. Ayrıca her CHILD, CHILD'ın komşuluklarında kullanılan tüm kanalları içeren kendi kanal haritasında hesaplanmış kanalların listesini kendi PARENT'ına yollar.

Bir düğüm, parazitleyici komşularından kanal kullanım bilgisini topladığında, kanalları yeni bir CHILD'a atamak ya da periyodik olarak kanal atamalarını kendi mevcut çocukları için yeniden hesaplamak için kanal atama algoritmalarını kullanır.

Sonuç olarak, her düğüm ilgili kanal seviye vektörlerini içeren düğüm kimliklerinin olduğu bir listeyi saklayan bir kanal kullanım haritası alırlar. C-DCA için, ayrıca bir hedef vektörü alınır.

Şekil 5.4.:’de DMesh yapısı için C-DCA kanal atama prosedürünün iş akış şeması görülmektedir.



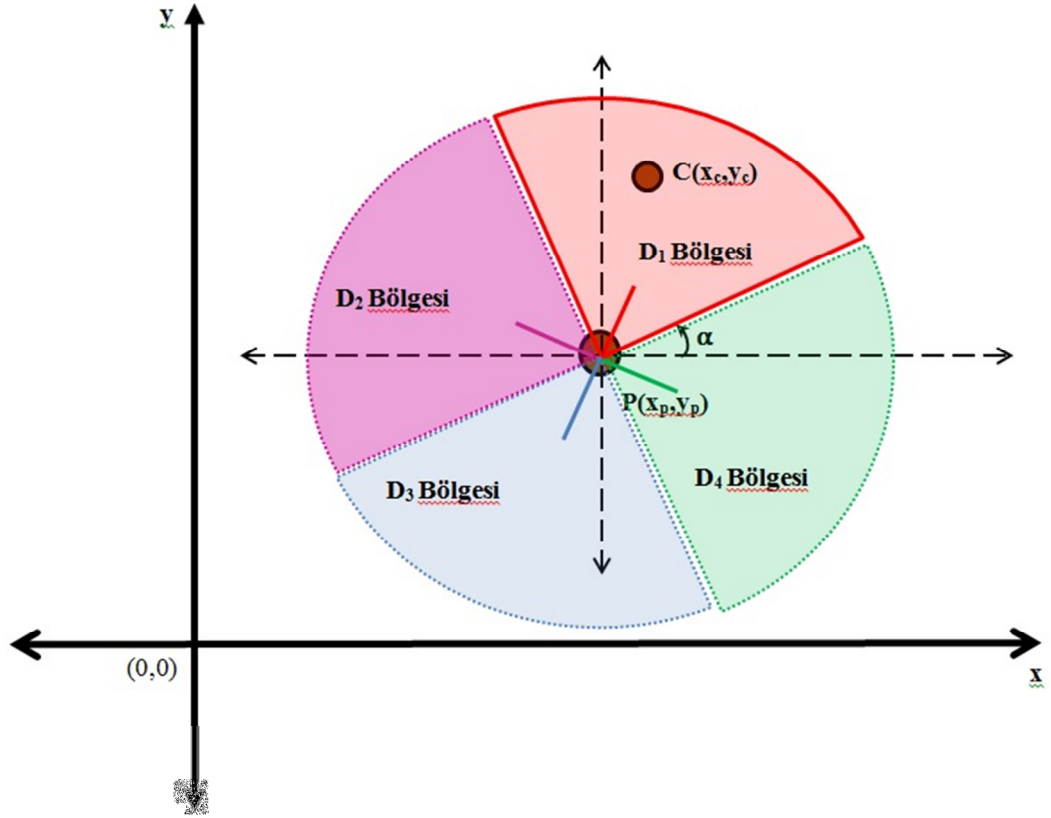
Şekil 5.4: DMesh C-DCA Kanal Atama Prosedürü İş-Akış Şeması.

5.2.2. iDMesh İçin İzlenen Kanal Atama Algoritması

Kanal atama işleminin daha az parazite neden olacak şekilde iyileştirilmesi için ortaya atılan yeni kanal atama şeması İyileştirilmiş DMesh'in (iDMesh) çalışma yapısı şu şekildedir:

- 1: Ağa katılacak olan düğüm, bağlanacağı Parent düğümü seçerken öncelikle o düğümün hangi anten bölgesinde bulunduğunu tespit eder.
- 2: Kanal atama işlemi için Parent düğümün hali hazırda diğer komşularıyla bağlantı kurmak için kullandığı kanalların listesi olası kanal seçim listesinden çıkarılır.
- 3: Hem Child hem de Parent düğümün sezdikleri kullanımdaki kanal listesi de seçim listesinden çıkarılır.
- 4: Düğümlerin koordinat bilgilerinden yararlanılarak Parent ve Child düğümlerin konuşacağı anten bölgesinde iletişim halinde olan başka düğümler varsa, onların kullandıkları kanallar da seçim listesinden çıkarılır.
- 5: Bu işlemler sırasında, her işlem sonunda kanal seçim listesindeki toplam kullanılabilir kanal sayısı kontrol edilerek sadece bir adet kanal olması durumunda bir sonraki işlem adımı uygulanmaz, var olan kanala atama yapılır.

İşlem adımları sırasında tespit edilmesi gereken en önemli bilgilerden biri de Child düğümün Parent düğümle hangi anten üzerinden iletişim kuracağıdır. Bunun için düğümlerin konum bilgilerinden yararlanarak, bir Child düğümün Parent düğümün hangi anten alanı içinde yer aldığı bilgisine ulaşılmıştır. Şekil 5.5'de 4 adet yönlü antene sahip bir düğüm, her bir antenin tarama bölgeleri ve sapma açısı gösterilmektedir. Bu hesaplama sırasında kullanılan yöntem aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 5.5: Sistemdeki 4 adet yönlü antene sahip bir düğüm, sapma açısı ve tarama bölgesi.

C düzlemde herhangi bir düğüm olsun. Bu düğümün sahip olduğu antenlerden birinin düzlemden sapma açısına α diyelim. Simülasyon sırasında sistemdeki tüm düğümler için bu α açısı rastgele (0 ile 90 derece arasında) belirlenecektir.

Her bir düğümün yayın yapması durumunda sinyalin ne kadarlık bir mesafede etkili olacağının belirlenmesi gerekmektedir.

Bunun yanında ağa katılacak her bir düğüm için Parent düğüm tarafından, yeni gelen düğümün hangi anten alanı içine dahil olduğu, dolayısıyla hangi anten üzerinden iletişim kurulacağı hesabı da yapılmalıdır. Bu hesabı α sapma açısı kullanılarak şu şekilde yapabiliriz (Bölgeler saat yönünün tersi temel alınarak hesaplanmıştır.):

D₁ bölgesinde kalan düğümlerin hesaplanması:

$$y_p < y_c \text{ ve } \alpha < \arctan\left(\frac{y_c - y_p}{x_c - x_p}\right) < \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (5.1)$$

koşullarını sağlayan her (x_c, y_c) koordinatlı düğüm, P düğümünün D₁ bölgesinde kalan anten üzerinden iletişime geçebilir.

D₂ bölgesinde kalan düğümlerin hesaplanması:

$$x_c < x_p \text{ ve } \alpha + \frac{\pi}{2} < \arctan\left(\frac{y_c - y_p}{x_c - x_p}\right) < \alpha + \pi \quad (5.2)$$

koşullarını sağlayan her (x_c, y_c) koordinatlı düğüm, P düğümünün D₂ bölgesinde kalan anten üzerinden iletişime geçebilir.

D₃ bölgesinde kalan düğümlerin hesaplanması:

$$x_p < x_c \text{ ve } \alpha + \frac{\pi}{2} < \arctan\left(\frac{y_c - y_p}{x_c - x_p}\right) < \alpha + \pi \quad (5.3)$$

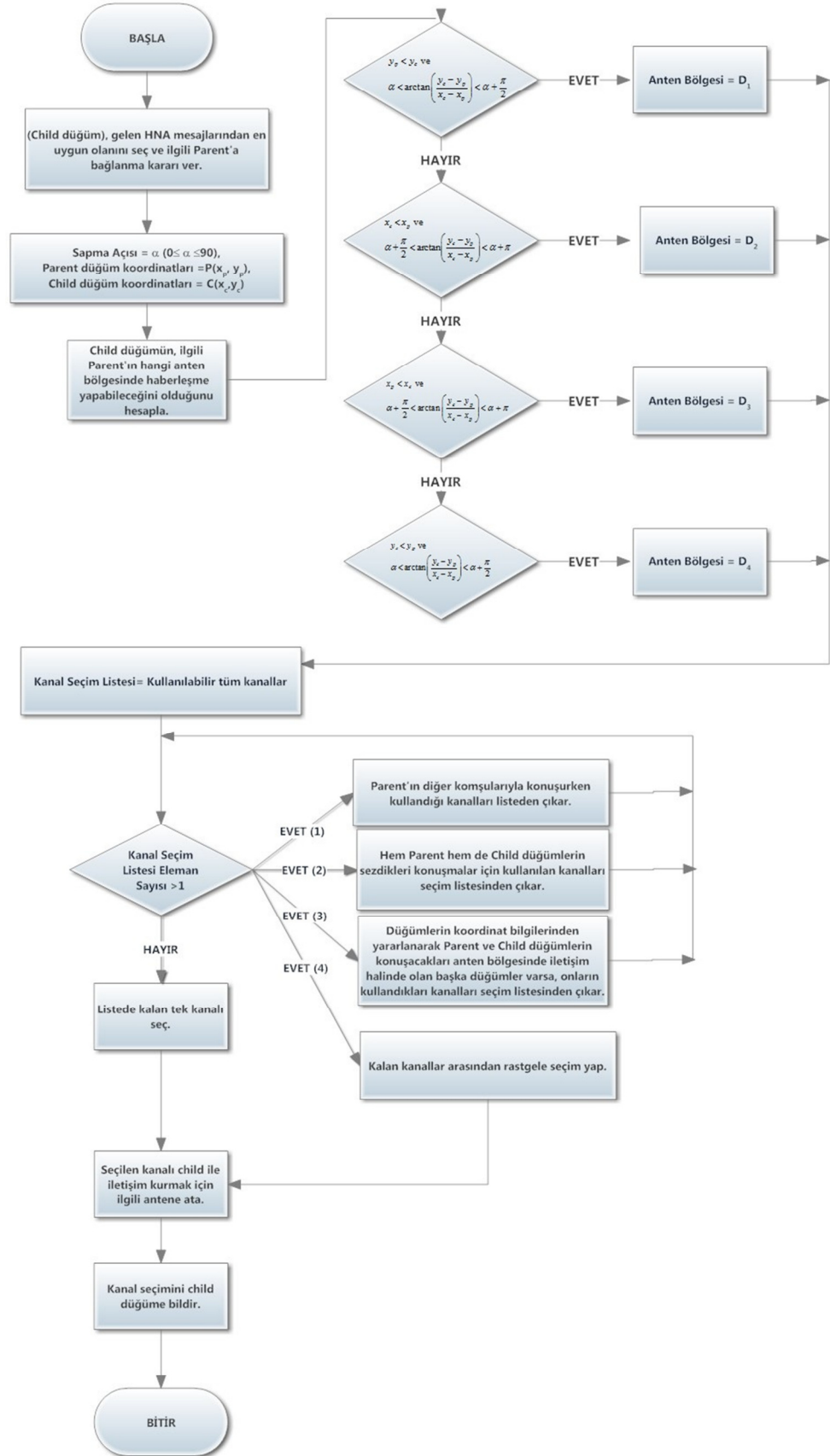
koşullarını sağlayan her (x_c, y_c) koordinatlı düğüm, P düğümünün D₃ bölgesinde kalan anten üzerinden iletişime geçebilir.

D₄ bölgesinde kalan düğümlerin hesaplanması:

$$y_c < y_p \text{ ve } \alpha < \arctan\left(\frac{y_c - y_p}{x_c - x_p}\right) < \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (5.4)$$

koşullarını sağlayan her (x_c, y_c) koordinatlı düğüm, P düğümünün D₄ bölgesinde kalan anten üzerinden iletişime geçebilir.

Şekil 5.6’da iDMesh için izlenen kanal atama prosedürünün işlem adımları bir iş-akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 5.6: iDMesh Kanal Atama Prosedürü İş Akış Şeması.

5.3. SİMÜLASYON ORTAMI

DMesh ve iDMesh yapılarının kanal atama şemalarının algoritmik olarak test edilmesi için simülasyon geliştirilmiştir.

Bu simülasyonda kanal atama işlemi sırasında düğümlerin fiziksel konumlarından yararlanılarak anten bölgesi tespiti yapılması için geliştirilen matematiksel modeli simüle etmek, DMesh ve iDMesh için değişen parametrelere göre performans karşılaştırması yapmak amacıyla MATLAB (MATrix LABoratory) simülasyon aracı kullanılmıştır. MATLAB (Matlab, 2011), temel olarak nümerik hesaplama, grafiksel veri gösterimi ve programlamayı içeren bir yazılımdır. Kapsamlı ve hızlı nümerik hesaplama yöntemleri ile hızlıca sonuç alınması mümkün olmaktadır. iDMesh’de ortaya konulan kanal atama algoritmasının test edilmesindeki amacımız birbirini parazitleyen iletişim ile ilgili nümerik değerler elde etmek olduğu için bu algoritmanın test edilmesinde MATLAB ortamı kullanılmıştır.

5.3.1. Ağ Mimarisi ve Parametreler

DMesh ile iDMesh’in karşılaştırılması için kullanılacak olan simülasyonda seçilen ağ mimarisinin özellikleri şunlardır:

- Ağ üzerindeki toplam ağ geçidi sayısı 1 ile 20 arasında değişebilir.
- Kullanılabilir kanal sayısı 3 ile 12 arasında değişebilir.
- Ağ üzerinde iletişim kuracak olan ağ geçidi haricindeki düğüm sayısı 20 ile 100 arasında değişebilir.
- Her düğüm üzerinde sapma açıları 90° olan 4 adet yönlü anten olduğu, her antenin üzerinde bir NIC (network interface card – ağ ara yüz kartı) bulunduğu ve her bir antenin bir kanalı kullanarak başka bir düğümle iletişim kurduğu kabul edilmiştir.

Algoritmalara parametre olarak verilecek bilgiler şunlardır:

- Sistemdeki tüm düğümlerin lokasyonu
- Ağa yeni katılacak olan düğümün lokasyonu ve ebeveyn olarak seçtiği düğüm bilgisi
- Her düğümün rastgele seçilmiş sapma açısı

Sistemdeki düğümler normalde bir ağaç şeklinde birbirlerine bağlı olacaklarından model kurulurken düğüm ve frekansları tamamen rastgele dağıtmaktansa belli bir ağaç yapısına uygun şekilde hesaplama yapılarak işlemler gerçekleştirilmelidir.

Bu bilgiler ışığında her iki algoritma için aynı ağ koşullarında ölçümler yapılmıştır. Kullanıcıdan ağ geçidi sayısı, toplam düğüm sayısı ve kullanılabilir kanal sayısı bilgileri alındıktan sonra her bir düğüm için rastgele koordinatlar ve sapma açıları seçilmektedir. Ağın fiziksel olarak oluşturulmasından sonra ağ geçidinden başlanarak seçilen algoritmaya göre (DMesh ya da iDMesh) yönlendirme ağaçları oluşturulmakta ve kanal ataması yapılmaktadır.

6. BULGULAR

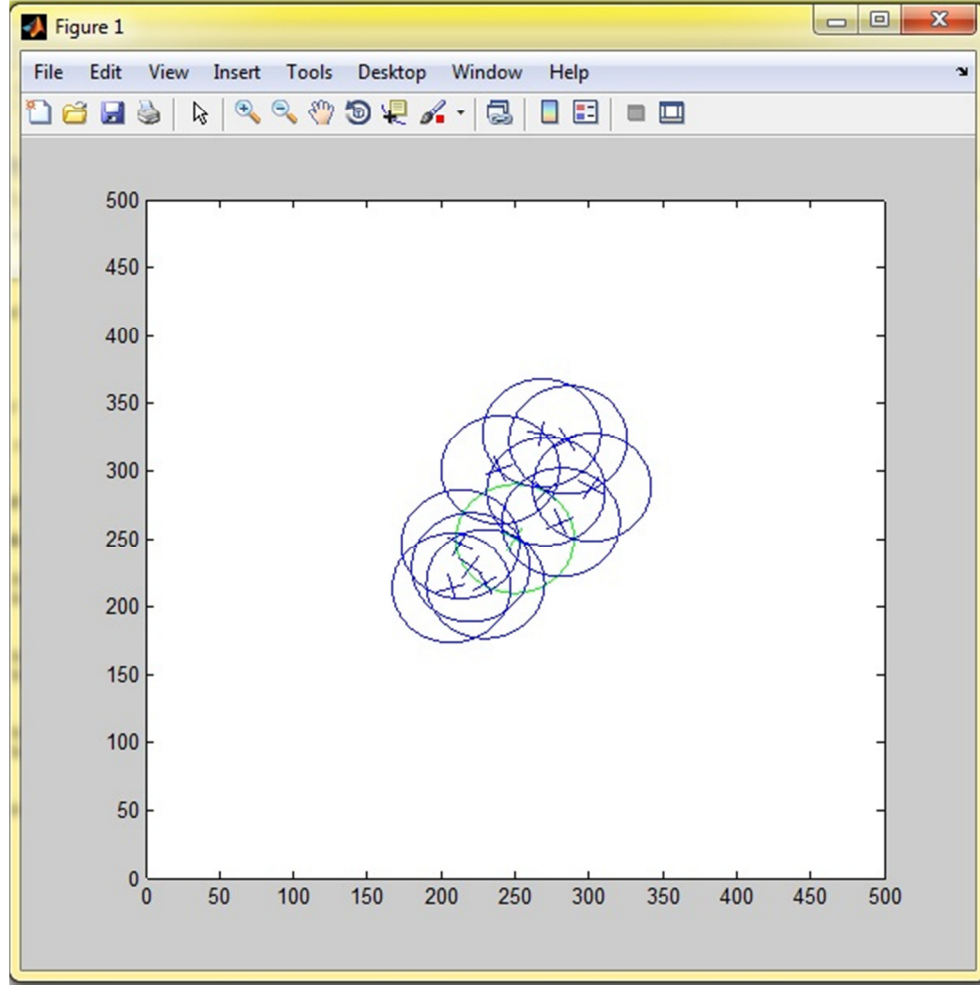
6.1. PERFORMANS SONUÇLARI

6.1.1. Ağ Topolojileri ve Senaryolar

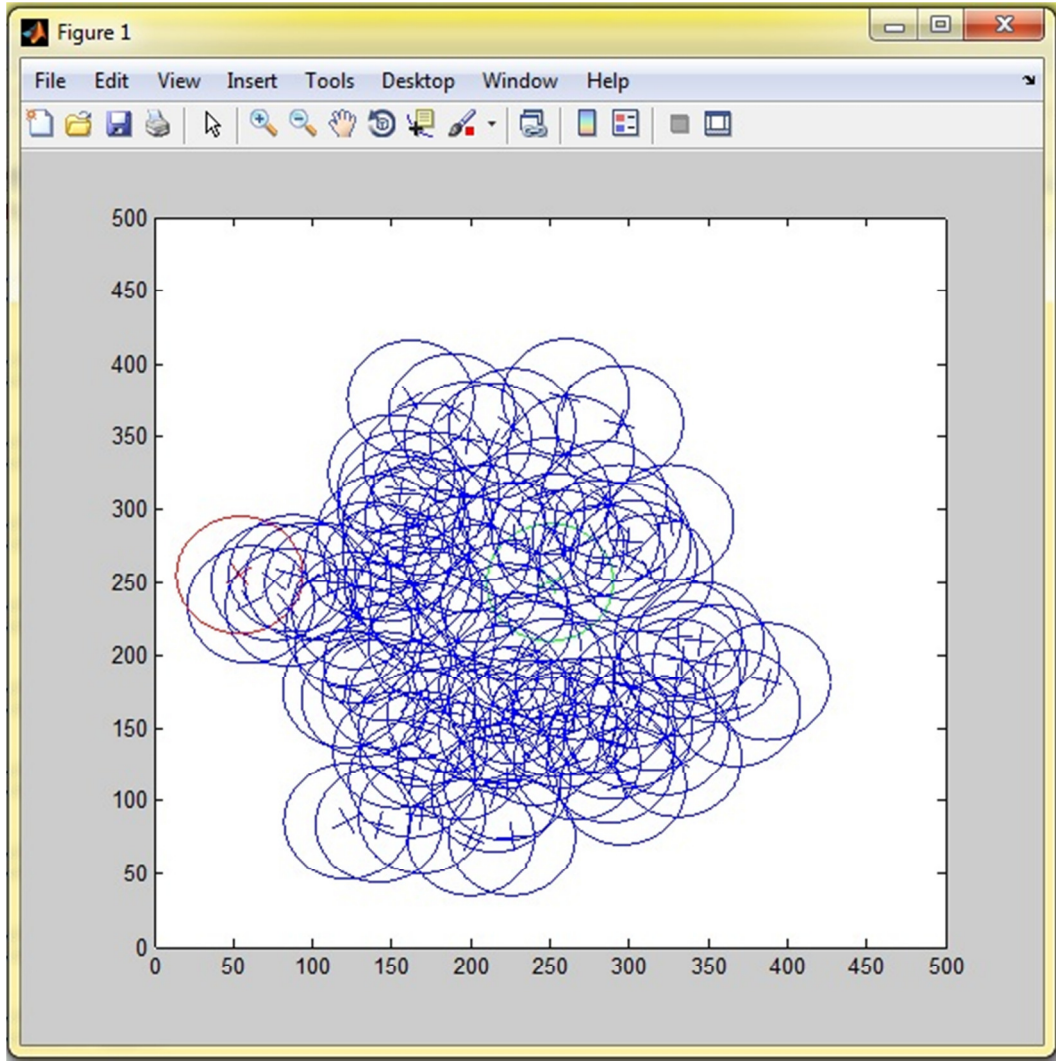
Simülasyon sonuçları iki farklı senaryo üzerinde incelenmiştir. Bunlar DMesh (bölüm 5.1.1.) ve iDMesh (bölüm 5.1.2.) mimarisidir.

MATLAB simülasyon ortamında geliştirilen program ile kullanıcıdan uygulanılacak olan ağ mimarisi türü (DMesh ya da iDMesh), kullanılabilir toplam kanal sayısı (3 ile 12 arasında), toplam ağ geçidi sayısı ve ağ geçidi haricinde ağda bulunacak toplam düğüm sayısı bilgisi parametre olarak alınmaktadır.

Şekil 6.1. ve 6.2.'de sırasıyla DMesh ve iDMesh için oluşturulmuş ağ yapılarının simülasyon ara yüzü gösterilmektedir.



Şekil 6.1: DMesh için oluşturulan Ağ Senaryosu (1 ağ geçidi, 10 düğüm ve 3 kanal).



Şekil 6.2: iDMesh için oluşturulan Ağ Senaryosu (1 ağ geçidi, 100 düğüm ve 3 kanal).

Grafik ekranda oluşturulan ağda, yeşil renkli düğümler ağ geçitlerini, mavi renkli düğümler bir Parent'a bağlanabilmiş düğümleri, kırmızı renktekiler ise kanal yetersizliği gibi nedenlerle herhangi bir düğüme bağlanamamış, ağ dışı kalan düğümleri temsil etmektedir.

DMesh ve iDMesh algoritmalarının sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için, simülasyonun her bir yürütülmesinden sonra mevcut ağ topolojisi bir dosyada saklanmaktadır. İstenirse aynı ağ topolojisi ile diğer algoritmanın performans değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

Sonuç ekranında her bir düğümün hangi anteni üzerinden hangi düğümle, o düğüme ait hangi anten ile iletişim kurduğu bilgisi ve aynı komşulukta bulunan düğümlerden birbirlerinin iletişimlerini parazitleyen düğümler raporlanmaktadır. Şekil 6.3’de raporlama ekranı görülmektedir.

```

Sifirdan ag topolojisi olusturulacaksa 1, varolan bir topoloji dosyasi kullanilacaksa 2 giriniz
1
Baglama isleminde kac adet kanal kullanilacak?
3
Simulasyon turu?

1-DMesh
2-iDMesh
1
Gateway sayisi?
1
Gateway harici dugum sayisi?
20

      BAGLANTI RAPORU
2. node'un 4. anteni 1. node'un 2. antenine 1. kanal ile baglandi
3. node'un 1. anteni 1. node'un 3. antenine 2. kanal ile baglandi
4. node'un 1. anteni 2. node'un 2. antenine 3. kanal ile baglandi
5. node'un 2. anteni 1. node'un 4. antenine 3. kanal ile baglandi
6. node'un 3. anteni 5. node'un 1. antenine 1. kanal ile baglandi
7. node'un 4. anteni 6. node'un 2. antenine 2. kanal ile baglandi
8. node'un 3. anteni 2. node'un 1. antenine 2. kanal ile baglandi
9. node'un 2. anteni 6. node'un 4. antenine 1. kanal ile baglandi
10. node'un 3. anteni 9. node'un 1. antenine 3. kanal ile baglandi
11. node'un 2. anteni 7. node'un 1. antenine 3. kanal ile baglandi
12. node'un 4. anteni 1. node'un 1. antenine 2. kanal ile baglandi
13. node'un 3. anteni 10. node'un 2. antenine 1. kanal ile baglandi
14. node'un 3. anteni 12. node'un 1. antenine 1. kanal ile baglandi
15. node'un 4. anteni 8. node'un 2. antenine 3. kanal ile baglandi
16. node'un 3. anteni 14. node'un 1. antenine 2. kanal ile baglandi
17. node'un 4. anteni 4. node'un 3. antenine 2. kanal ile baglandi
18. node'un 3. anteni 6. node'un 1. antenine 3. kanal ile baglandi
19. node'un 1. anteni 5. node'un 3. antenine 1. kanal ile baglandi
20. node'un 3. anteni 12. node'un 2. antenine 3. kanal ile baglandi
21. node'un 1. anteni 5. node'un 4. antenine 2. kanal ile baglandi

Cakismal2
Node1=> ID=12, Anten=4, Kanal=2
Node2=> ID=6, Anten=2, Kanal=2

Cakismal3
Node1=> ID=15, Anten=4, Kanal=3
Node2=> ID=4, Anten=1, Kanal=3

Cakismal4
Node1=> ID=18, Anten=2, Kanal=3
Node2=> ID=11, Anten=2, Kanal=3

Cakismal5
Node1=> ID=19, Anten=1, Kanal=1
Node2=> ID=6, Anten=3, Kanal=1

fx Olu dugum sayisi=0>> |

```

Şekil 6.3: Örnek Sonuç Raporu (1 ağ geçidi, 3 kanal ve 20 düğümlle oluşturulan bir yapı ile DMesh algoritmasının çalıştırılması sonucu elde edilen rapor).

6.1.2. Simülasyon Sonuçları

MATLAB simülasyonu kullanılarak DMesh ve iDMesh algoritmaları çeşitli faktörlere dayalı bir performans analizine tabi tutulmuşlardır.

Simülasyon, sonuçların doğruluk oranını arttırmak amacıyla verilen her bir senaryo için, aynı ağ özellikleriyle 100 kez çalıştırılmış, sonuçların ortalama değerleri alınarak grafiğe dökülmüştür.

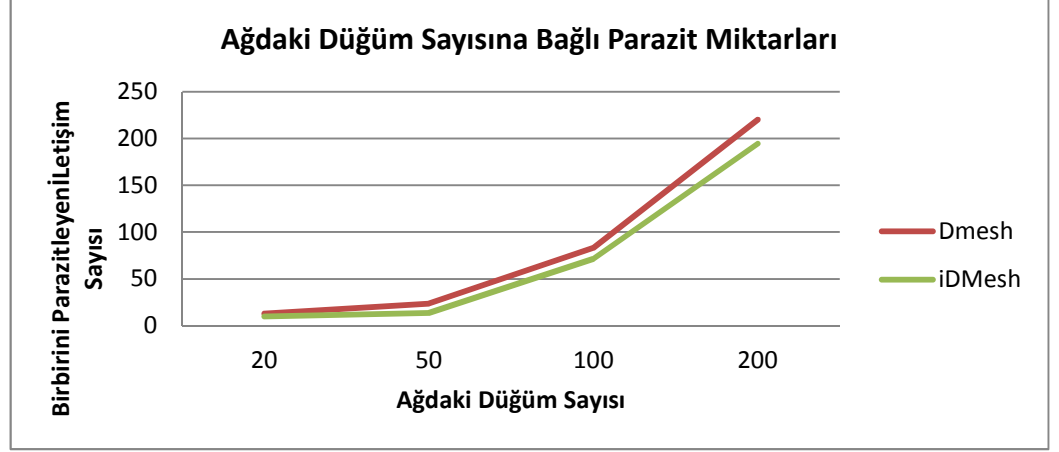
Buna göre elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

6.1.2.1. Ağdaki Düğüm Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi

Toplam 1 ağ geçidi ve 3 kullanılabilir kanala sahip bir ağ topolojisi üzerinde düğüm sayısı miktarı 20 ile 200 arasında değiştirilerek her bir algoritmanın artan düğüm sayısına göre ortaya koyduğu parazitlenme miktarları ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 6.4’de görülmektedir.

Buna göre DMesh algoritmasının yapısı itibariyle parazitlenme oldukça soruna çözüm bulmaya çalışması karşısında iDMesh algoritmasında düğümlerin birbirlerine bağlanma anlarında parazitlenme oluşturabilecek koşulların minimuma indirilmeye çalışılması sonucunda, artan düğüm yoğunluğuyla beraber iDMesh algoritmasının DMesh’e göre daha iyi sonuç verdiği, düğüm sayısı arttıkça aradaki performans farkının da açıldığı gözlenmektedir.

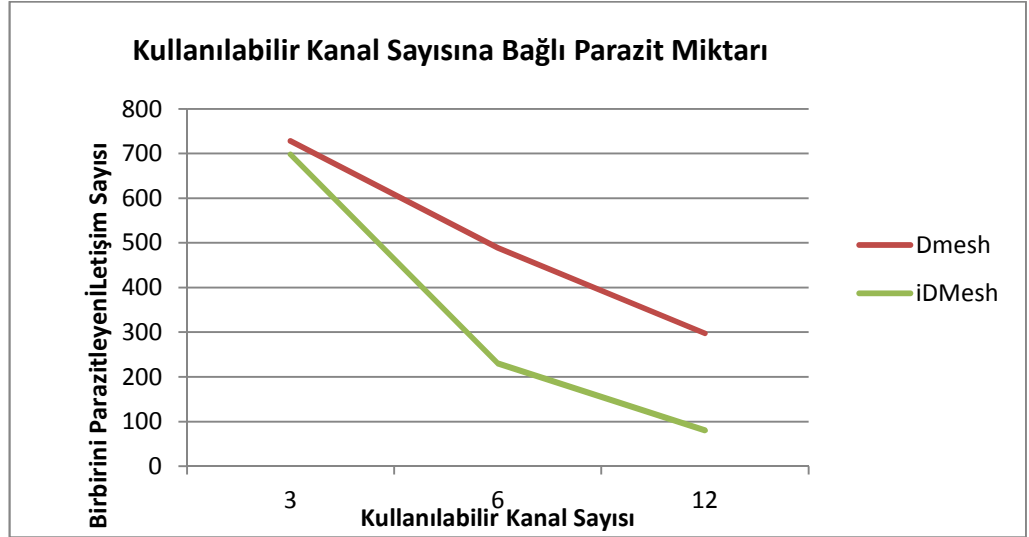
Artan düğüm sayısına bağlı olarak iDMesh’de önerilen kanal atama algoritmasının performansta %10-%15 arası bir iyileştirme yaptığı gözlenmiştir.



Şekil 6.4: Ağdaki Düğüm Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi.

6.1.2.2. Kullanılabilir Kanal Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi

Toplam 1 ağ geçidi ve 500 düğüme sahip bir ağ topolojisi üzerinde kullanılabilir kanal sayısı 3 ile 12 arasında değiştirilerek her bir algoritmanın kullanılabilir kanal sayısına göre ortaya koyduğu parazitlenme miktarları ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 6.5.'de görülmektedir.

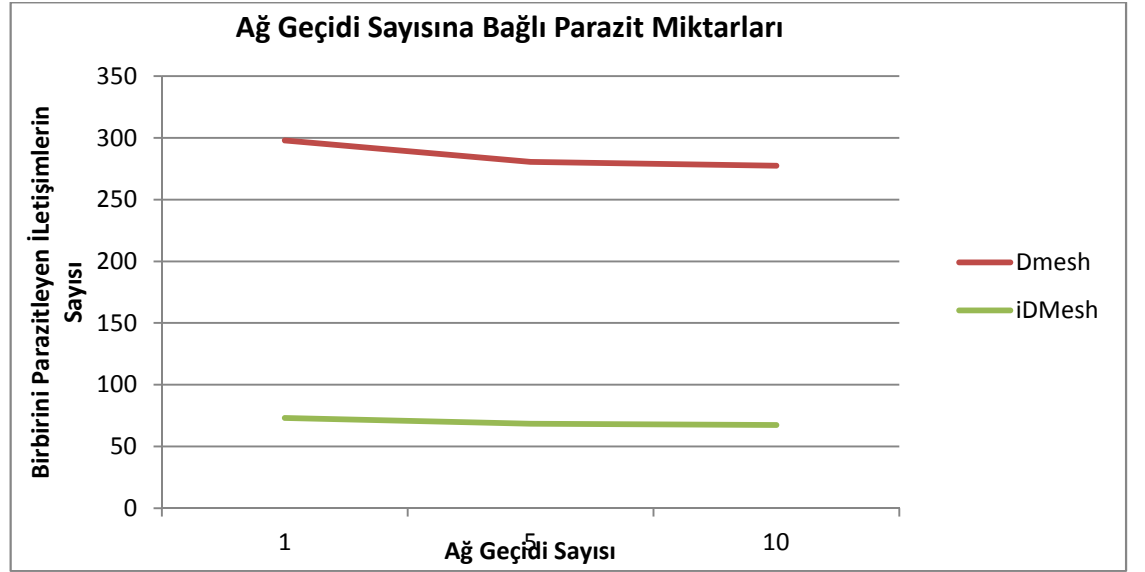


Şekil 6.5: Ağdaki Kullanılabilir Kanal Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi.

Buna göre iDMesh algoritması kullanılabilir kanal sayısı arttıkça, DMesh'e göre %75'e kadar çıkabilen bir performans üstünlüğü göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, iDMesh algoritmasında boş kanalların ağ oluşturulurken en başında rastgele dağıtılması yerine, parazit durumu kontrol edilerek atama yapılması, kullanılabilir kanal sayısının artmasıyla beraber bu oranın da düşmesidir.

6.1.2.3. Ağ Geçidi Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi

Toplam 12 kullanılabilir kanal ve 500 düğüme sahip bir ağ topolojisi üzerinde ağ geçidi sayısı 1 ile 10 arasında değiştirilerek her bir algoritmanın değişen ağ geçidi sayısına göre ortaya koyduğu parazitlenme miktarları ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6: Ağdaki Ağ Geçidi Sayısının Birbirini Parazitleyen İletişim Sayısına Etkisi.

Ağ geçidi sayısının artması her iki sistem için de birbirini parazitleyen iletişim sayısında bir azalmaya neden oldu. Bunun en önemli nedeni ağı katılan düğümlerin, ağ geçitlerine yakın olmaları durumunda internete çıkabilecekleri kök düğüm sayısının artmış olmasıdır. Dolayısıyla sayının artmasıyla beraber ağ geçitleri arasında trafik yükü dağıtılarak parazitlenme miktarı azaltılabilmektedir. Yine iDMesh'in paraziti önceden hesaplayabilen yapısından kaynaklı DMesh ile aralarında önemli ölçüde bir performans

farklılaşması yaşanmaktadır. iDMesh algoritması DMesh'e göre %80'e kadar artan bir performans iyileştirmesi göstermektedir.

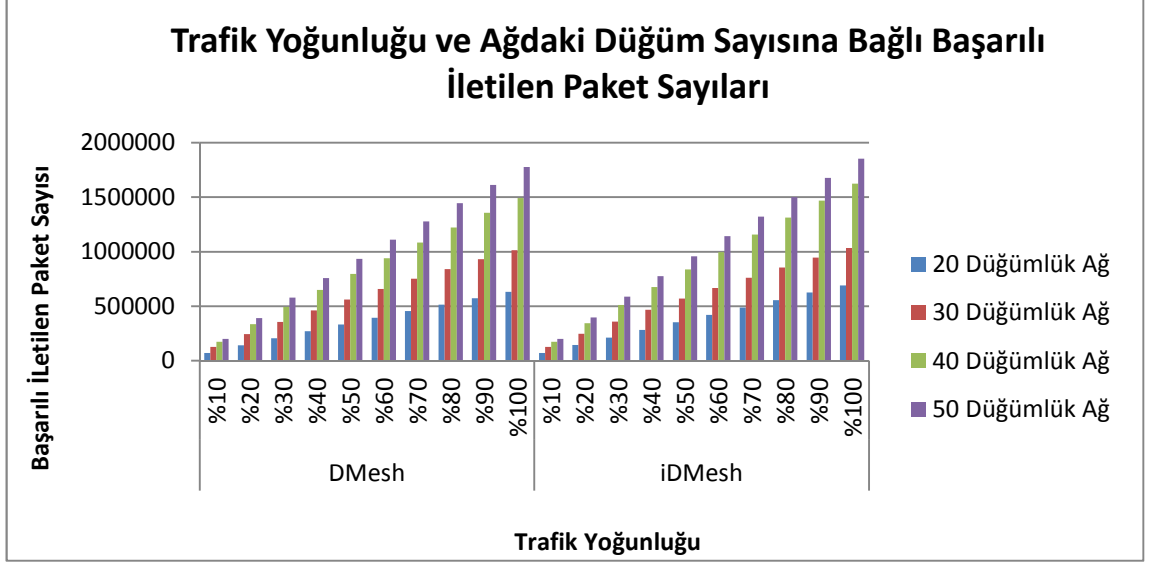
6.1.2.4. Ağdaki Düğüm Sayısının Trafik Yoğunluğuna Bağlı Olarak İletilen ve Düşen Paket Sayısına Etkisi

Trafik yoğunluğuna bağlı olarak, ağdaki düğüm sayısının başarılı bir şekilde hedefine iletilen ve parazitlenme nedeniyle oluşan paket düşmelerine etkisini ölçmek amacıyla; 1 ağ geçidi, 3 kanaldan oluşan bir mimari üzerinde düğüm sayıları 20 ile 50 arasında değişen dört farklı ağ senaryosu oluşturulmuştur. Her bir senaryo için veri trafiği yoğunluğu %10 ile %100 arasında değiştirilerek bu değişimin iletilen paket miktarları üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Sonuçlar Şekil 6.7'de görülmektedir.

Şekil üzerinde görülebileceği gibi, her bir trafik yoğunluğu aralığında, hem DMesh hem de iDMesh yapılarında düğüm sayılarının iletilen paket sayısına etkisi gözlenmekte ve karşılaştırılmaktadır.

Buna göre, %10 ve %20'lik trafik yoğunluğunda yani kanalların tam kapasiteyle kullanılmadığı, ağ üzerinde birbirini parazitleyen iletişim sayısının çok düşük olduğu durumda, her iki mimaride de tüm düğüm değerleri için yakın sonuçlar gözlenmektedir. Trafik yoğunluğunun artması ile birlikte, varolan kanalların komşu iletişimler tarafından kullanılma olasılığı artacağından ağ üzerinde birbirini parazitleyen iletişim sayıları artmaktadır. Artan düğüm sayısına paralel olarak yoğunluğun da artmasıyla, DMesh'in kullandığı kanal atama algoritması, paraziti önleme ve tolere etme açısından yetersiz kalmaya başlamaktadır. Diğer taraftan iDMesh'de kullanılan parazit haberli kanal atama şeması ise, aynı kanalların komşu iletişimlere atanmasından mümkün olduğunca kaçınmakta, böylece hedefine başarı ile iletilen paket sayıları açısından daha iyi bir performans göstermektedir.

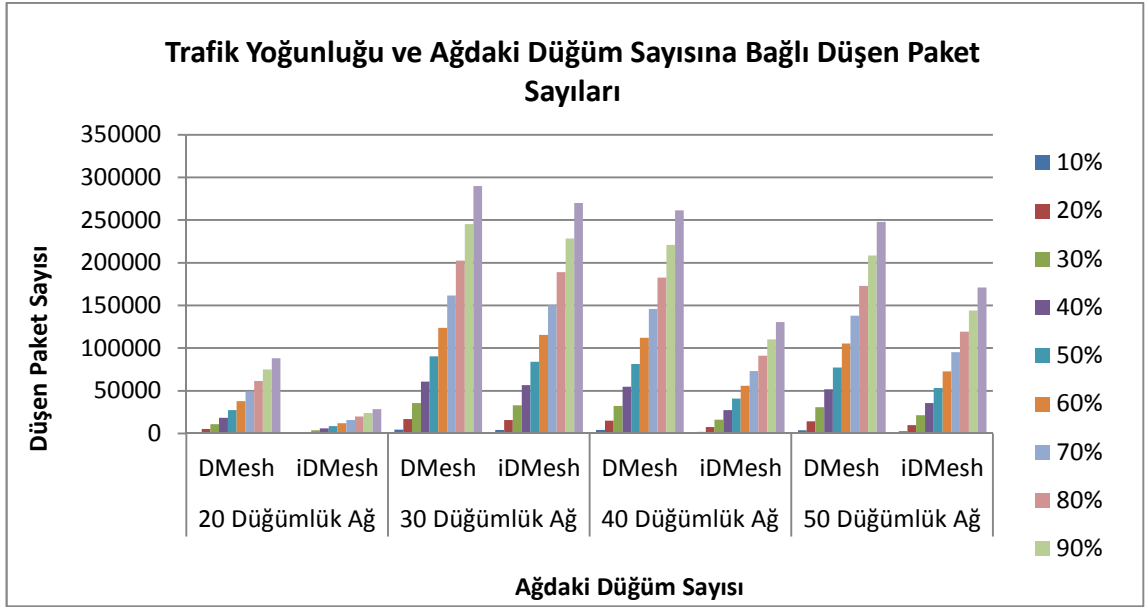
Özellikle düğüm sayısının fazla olduğu ve trafik yoğunluğunun %100 değerine ulaştığı senaryolar için iDMesh, DMesh ile karşılaştırıldığında iletilen paket sayısı bakımından %5 civarında bir iyileştirme göstermektedir.



Şekil 6.7: Trafik yoğunluğu ve ağdaki düğüm sayısının başarılı iletilen paket sayısına etkisi.

Parazit ve trafik yoğunluğu nedeniyle ağ üzerinde hedefine ulaşamadan düşen paket sayıları açısından da benzer bir sonuç gözlenmektedir. Şekil 6.8’de yapılan ölçüm sonuçları görülmektedir.

%10 trafik yoğunluğunda bile aynı sayıda düğüme sahip DMesh ile iDMesh mimarileri arasında gözle görülebilir bir performans farklılığı bulunmaktadır. Her bir düğüm değeri için DMesh ve iDMesh mimarilerinde yoğunluğun artmasıyla beraber düşen paket sayısı da artmaktadır. Düğüm sayısı arttıkça aynı trafik yoğunluğu değerine bağlı olarak düşen paket sayısının düzenli şekilde artmamasının sebebi, ağ senaryolarında her bir düğüm değeri için farklı bir ağ yapısı oluşturulması, bu nedenle ağ üzerinde düğümlerin aynı homojenlikle dağılmaması ve iletişim kurabilecek düğüm çifti sayılarının farklı olması nedeniyle farklı sayıda paket üretilmesidir. Bunun yanında uygulama sırasında düşen paket sayısının hesaplanması için sadece parazitlenme durumu göz önüne alınmış, kuyruk gecikmelerinin ve link sıkışmalarının neden olduğu paket kayıpları göz ardı edilmektedir.

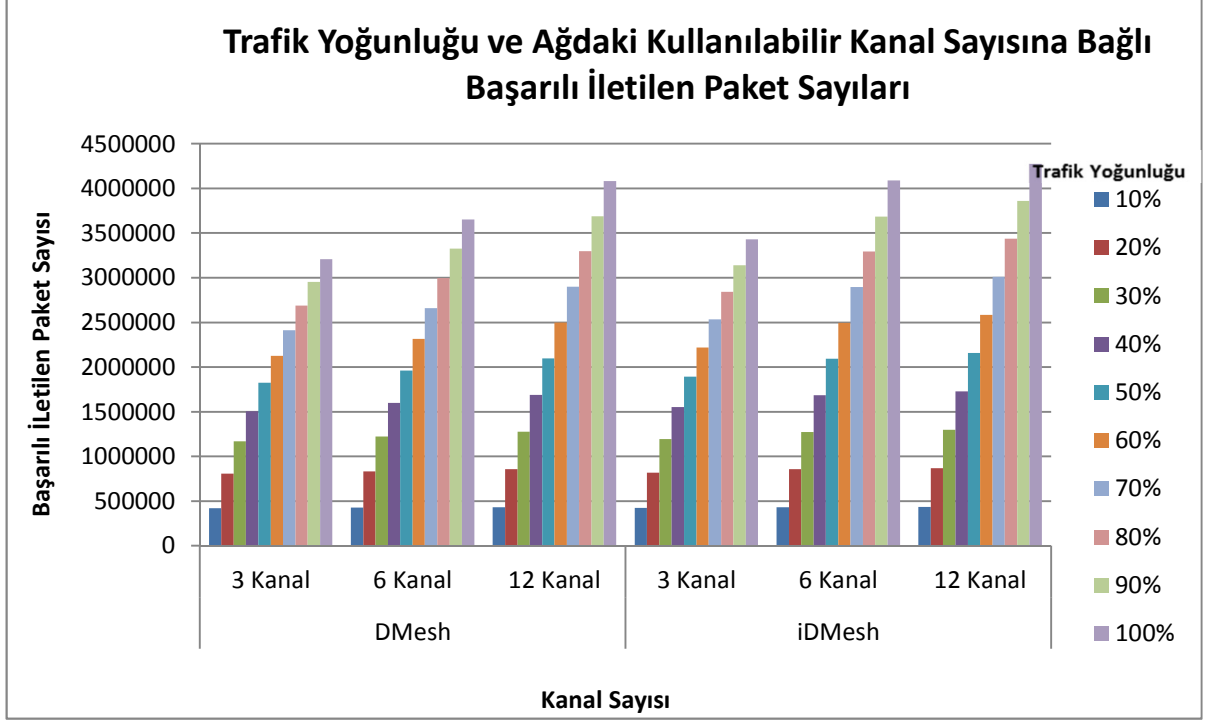


Şekil 6.8: Trafik yoğunluğu ve ağdaki düğüm sayısının düşen paket sayısına etkisi.

6.1.2.5. Ağdaki Kullanılabilir Kanal Sayısının Trafik Yoğunluğuna Bağlı Olarak İletilen ve Düşen Paket Sayısına Etkisi

802.11a protokolünde toplam 12, 802.11b/g'de ise 3 adet orthogonal kanal bulunmaktadır. Bu bilgi göz önüne alınarak, kanal sayısının ve trafik yoğunluğunun ağ performansına etkisini ölçmek için DMesh ve iDMesh mimarileri için 50 düğüm ve 1 ağ geçidine sahip bir ağ üzerinde 3,6 ve 12 kanallı senaryolar üretilmiştir.

Kanal sayısının değişiminin iletilen paket miktarları üzerindeki etkisi şekil 6.9'da görülmektedir.



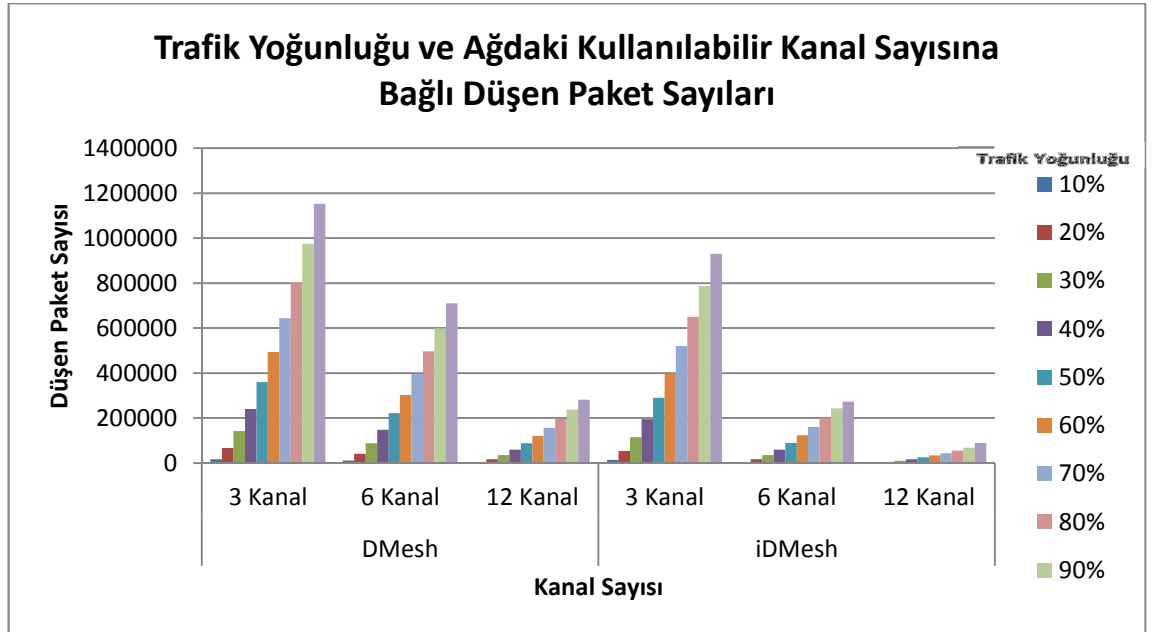
Şekil 6.9: Trafik yoğunluğu ve ağdaki kullanılabilir kanal sayısının başarılı iletilen paket sayısına etkisi.

Ağ üzerindeki kullanılabilir kanal sayısının artması ile beraber, komşu iletişimler arasında meydana gelebilecek parazitlenmenin azalması beklenmektedir. Her iki mimari de kendi içerisinde değerlendirildiğinde kanal sayılarının artması aynı trafik yoğunluğuna sahip ağ senaryolarında iletilen paket miktarının da artmasına neden olmaktadır. Kanal sayılarındaki değişim miktarının DMesh ve iDMesh mimarilerinin performansına etkileri incelenirse, aynı kanal sayısına ve yoğunluğuna sahip bir ağda, iDMesh mimarisinin ve kanal atama yönteminin kullanılması, hedefine başarıyla iletilen paket sayıları açısından DMesh'e göre daha iyi bir performans ortaya koymaktadır. Bunun temel nedeni mimariler arasındaki kanal atama şemalarındaki farklılıktır. iDMesh'de ortaya konan kanal atama algoritması, kanal tahsisinde öncelikli olarak parazitlenmeyi göz önüne alır. Dolayısıyla komşu iletişimler arasında olabilecek tüm parazitlenmeleri en başından hesaplayarak, parazitlenme ihtimalini minimuma indirmeyi amaçlar. Böylelikle ağ üzerinde birbirini parazitlemeyen iletişimler aynı kanalı kullanabilir.

DMesh’de ise öncelikli olarak boş kanallara atama yapıldığından, trafik yükünün artması ile boş kanal sayısı azalacak hatta sıfırlanacaktır. Kalan düğüm çiftleri arasında iletişimin gerçekleştirilmesi için hali hazırda kullanılan kanallardan atama yapılmaya çalışılması da komşu iletişimler arasındaki parazitlenme ihtimalinin artmasına neden olarak daha az sayıda paketin hedefine ulaşmasıyla sonuçlanacaktır.

Değişen kanal sayısına bağlı olarak iDMesh, DMesh üzerinden iletilen paket bakımından %10-%15 arası bir iyileştirme gerçekleştirmektedir.

Şekil 6.10’da ise kanal sayısındaki değişimin ağ üzerindeki parazitli iletişim sayısına ve bundan kaynaklı ortaya çıkacak paket kayıplarına etkisi görülmektedir. Kanal sayısı arttıkça daha fazla miktarda paketin hedefine ulaşmasının beklenmesi aynı zamanda daha az paket kayıpları olması demektir. Bu nedenle de DMesh ve iDMesh mimarileri kendi içlerinde değerlendirildiğinde kanal sayısının artması, aynı yoğunluktaki ağ senaryolarında daha az sayıda düşen paket ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 6.10: Trafik yoğunluğu ve ağdaki kullanılabilir kanal sayısının düşen paket sayısına etkisi.

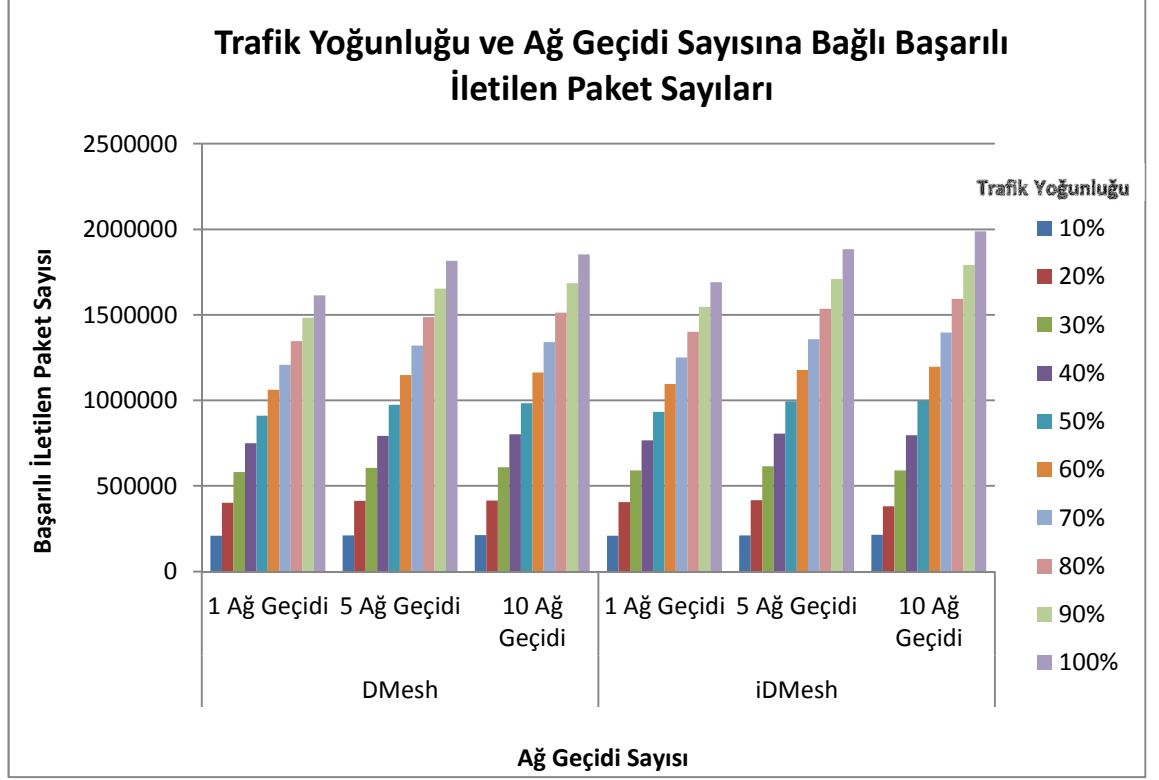
DMesh ve iDMesh arasında karşılaştırma yapılmak istendiğinde ise, aynı yoğunluk ve kanal sayılarına sahip senaryolarda, iDMesh'in önemli ölçüde ağ performansını arttırdığı ve daha az sayıda düşen paket değerine ulaştığı gözlenmektedir. 3 kanal için %24 civarında iyileştirme gözlenirken, 6 kanal için %160, 12 kanal için ise %254 oranında performans artışı gözlenmiştir.

6.1.2.6. Ağdaki Ağ Geçidi Sayısının Trafik Yoğunluğuna Bağlı Olarak İletilen ve Düşen Paket Sayısına Etkisi

Ağ geçidi, kablosuz mesh altyapısı içerisinde tüm trafiğin toplanarak internete çıktığı noktadır. Bu nedenle ağın trafik yükünün toplandığı merkezler olarak değerlendirilebilir.

Hem DMesh'de hem de iDMesh'de ağın oluşturulması sırasında, her yeni düğüm yönlendirme ağacının elemanı olacak şekilde birbirlerine bağlanmaktadır. Bu bağlanma esnasında ağ geçidine olan uzaklık göz önüne alındığından fiziksel konumu ağ geçidine yakın olan düğümler ağ geçidinin çocukları olacak şekilde bağlantı kurmaktadır. Ağ üzerinde ne kadar çok sayıda ağ geçidi özelliğine sahip düğüm varsa, ağın yükü o oranda bu düğümler arasında paylaştırılacak, böylece ağ üzerinde sıkışmalar daha az meydana gelecektir. Özellikle trafik yoğunluğunun fazla olduğu ağlarda birden fazla ağ geçidinin bulunması ağ performansına olumlu yönde etki edecektir.

Şekil 6.11'de ağ üzerindeki ağ geçidi sayısının iletilen paket miktarına etkisi görülmektedir. Ölçümler sırasında 50 düğüm ve toplam 3 adet kullanılabilir kanala sahip bir ağ yapısı üzerinde ağ geçidi sayısı 1,5 ve 10 olacak şekilde 3 farklı senaryo üretilmiştir.

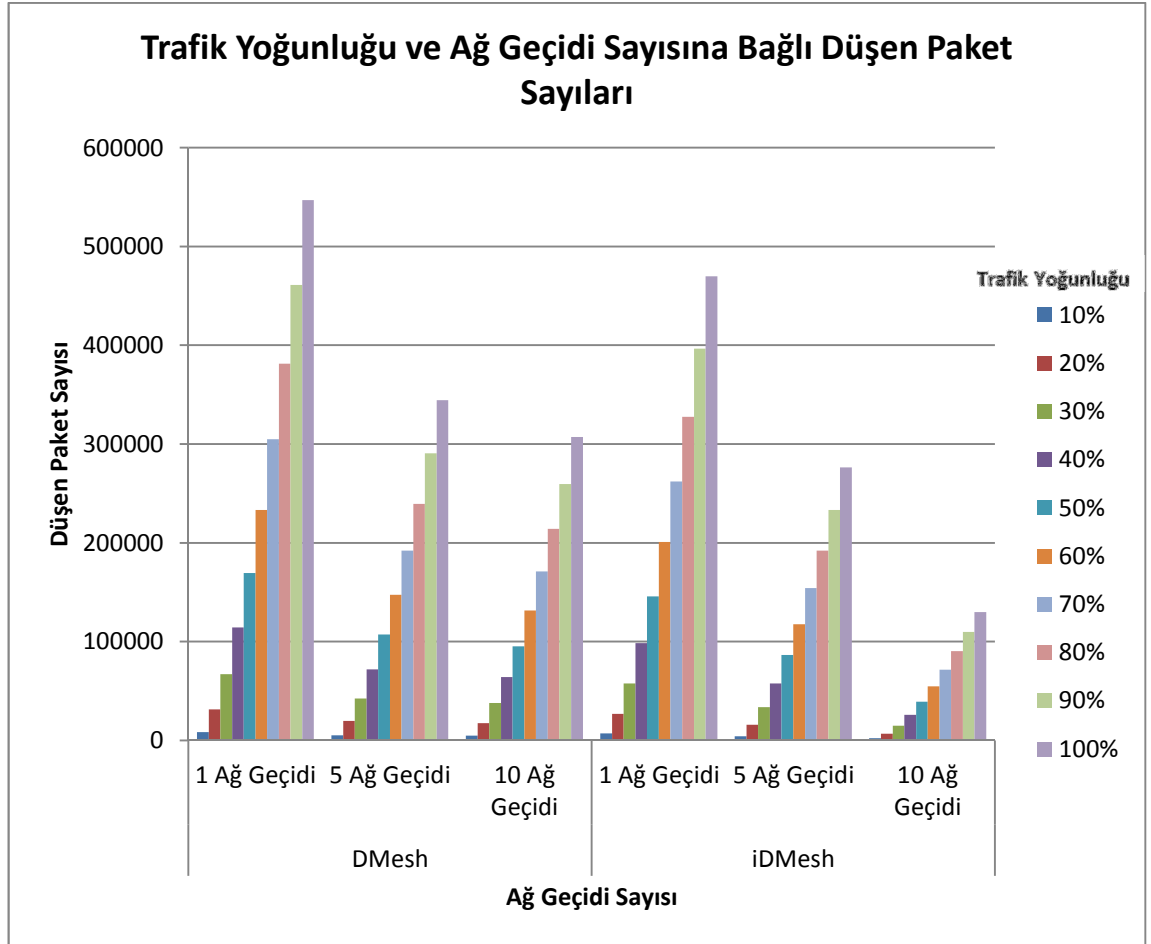


Şekil 6.11: Trafik yoğunluğu ve ağ geçidi sayısının başarılı iletilen paket sayısına etkisi.

DMesh ve iDMesh mimarileri kendi içlerinde değerlendirildiğinde aynı trafik yoğunluğunda ağ geçidi sayısının artmasının iletilen paket sayısı açısından performans artışına neden olduğu görülmektedir.

DMesh ve iDMesh arasında karşılaştırma yapılmak istendiğinde ise, aynı trafik yoğunluğuna ve eş sayıda ağ geçidi düğümüne sahip senaryolarda, iDMesh'in, DMesh'den daha iyi bir performans sergilediği açıkça görülmektedir. %100'lük bir trafik yoğunluğunda iDMesh'in %7 civarında iyileştirme yaptığı saptanmıştır.

Şekil 6.12'de ise ağ geçidi sayısındaki değişimin ağ üzerindeki paket kayıplarına etkisi görülmektedir. Ağ geçidi sayısının artması internete çıkış noktasında daha az sıkışmaya neden olacağından ve ağ geçidine yakın düğümlerin internete çıkış noktası olarak farklı ağ geçitlerini seçme ihtimalinin arttıracağından ağ üzerinde birden fazla yönlendirme ağacı oluşabilecektir. Düğümlerin farklı ağ geçitleri altında köklenmesi kanalların yeniden kullanılabilirliğini arttırmaktadır.



Şekil 6.12: Trafik yoğunluğu ve ağ geçidi sayısının düşen paket sayısına etkisi.

DMesh ile iDMesh’de farklılaşan kanal atama şemalarından kaynaklı, iDMesh paraziti daha fazla önemseyerek atama işlemi gerçekleştirir ve DMesh ve iDMesh mimarileri kendi içlerinde değerlendirildiğinde ağ geçidi sayısının artması, aynı yoğunluktaki ağ senaryolarında iDMesh’in daha az sayıda düşen paket değerlerine sahip olmasına neden olmaktadır. 1 Ağ geçidinin bulunduğu senaryo için iDMesh, DMesh karşısında düşen paket sayısı açısından %16 iyileştirme sunmaktadır. 5 ağ geçidi için bu oran %25’e, 10 ağ geçidi için ise %150’lere kadar çıkmaktadır.

6.1.2.7. Trafik Yoğunluğunun Gelen Aramaları Bloke Etme İhtimali Üzerinde Etkisi

Arama bloklama ihtimali, eşdeğerdeki bir grup kaynak için gelen aramaların bloke edilmesi ihtimalidir. Simülasyon sırasında ölçüm amacıyla bu kaynakların kanallar olduğu varsayılmıştır.

DMesh ve iDMesh mimarilerinde, gelen aramalar için bloke edilme ihtimalleri Erlang-B formülü ile şu şekilde hesaplanmıştır:

$$P_b = B(E, m) = \frac{\frac{E^m}{m!}}{\sum_{i=0}^m \frac{E^i}{i!}} \quad (6.1)$$

Burada, P_b bloklanma ihtimalini, m kullanılabilir kanal sayısını, E ise sunulan trafik değerini göstermektedir.

Şekil 6.13’de ağ üzerindeki trafik yoğunluğunun gelen aramaların bloklanması üzerine etkisi görülmektedir. Ölçümler sırasında 50 düğüm ve toplam 3 adet ağ geçidine sahip bir ağ yapısı üzerinde kullanılabilir kanal sayısı 3,6 ve 12 olacak şekilde 3 farklı senaryo üretilmiştir. Bu kanal sayıları (6.1)’de m değerini temsil edecek şekilde hesaplama katılmıştır. E değeri (6.2)’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

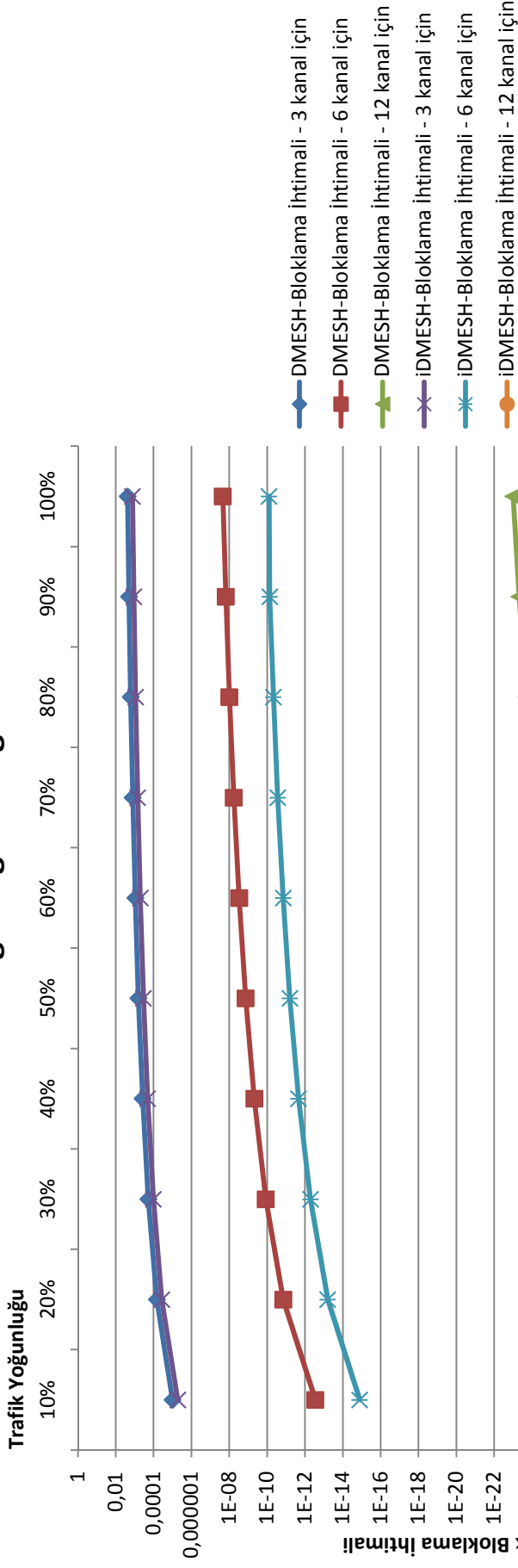
$$E = \frac{\text{Başarılı bir şekilde iletilen paketlerin sayısı}}{\text{İletilen toplam paket sayısı}} \quad (6.2)$$

Aynı trafik yoğunluğuna sahip DMesh ve iDMesh mimarileri ayrı ayrı değerlendirildiğinde, kanal sayısındaki artışın bloklama ihtimalini azalttığı görülmektedir. Bu da daha fazla paketin başarılı bir şekilde hedefine vardığını göstermektedir.

DMesh ve iDMesh arasında karşılaştırma yapılmak istendiğinde ise, 3 kanallı yapı için aynı trafik yoğunluğuna sahip senaryolarda, iDMesh’in, DMesh ile çok yakın bloklama

değerlerine sahip olduğu görülürken, kanal sayısı 6 ve 12 olarak arttırıldığında, iDMesh'in daha iyi bir performans sergilediği açıkça görülmektedir. Bunun en temel nedeni de kanal sayısının artması ile beraber iDMesh'in, DMesh'e göre parazit kontrolü üzerinde başarımının artması, ağ boyunca sıkışma ve paket yeniden gönderimlerini minimize etmesi ve daha fazla paketi hedefine ulaştırmayı başarabilmesidir.

Trafik Yoğunluğuna Bağlı Olarak Arama Bloklama İhtimali



Şekil 6.13: Trafik yoğunluğuna bağlı olarak DMesh ve iDMesh mimarilerinin arama bloklama ihtimalleri.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

İnternet günlük hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Bankacılık işlemlerinden, çevrimiçi eğlenceye kadar birçok alanda giderek büyüyen bir kullanıcı kitlesine sahiptir. Gelecekte internet erişiminin, hücresel telefonlarda sıklıkla kullandığımız servisler gibi kablosuz olması, kullanıcılar açısından oldukça verimli olacaktır. Fakat bunu sağlayabilmek için yeni bir ağ tasarlanması ya da mevcut bir ağın geliştirilmesi, altyapıda birçok değişiklik yapılmasını da beraberinde getirmektedir. Mesh ağ yapısı bu noktada devreye girmekte ve yeni bir altyapı için daha az ihtiyaçla daha gelişmiş bir internet erişimi vaat etmektedir.

Mesh ağların en büyük avantajı altyapı olmaksızın çalışabilmeleridir. Mesh ağlar, 4G dediğimiz gelecek nesil ağlar içerisinde bu özellikleriyle yenilenmiş bir teknoloji olmaktan çok, ek bir erişim teknolojisi olarak yerini alacaktır.

Kablosuz mesh ağlarının düşük maliyet, kolay ağ bakımı, sağlamlık, güvenilir servis alanı gibi birçok avantajı vardır. Bu da birçok şirketin bu teknolojinin potansiyelinin farkına varmasına ve kablosuz mesh ağ ürünlerini piyasaya sürmeye başlamasına neden olmuştur. Bu avantajlara ve özelliklere rağmen kablosuz mesh ağlarının araştırılmaya ve geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Mevcut protokollerin yeniden yapılandırılması ya da genişletilmesi gerekmektedir. Optimal bir yönlendirme ve kanal tahsis algoritmasının tasarımı bu noktada bir zorunluluk halini almaktadır. Birçok algoritma kablolu ve kablosuz ağlardan kablosuz mesh ağlar için uyarlanmışsa da, bireysel karakteristiklerinden tam olarak faydalanılamamaktadır.

Bu tez çalışmasında Kablosuz Mesh Ağlar (Wireless Mesh Networks - WMNs) üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir. WMN sistemlerinin mimari yapıları, geliştirilen standartlar ve var olan yöntemler arasındaki performans farklılıkları üzerinde durulmuştur. Çalışmalar çoklu kanal-çoklu radyo WMN sistemler üzerinde derinleştirilerek, kanal tahsis ve yönlendirme algoritmaları incelenmiş ve kategorize

edilmiştir. Çalışmalar neticesinde geliştirilen yönlü antenlere sahip çoklu kanal-çoklu radyo kanal tahsis ve yönlendirme algoritması (iDMesh – Improved DMesh), DMesh (Incorporating Practical Directional Antennas in Multichannel Wireless Mesh Networks) algoritmasıyla karşılaştırılarak performans değerlendirmeleri yapılmıştır. DMesh algoritmasının kanal tahsis mekanizması üzerinde iyileştirilmesi yapılmış ve bu yeni modelin ağ performansına etkisi ortaya konulmuştur. Son olarak yeni geliştirilen ağ modeli ve algoritmaya konum tespiti özelliği eklenerek, modellenmiş ve sistem üzerindeki parazitlenme açısından artıları ortaya konulmuştur.

Çoklu kanal çoklu radyo mesh ağ yapısı diğer ağlara kıyasla farklı çözümler ve buna bağlı olarak avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajların yanı sıra komşu düğümler arasında aynı kanalı aynı anda kullanma durumunda birbirlerinin iletişimlerini parazitlenme sorunu ortaya çıkmaktadır.

Ağdaki taşınabilir etkin yükü arttırmak amacıyla bir düğüm üzerinde birden fazla yönlü anten ile her yönde iletim yapan antenin bir arada kullanıldığı ilk yapı DMesh'dir. DMesh mimarisindeki birtakım tasarım eksiklikleri bu mimarinin istenilen ölçüde performans gösterememesine neden olmaktadır. Öncelikle kanal ataması sırasında ağın yükünün yoğun olmadığı dönemde her yeni düğüm için boş bir kanal araması yapılması ve bulunması halinde kanalın bu iletişim için tahsis edilmesi, yoğunluğun arttığı dönemde çok sayıda parazitlenmeye maruz kalmaya neden olmaktadır. Bunun yanında sistemdeki tüm düğümlerin antenlerinin birbirlerini tam olarak görebileceği varsayılmıştır ki bu da pratikte çok mümkün değildir. Mimari de düğümler ve antenler mükemmel koşulları sağlayacak şekilde manuel olarak yerleştirilmektedir. Bu da yine gerçek uygulamalarda sıkıntı doğurabilecek bir yaklaşımdır.

DMesh'in avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Sadece, her yönde iletim yapan yönlü bir antene sahip mesh ağların aksine, aynı anda birden fazla yönlü anten kullanımına izin vererek bu antenler üzerindeki ağ arayüz kartlarının farklı kanallarda çalışması sonucu, eş zamanlı daha fazla sayıda iletişime izin vermektedir.
- Bu amaçla ortaya atılan ilk mimari özelliği göstermektedir.

- Kanal tahsisi sırasında parazitten kaçınmak amacıyla komşu iletişimlere farklı kanal ataması yapmaya çalışmaktadır.

Bunların yanında DMesh mimarisini zayıf kılan bazı dezavantajları da bulunmaktadır:

- Parazitten kaçınmak için kullandığı yöntem yoğun trafiğin olduğu ağlarda başarısız olmakta, aynı zamanda zaten kısıtlı sayıda olan kanal kaynağını hızla tüketmektedir.
- Düğüm sayısı ve trafik yoğunluğu arttıkça kullanılabılır boş kanal sayısı da azalacağından ya da hiç boş kanal kalmayacağından komşu iletişimler için kullanılacak kanal seçimi sırasında oluşabilecek parazitlenme miktarı da artmaktadır.
- Mükemmel bir ağ ortamı olduğu düşünülmekte, ağ üzerindeki düğümler manuel bir şekilde, mükemmel iletişimi sağlayacakları düşünülerek yerleştirilmektedir. Gerçek ağ senaryolarında ise düğümlerin konumları, birbirlerini görme açıları mükemmeliyetten uzak olabilir.

Tüm bu dezavantajlar ve avantajlar gözönüne alınarak, iDMesh algoritması ile DMesh’de eksik görülen kanal atama şeması parazit haberli bir hale dönüştürülerek kanal atama seçiminde tüm olası parazitlenmeler maksimum seviyede ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bunun yanında düğümlerin dinamik bir şekilde yerleştiği daha realistik bir ağ ortamı düşünülerek ağa her yeni katılan düğümün olası ebeveynlerini hesaplamak için anten bölgeleri hesaplanmış, bu işlem için de ters trigonometrik fonksiyonlardan yararlanılmıştır.

DMesh ve iDMesh yapılarının kanal atama şemalarının algoritmik olarak test edilmesi için bir simülasyon geliştirilmiştir. MATLAB simülasyon ortamında gerçekleştirilen bu simülasyonda, geliştirilen kanal atama şeması, kanal atama işlemi sırasında düğümlerin fiziksel konum bilgileri yardımıyla anten bölgesi tespiti yapılması için geliştirilen matematiksel modelden yararlanılarak performans açısından test edilmektedir.

Simülasyon sırasında değişen parametreler karşısında DMesh ve iDMesh mimarilerinin davranışları gözlenmektedir. İlk olarak birbirini parazitleyen komşu iletişimlerin

miktarının ağdaki düğüm sayısı, kanal sayısı ve ağ geçidi sayısına bağlı olarak değişimleri izlenmiştir.

DMesh mimarisinde kullanılan kanal atama algoritması, olası parazitlenmeleri yönlendirme ağacının ilk kurulmasından itibaren hesaplamadığı için ancak parazitlenmeyle karşılaşılması durumunda önlem alma yoluna gitmektedir. Oysaki iDMesh algoritmasında düğümlerin birbirlerine bağlanma anlarında parazitlenme oluşturabilecek koşulların minimuma indirilmeye çalışılması sonucunda, ağdaki kullanılabilir kanal sayısı sabit kalmak koşuluyla, artan düğüm yoğunluğu sonucunda iDMesh algoritmasının DMesh'e göre daha iyi sonuç verdiği, düğüm sayısı arttıkça aradaki performans farkının da açıldığı gözlenmektedir.

Bir ağdaki kullanılabilir kanal sayısı ne kadar çok olursa, komşu iletişimlerin farklı kanalları seçerek birbirlerinin iletişimlerini parazitleme olasılıkları da aynı oranda azalacaktır. Kanal sayısının artmasıyla beraber hem DMesh hem de iDMesh'de parazitlenen iletişim sayılarında önemli azalmalar meydana gelmektedir. Ancak DMesh her bir düğüm çifti için daha önce kullanılmamış kanallar arasından seçim yaptığından, trafik yoğunluğu arttıkça boş kanal bulma sıkıntısı yaşayacak ve kanalları yeniden kullanma yoluna gidecektir. Bu durum beraberinde komşu iletişimler için aynı kanalların seçilme riskini de getirmektedir. iDMesh'de böyle bir riski ortadan kaldırmak amacıyla kanal ataması sırasında parazit oluşturabilecek iletişimlerin kullandığı kanallar seçim dışı bırakılmakta, boş kanalları kullanmak yerine parazit oluşturmayan başka bir iletişimin kullandığı kanalı seçme yoluna gidilmektedir. Böylelikle hem daha az sayıda parazitlenmeyle karşılaşmakta hem de zaten kısıtlı olan kanallar hızlı bir şekilde tükenmemektedir.

Ağ geçidi, kablosuz mesh altyapısı içerisinde tüm trafiğin toplanarak internete çıktığı noktadır. Bu nedenle ağın trafik yükünün toplandığı merkezler olarak değerlendirilebilir. Bir düğüm ağa katılmak istediğinde internete en hızlı çıkabileceği düğümü hedef alacağından, eğer ağ geçidi özelliğine sahip bir düğüme yakınsa kendine ebeveyn olarak o düğümü seçme yoluna gidecektir. Ağ geçidi sayısındaki artış fiziksel olarak bu düğümlere yakın olan düğümlerin ebeveyn olarak farklı ağ geçitlerini seçme ihtimalini arttıracaktır. Böylece tek bir ağ geçidi üzerinden internete çıkacak trafik

miktarı azalacak, linkler üzerinde sıkışmalar meydana gelmeyecektir. Yapılan ölçümler sırasında hem DMesh hem de iDMesh için ağ geçidi sayısının artmasının parazitli iletişim sayılarına olumlu etki ettiği gözlenmiş ancak bu etkinin belli bir seviyede kaldığı hatta belli bir noktadan sonra stabil hale geldiği görülmektedir. Bunun nedeni her bir düğüm kümesinin fiziksel olarak ağ geçitleri etrafında homojen bir şekilde dağılmamasıdır. Ancak mükemmel koşullar altında her bir düğümün önceden yerleştirildiği ağ senaryolarında ağ geçidi sayısının artışı parazitli iletişim sayısında sürekli bir azalmaya neden olur.

Hem DMesh’de hem de iDMesh’de ağın oluşturulması sırasında, her yeni düğüm yönlendirme ağacının elemanı olacak şekilde birbirlerine bağlanmaktadır. Bu bağlanma esnasında ağ geçidine olan uzaklık göz önüne alındığından fiziksel konumu ağ geçidine yakın olan düğümler ağ geçidinin çocukları olacak şekilde bağlantı kurmaktadır. Ağ üzerinde ne kadar çok sayıda ağ geçidi özelliğine sahip düğüm varsa, ağın yükü o oranda bu düğümler arasında paylaştırılacak, böylece ağ üzerinde sıkışmalar daha az meydana gelecektir. Özellikle trafik yoğunluğunun fazla olduğu ağlarda birden fazla ağ geçidinin bulunması ağ performansına olumlu yönde etki edecektir.

Simülasyon ile sistem davranışlarının incelenmesi sırasında ölçülen bir başka performans kriteri de ağ üzerinde hedefine başarıyla ulaşan paket sayıları ve parazit nedeniyle hedefine ulaşamayan yani düşen paket sayılarıdır. Bu değerler değişen düğüm sayıları, kanal sayıları ve ağ geçidi sayılarına bağlı olarak ölçülmektedir.

Bir ağdaki düğüm sayısının artması, daha fazla sayıda iletişime ve paket üretilmesine neden olacak, kanal sayısının sabit kalması koşuluyla da daha fazla parazitli trafik üretilecek ve paket kayıpları yaşanacaktır. Bunun yanı sıra trafik yoğunluğunun artması da aynı şekilde paket sayısında bir artışa neden olarak, kanal kullanım oranını arttırarak paket kayıp miktarını olumsuz yönde etkileyecektir. Yapılan ölçümlerde DMesh ve iDMesh önce kendi içlerinde trafik yoğunlukları ve düğüm sayılarının artışına bağlı gösterdikleri davranışlar açısından incelenmiş; daha sonra da aynı trafik yoğunlukları ve düğüm sayılarına sahip ağ senaryoları için aralarındaki performans farklılıkları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem DMesh hem de iDMesh mimarilerinde trafik yoğunluğu ve düğüm sayısı arttıkça daha fazla sayıda paket

üretilmekte, dolayısıyla hedefine ulaşan paket sayıları da artmaktadır. Bunun yanında aynı trafik yoğunluğuna ve düğüm sayısına sahip senaryo üzerinde DMesh ve iDMesh sırasıyla çalıştırıldığında, paket teslim oranı açısından iDMesh'in daha iyi bir sonuç verdiği gözlenmektedir. Bunun temel nedeni kanal atama şemaları arasındaki parazite önem vererek tahsis yapmadaki farklılıktır. iDMesh bağlantı kurma esnasında parazitlenme ihtimalini asgariye indirdiğinden DMesh'e göre performans üstünlüğü sağlaması kaçınılmaz hale gelmektedir. Aynı şekilde düşen paket miktarlarına bakıldığında her iki mimari için de ağdaki düğüm sayısı ve trafik yoğunluğunun artması daha fazla sayıda parazitli iletişime neden olarak daha çok paketin hedefine ulaşmasına engel olacaktır. Parazitlenme seviyelerindeki farklılık nedeniyle düşen paket sayısı açısından bakıldığında iDMesh, DMesh üzerinden kayda değer bir iyileştirmeye neden olmaktadır.

Bir ağda parazitlenmeye neden olan en büyük etken kullanılabilir kanal sayısıdır. Kanal sayısı ne kadar fazla olursa, düğüm çiftlerinin haberleşme esnasında kullanabilecekleri kanalların komşularından farklı olma ihtimali de aynı oranda artar. Bu da daha az parazitli iletişim ve daha fazla paket iletim oranı anlamına gelmektedir. Yapılan ölçümler sırasında görülmüştür ki DMesh ve iDMesh için kanal sayılarının artması her iki mimaride de teslim edilen paket oranlarında oldukça büyük artışlara neden olmuştur. Bu da ağ üzerinde düşen paket miktarını azaltmıştır. Ancak yine görülmektedir ki iDMesh mimarisinde kullanılan kanal atama şeması parazitten kaçınma bakımından DMesh'ten daha üstündür ve aynı yoğunluktaki trafiğin üretildiği eş sayıda düğüme sahip bir ağ senaryosu için iletilen ve düşen paket sayılarında daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur. Özellikle düşen paket sayısında DMesh üzerinden 2 kattan fazla bir performans artışı sergilemiştir.

Ağ geçidi sayısındaki değişimler de diğer ölçümlere benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Ağ geçidi, kablosuz mesh altyapısı içerisinde tüm trafiğin toplanarak internete çıktığı noktadır. Bu nedenle ağın trafik yükünün toplandığı merkezler olarak değerlendirilebilir. Hem DMesh'de hem de iDMesh'de ağın oluşturulması sırasında, her yeni düğüm yönlendirme ağacının elemanı olacak şekilde birbirlerine bağlanmaktadır. Bu bağlanma esnasında ağ geçidine olan uzaklık göz önüne alındığından fiziksel konumu ağ geçidine yakın olan düğümler ağ geçidinin çocukları olacak şekilde bağlantı

kurmaktadır. Ağ üzerinde ne kadar çok sayıda ağ geçidi özelliğine sahip düğüm varsa, ağın yükü o oranda bu düğümler arasında paylaştırılacak, böylece ağ üzerinde sıkışmalar daha az meydana gelecektir. Özellikle trafik yoğunluğunun fazla olduğu ağlarda birden fazla ağ geçidinin bulunması ağ performansına olumlu yönde etki edecektir. Trafik yükünün artmasıyla beraber ağda bulunan ağ geçidi sayısının da artması ağ performansına artı yönde katkı sağlamaktadır. Ağ geçidi sayısının artması düğümlerin farklı ağ geçitleri altında köklenmesine sebep olacaktır. Bunun yanında kanal atama yöntemi ne kadar fazla parazitten kaçınacak şekilde işlerse o oranda performansı arttıracaktır. iDMesh kanal atama şeması diğer ölçümlerde olduğu gibi DMesh üzerinden göre göze görülür bir iyileştirme yapmaktadır.

Tüm bu sonuçlar göstermektedir ki iDMesh ile izlenen kanal atama yöntemi, özellikle kullanılabilir kanal sayısında artış gözlemlendiğinde ve çok sayıda düğümün olduğu yoğun ağ mimarilerinde DMesh'in ortaya koyduğu performansa kıyasla önemli ölçüde artış göstermektedir.

WMN'ler teknolojinin yeni bir alanıdır. Yeni nesil internet için çözüm olarak üretilmiştir ve sahip oldukları birçok özellik ile yeni nesil kablosuz mobil ağlar içinde önemli bir rol oynamaktadırlar. WMN'ler, dinamik olarak kendi kendine organize olabilen, yapılanabilen, kendini iyileştirebilen böylelikle esnek entegrasyon sağlayan, hızlı kurulum, kolay bakım, düşük maliyetler, yüksek ölçeklenebilirlik ve güvenli servis özelliklerine sahip sistemlerdir.

Bu ağlarda yüksek sayıda düğüm olması, güvenlik, ölçeklenebilirlik, yönetilebilirlik gibi konularda çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmaktadır. WMN'lerin yeni uygulamalarının ortaya çıkması gizlilik korunumunu ve WMN'lerin güvenlik mekanizmalarını bir ihtiyaç haline getirmiştir.

WMN'lerin en büyük sıkıntısı karmaşık olmalarıdır. Bir WMN'ü dizayn etmesi, oluşturması ve paketleri iletmesi çok kolay olmasına rağmen güvenlik ve sağlamlığı sağlamak için optimum performansa ulaşabilmek oldukça zordur.

WMN'ler teknolojideki gelişmelere rağmen hala araştırmaya açık bir konudur. Özellikle mesh ağlar üzerinde güvenlik protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Hali hazırda kablosuz ad hoc ağlar için kullanılan güvenlik protokolleri mesh ağların ihtiyaçlarını karşılamaya tam olarak yetmemekte, bu nedenle de yeni protokol tasarlanması ya da var olanların mesh ağlara uygun bir şekilde modifiye edilmesi sağlanmalıdır.

Bunun yanında, günümüzde kablosuz mesh ağlar için geliştirilen çok sayıda yönlendirme metriği ve yönlendirme algoritması bulunmasına rağmen tüm ağ yapılarının ihtiyaçlarını karşılayabilecek entegre bir sistem henüz ortaya konmamıştır.

Kullanıcıların artan ihtiyaçlarını karşılamak, daha fazla miktarda veri trafiğini eş zamanlı desteklemek için tek kanallı-tek radyolu yapıların karşısında çoklu kanal-çoklu radyo yapılarının ortaya çıkmasıyla beraber, özellikle çoklu kanallı çoklu radyolu kablosuz mesh ağlar ve bu ağlarda kanal tahsis ile yönlendirme konuları üzerine birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır. Çok kanallı yapının getirmiş olduğu daha fazla veri kapasitesi olanağı ile kablosuz mesh ağlar giderek daha popüler bir teknoloji olmaya başlamıştır. Çok kanallı yapının getirdiği avantajların yanı sıra komşu düğümlerin farklı iletişimler içerisinde yer alarak ortak bir kanalı kullanmaları ağ üzerinde yüksek miktarda parazitlenmeye neden olmakta ve bundan kaynaklı veri kayıpları yaşanmaktadır. Parazitlenme durumunu ortadan kaldırmak ya da minimize etmek amacıyla öncelikle uygun bir kanal atama algoritması ve parazitin önlenemediği durumlarda paketleri güvenli bir şekilde hedeflerine ulaştırabilecek yönlendirme algoritmaları geliştirilmeli ve bu iki mekanizmanın birbirleriyle paralel çalışması gerekmektedir.

Bu tez kapsamında çoklu kanal-çoklu radyo WMN sistemler üzerinde her yönde iletim yapan antenler ile ve tek yönde iletim yapan antenlerin bir arada kullanıldığı ilk mimari olan DMesh yapısının kanal atama ve yönlendirme mekanizmaları incelenmiş, DMesh algoritmasının kanal tahsis mekanizması üzerinde iyileştirilme yapılmış ve bu yeni modelin (iDMesh – Improved DMesh) ağ performansına etkisi ortaya konulmuştur. Sonuçlar göstermektedir ki ortaya atılan bu yeni model, değişen sistem parametreleri altında DMesh'e göre ağ performansında büyük artışlar sağlamıştır. iDMesh'deki kanal

atama algoritmasına konum tespiti özelliği eklenmesi, sistem üzerindeki parazitlenme miktarını da minimize ederek veri kayıplarının da önüne geçmiştir.

KAYNAKLAR

- Akyildiz I.F., Wang X.; 2009, *Wireless Mesh Networks*, WILEY, United Kingdom, 978-0-470-03256-5.
- Alzubir A., Bakar K. A., Yousif A., Abuobieda A.; 2012, State of the Art, Channel Assignment Multi-Radio Multi-Channel in Wireless Mesh Network , *International Journal of Computer Applications*, 37(4), 14-20.
- Aswal M.S., Rawat P., Tarun K.; 2009, Threats and Vulnerabilities in Wireless Mesh Networks, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2(4), 155-158.
- Bellardo J., Savage S.; 2003, 802.11 Denial of- Service Attacks: Real Vulnerabilities and Practical Solutions, *12th USENIX Security Symposium*, 4-8 August Washington DC, 15-27.
- Biswas S., Morris R.; 2005, ExOR : Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks, *ACM SIGCOMM 2005*, 22-26 Aug. 2005 Philadelphia, 133-44.
- Camp T., Boleng J., Davies V.; 2002, A survey of mobility models for ad hoc network research, *Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC), Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2 (5), 483-502.
- Campista M. E. M., Esposito P. M., Moraes I. M., Costa M. K., Carlos O., Passos D. G., Albuquerque C. V. N., Saade M, Rubinstein M. G.; 2008, Routing Metrics and Protocols for Wireless Mesh Networks, *IEEE Network*, 22(1), 6-12.
- Cheekiralla S., Engels D.W.; 2007, Routing in Heterogeneous Wireless Ad-hoc Networks, *16th International Conference on Computer Communications and Networks ICCCN 2007*, 13-16 Aug. 2007, 951-956.
- Chun Y., Qin L., Yong L., Meilin S., 2000, Routing Protocols Overview and Design Issues for Self- Organized Network, *International Conference on Communication Technology WCC - ICCT 2000*, August 2000, 1298-1303.
- Das S.M., Pucha H., Koutsonikolas D., Hu Y.C., Peroulis, D.; 2006, DMesh: incorporating practical directional antennas in multichannel wireless mesh networks, *Selected Areas in Communications IEEE Journal*, 24(11), 2028-2039.

- De Couto D., Aguayo D., Bicket J., Morris R; 2003, A high-throughout path metric for multi-hop wireless routing, *9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2003, 234-248.
- De Couto D. S. J.; 2004, *High-Throughput Routing for Multi-Hop Wireless Networks* [online], <http://pdos.csail.mit.edu/papers/grid:decouto-phd/thesis.pdf>, [Ocak 2012].
- Durukan-Odabaşı Ş., Zaim A. H.; 2011, A Survey on Wireless Mesh Networks, Routing Metrics and Protocols; *IJEMME-International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering Journal*, 2(1), 92-104.
- Durukan-Odabaşı Ş.; Yıltaş-Kaplan D.; 2012, Allocation, Routing, and Assignment Strategies in Wireless Mesh Networks, *Proceedings of the Int. Conference on Networking and Future Internet (ICNFI 2012)*, 2012, 25-27 April 2012 Istanbul Turkey, 93-98.
- Durukan-Odabaşı Ş.; Zaim A. H.; 2012, Wireless Mesh Sensor Networks:Advantages, Difficulties and Interconnection Methods, *Proceedings of the Int. Conference on Networking and Future Internet (ICNFI 2012)*, 25-27 April 2012 Istanbul Turkey, 88-92.
- Draves R., Padhye J., Zill B.; 2004, Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks, *Conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM)*, August 2004, 133-144.
- Firetide, 2011, *WIRELESS MESH NETWORKS* [online], <http://www.firetide.com>.
- Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., Viennot L.; 2001, Optimized link state routing protocol for ad hoc networks, *Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century, 2001*, 62-68.
- Fowler, T.B., 1999, A Short Tutorial on Fractals and Internet Traffic, *The Telecommunications Review*, 1999, vol.10, pp. 1-15.
- Jain, R., Routhier, S.A., 1986, Packet trains-measurement and a new model for computer network traffic, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. Sac-4, No: 6, pp. 986-995, September 1986.
- Karp B., Kung H.T.; 2000, GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks, *MobiCOM 2000, 6-11 August 2000 Boston*.
- Koskal C.E., Balakrishnan H.; 2006, Quality-aware routing metrics for time-varying wireless mesh networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(11), 1984-1994.

- Kyasanur P., Vaidya N.; 2005, Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks, *Wireless Communications and Networking Conference, 13-17 March 2005 New Orleans*, 2051–2056.
- Matlab, 2011, *MATLAB: The Language of Technical Computing* [online], <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- Marina M., Das S. R.; 2005, A Topology Control Approach for Utilizing Multiple Channels in Multi-Radio Wireless Mesh Networks, *2nd International Conference on Proc. Broadnets, 3-7 Oct. 2005 Los Angeles*, 381–390.
- Methley S.; 2009, *Essentials of Wireless Mesh Networking*, CAMBRIDGE, New York, 978-0-511-58070-3.
- Nelakuditi S., Sanghwan L., Yinzhe Y., Junling W., Zifei Z., Guor-Huar L., Zhi-Li Z.; 2005, Blacklist-Aided Forwarding in Static Multihop Wireless Networks, Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, *IEEE SECON 2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference, 26-29 September 2005*, 252–62.
- NS-2, 2011, *The Network Simulator – ns-2* [online], http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Main_Page
- Ramachandran K. N. et al.; 2005, On the Design and Implementation of Infrastructure Mesh Networks, *IEEE Wksp. Wireless Mesh Networks*, Sept. 2005.
- Ramachandran K. N., Belding E. M., Almeroth K. C., Buddhikot M. M.; 2006, Interference-Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks, *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications, April 2006 Barcelona*, 1-12.
- Raniwala A., Chiueh T.; 2005, Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network, *INFOCOM 2005 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 13-17 March 2005 New York*, 2223-2234.
- Raniwala A., Chiueh T.; 2004, Evaluation of a Wireless Enterprise Backbone Network Architecture, *High Performance Interconnects, 2004. Proceedings. 12th Annual IEEE Symposium on, 25-27 Aug. 2004 New York*, 98-104.
- Raniwala A., Gopalan K., Chiueh T.; 2004, Centralized Channel Assignment and Routing Algorithms for Multi-channel Wireless Mesh Networks, *ACM Mobile Comp. and Commun. Rev.*, 8(2), 50–65.
- Rayner K.; 2003, Mesh wireless networking, *Communications Engineer*, 1(5), 44-47.
- Royer E.M.; Toh C.; 1999, A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks, *IEEE Personal Communications*, 6(2), 46-55.

- Sichitiu M. L.; 2005, Wireless Mesh Networks: Opportunities And Challenges, *The Tenth Ieee Symposium On Computers And Communications (Iscc 2005) Wireless World Congress, 27-30 June Spain, 2005*.
- Schrick B., Riezenman M.J.; 2002, Wireless broadband in a box, *IEEE Spectrum*, 39(6), 38-43.
- Skalli H., Ghosh S., Das S.K., Lenzini L., Conti M.; 2007, Channel assignment strategies for multiradio wireless mesh networks: issues and solutions, *IEEE Communications*, 45 (11), 86–95.
- So J., Vaidya N.; 2004, Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals using a Single Transceiver, *5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, 2004 New York*, 222-233.
- VISUAL STUDIO, 2010, *Microsoft Visual Studio*[online], [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd831853\(v=vs.100\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd831853(v=vs.100).aspx)
- Waharte S., Ishibashi B., Boutaba R.; 2008, Performance Study of Wireless Mesh Networks Routing Metrics, *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications AICCSA 2008, 31 March-4 April 2008 Doha*, 1100-1106.
- Wei H.Y., Ganguly S., Izmailov R., Haas Z; 2005, Interference-aware ieee 802.16 wimax mesh networks, *IEEE 61st Vehicular Technology Conference VTC 2005, 30 May-1 June 2005*, 3102-3106 .
- Whitehead P.; 2000, Mesh Networks; a new Architecture for Broadband Wireless Access Systems, *IEEE Radio and Wireless Conference, 10-13 September 2000 Denver*, 43-46.
- Yuan Y., Yang H., Wong S., Lu S., Arbaugh W.; 2005, ROMER: Resilient Opportunistic Mesh Routing for Wireless Mesh Networks, *IEEE SECON 2005, 26-29 September 2005 California*.
- Zhang W., Wang Z., Das S. K., Hassan M; 2008, *Security Issues in Wireless Mesh Networks, In Book Wireless Mesh Networks: Architectures and protocols*, Springer, New York, 978-0-387-68839-8.

ÖZGEÇMİŞ

Fotoğraf

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Şafak DURUKAN ODABAŞI
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	1983, Erzurum
Telefon	0212 473 70 00 / 17608
E-mail	sdurukan@istanbul.edu.tr
Web adres	http://ce.istanbul.edu.tr/Kisi.aspx?kisiId=37

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı/ Bilgisayar Mühendisliği Programı	2013
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı/ Bilgisayar Mühendisliği Programı	2008
Lisans	İ.Ü. Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği	2005
Lise	Isparta Şehit Ali İhsan Kalmaz Lisesi	2000

Makaleler / Bildiriler

Ş. DURUKAN ODABAŞI, A. Halim ZAİM, “A Survey on Wireless Mesh Networks, Routing Metrics and Protocols”, IJEMME-International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering Journal, 2011. Ş.DURUKAN ODABAŞI, A. Halim ZAİM, S.TOZAN,“Lifetime Is The Question On Wireless Sensor Networks”, ICNFI 2011 - The First International
--

Conference on Networking and Future Internet, 2011, Paris, FRANCE

- Safak Durukan-Odabasi and Derya Yiltas-Kaplan, "Allocation, Routing, and Assignment Strategies in Wireless Mesh Networks", Proceedings of the Int. Conference on Networking and Future Internet (ICNFI 2012), April 25-27, 2012, Istanbul, Turkey, pp.93-98.
- Safak Durukan-Odabasi and A.Halim Zaim, " Wireless Mesh Sensor Networks: Advantages, Difficulties and Interconnection Methods", Proceedings of the Int. Conference on Networking and Future Internet (ICNFI 2012), April 25-27, 2012, Istanbul, Turkey, pp.93-98.
- G.Z.Gürkaş, Ş.Durukan, A.H.Zaim, A.Demir, M.A.Aydın, "802.11b Kablosuz Ağlarda Güvenliğin Ağ Trafiki Üzerindeki Etkilerinin Analizi", Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi (MBGAK'2005) II. , 17-19 Kasım 2005, İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü, İstanbul, Türkiye (Sayfa 8-15).
- M.A.Aydın, Ö.Tanrıverdi, A.H.Zaim, Ş.Durukan, G. Z.Gürkaş, "Kablosuz Ağlarda Yönlendiriciler ve Yönlendirici Hafızasının Analizi", Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi (MBGAK'2005) II. , 17-19 Kasım 2005, İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü, İstanbul, Türkiye (Sayfa 1-7).
- M. Erkan YÜKSEL, Şafak DURUKAN ODABAŞI, "Nesneler İzlenebilir ve Yönetilebilir mi? Çözüm: *RFID*", Akademik Bilişim (AB09), 2009, Şanlıurfa, Türkiye
- Ş. DURUKAN ODABAŞI, A. Halim ZAİM, "Yeni Nesil Kablosuz Heterojen Ağlar ve Yönlendirme Algoritmaları" Akademik Bilişim (AB09), 2009, Şanlıurfa, Türkiye
- Ş.DURUKAN ODABAŞI, S.TOZAN, "Kablosuz Sensör Ağlar ve Kablosuz Sensör Ağlarda Enerji Tüketimi ", Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, 2009, Ankara, Türkiye
- M. Erkan YÜKSEL, Şafak DURUKAN ODABAŞI, "SMTP Protokolü ve Spam Mail Problemi", Akademik Bilişim (AB10), 2010, Muğla, Türkiye
- Ş.DURUKAN ODABAŞI, S.TOZAN "Kablosuz Algılayıcı Ağlar ve Güç Tüketiminin İncelenmesi", Akademik Bilişim (AB10), 2010, Muğla, Türkiye
- Ş.DURUKAN ODABAŞI, "Kablosuz Mesh Ağlar, Yönlendirme Metrikleri ve Protokolleri", Akademik Bilişim (AB11), 2011, Malatya, Türkiye