

**TELSİZ DUYARGA AĞLARDA ENERJİ FARKINDALIKLI
YÖNLENDİRME MİMARİSİ TASARIMI
VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Yük. Müh. Aytuğ BOYACI

Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fikret ATA

İkinci Danışman: Doç. Dr. Hasan Hüseyin BALIK

ŞUBAT-2012

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TELSİZ DUYARGA AĞLARDA ENERJİ FARKINDALIKLI YÖNLENDİRME
MİMARİSİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Aytuğ BOYACI

(07213202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Ocak 2012
Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Şubat 2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Fikret ATA (F.Ü.)
İkinci Danışman : Doç. Dr. Hasan Hüseyin BALIK (A.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mustafa POYRAZ (F.Ü.)
Doç. Dr. Beşir DANDİL (F.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Erdem UÇAR (T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Ayhan AKBAL (F.Ü.)

ŞUBAT-2012

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca değerli yardım ve katkıları ile beni yönlendiren danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Fikret ATA'ya, tezin ortaya çıkması için değerli zamanını hiç çekinmeden harcayan, ayrıca lisans, yüksek lisans ve doktora süreçlerinde sabırla engin birikimlerini benimle paylaşarak akademik hayatıma yön veren Sayın Doç. Dr. Hasan Hüseyin BALIK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması ile ilgili deneysel sonuçların elde edilmesi aşamasında laboratuvar olanaklarını bizimle paylaşan Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümüne şükranlarımı sunarım.

Doktora eğitimine beraber başladığımız ve tüm süreçlerinde birlikte çalışma imkanı bulduğum, ayrıca tez çalışmamda desteğini esirgemeyen Erhan AKBAL'a, yine çalışmanın uygulama aşamalarındaki katkılarından dolayı Oğuz ATA'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni her konuda destekleyen, eğitim sürecinde manevi destekleri ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme, çalışma temposu içinde ihmal ettiğim arkadaşlarıma, üzerimde hakkı olan ve çalışmalarımda emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.

Aytuğ BOYACI

Elazığ – 2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XII
KISALTMALAR	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür İncelemesi	1
1.2. Tezin Amacı.....	3
1.3. Tezin Yapısı.....	4
2. KABLOSUZ İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİ	6
2.1. Giriş	6
2.2. Kablosuz Ağ Kavramı	6
2.3. Kullanılan Frekans Aralıkları	8
2.3.1. Kızılötesi (IR)	9
2.3.2. Radyo Frekansı (RF).....	9
2.4. Kablosuz Ağ Sınıfları	11
2.4.1. Kablosuz Kişisel Alan Ağları (WPAN).....	12
2.4.2. Kablosuz Yerel Alan Ağları (WLAN).....	12
2.4.3. Kablosuz Metropolitan Alan Ağları (WMAN).....	13
2.4.4. Kablosuz Geniş Alan Ağları (WWAN)	13
2.5. Kablosuz Ağ Teknolojileri.....	14
2.5.1. Bluetooth.....	15
2.5.2. HomeRF.....	16
2.5.3. IrDA	17
2.5.4. UWB	17
2.5.5. ZigBee.....	18
2.5.6. Wi-Fi.....	20
2.5.7. HiperLAN	22

2.5.8. HiperMAN	23
2.5.9. WiMAX	24
2.5.10. GSM.....	25
2.5.11. UMTS (3G).....	26
2.5.12. 4G.....	26
3. TELSİZ DUYARGA AĞLAR	28
3.1. Giriş	28
3.2. Telsiz Duyarga Ağ Kavramı	28
3.3. Duyarga Ağların Karakteristik Özellikleri	31
3.4. Duyarga Tipleri.....	33
3.5. Duyarga Mimarisi	33
3.5.1. İşlemci.....	34
3.5.2. Bellek / Depolama Ünitesi	35
3.5.3. Duyarga.....	36
3.5.4. Alıcı / Verici	38
3.5.5. Güç Kaynağı	39
3.6. Telsiz Duyarga Ağ Tasarım Kısıtları.....	40
3.6.1. Güç Tüketimi	41
3.6.2. Genişleyebilirlik.....	42
3.6.3. Hata Toleransı.....	42
3.6.4. Ölçeklenebilirlik	43
3.6.5. Üretim Maliyeti.....	44
3.6.6. Donanım Kısıtları	44
3.6.7. Örnekleme Oranı ve Veri Hızı.....	44
3.6.8. Gerçek Zaman Senkronizasyonu	44
3.6.9. Ortam Şartları	45
3.6.10. Giyilebilir veya Taşınabilirlik.....	45
3.6.11. Güvenlik.....	45
3.6.12. Ağı Oluşturan Düğümlerin Hareket Edebilirliği	46
3.6.13. Çoklu Gönderim	46
3.7. Telsiz Duyarga Ağların Kullanım Alanları	46
3.7.1. Askeri Uygulamalar	47
3.7.2. Çevre Algılama ve İzleme Uygulamaları	47

3.7.3. Felaketten Korunma ve İzleme	48
3.7.4. Akıllı Ev Uygulamaları.....	48
3.7.5. Akıllı Alanlar	48
3.7.6. Ticari Uygulamalar	48
3.7.7. Trafik Kontrolü Uygulamaları	49
3.7.8. Nezaret – Gözetim Uygulamaları	49
3.7.9. Tıbbi Uygulamalar	49
3.8. Duyarga Ağların Mimari Yapısı	52
4. TELSİZ DUYARGA AĞLARDA ENERJİ FARKINDALIKLI	
YÖNLENDİRME ÇALIŞMALARI	56
4.1. Giriş	56
4.2. Telsiz Duyarga Ağlarda Enerji Farkındalıklı Yönlendirme Gereksinimi.....	56
4.2.1. İletim.....	57
4.2.2. Yönlendirme	58
4.2.3. Çarpışma	58
4.2.4. Dinleme.....	59
4.2.5. Hata Oranı.....	60
4.2.6. Zayıf Düğüm.....	60
4.2.7. Yük Paylaşımı.....	61
4.3. Etkili Yönlendirme	62
4.4. TDA’lar için Gerçekleştirilen Yönlendirme Çalışmaları.....	62
4.4.1. Düz Ağ Tabanlı Yönlendirme Protokolleri	63
4.4.2. Hiyerarşik Ağ Tabanlı Yönlendirme Protokolleri	68
4.4.3. Konum Tabanlı Yönlendirme Protokolleri	72
4.4.4. Protokol İşlenmesi Tabanlı Yönlendirme	73
4.5. TDA’lar için Gerçekleştirilen Yönlendirme Çalışmalarının Enerji Açısından Karşılaştırılması	77
5. TELSİZ DUYARGA AĞ MİMARİSİ İÇİN UYGULAMA ORTAMLARI	79
5.1. Giriş	79
5.2. Benzetim Platformları.....	80
5.2.1. Castalia Benzetim Platformu	83
5.3. DeneySEL Platform.....	88
5.3.1. Deney Donanımlarının Tanıtılması	89

5.3.2. Kullanılan Deney Düzeneği	90
6. TELSİZ DUYARGA AĞLARDA ENERJİ FARKINDALIKLI YÖNLENDİRME MİMARİSİ TASARIMI ve GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	92
6.1. Giriş	92
6.2. Tasarlanan Mimarinin Genel Yapısı	92
6.2.1. Tanımlamalar ve Kısaltmalar	95
6.2.2. Gerekli Kabuller	95
6.2.3. Genel Mesaj Paketi Yapısı	96
6.3. Sistem Mimarisindeki Modüllerin Yapısı	98
6.3.1. Ağ Başlangıç Parametreleri (ABP) Modülü	99
6.3.2. Topoloji Oluşturma Fazı (TOF) Modülü	99
6.3.3. Yol Belirleme ve Güncelleme Fazı (YBGF) Modülü	111
6.3.4. Veri İletim Fazı (VIF) Modülü	120
6.3.5. Ağ Yönetim Fazı (AYF) Modülü	131
7. UYGULAMALAR	134
7.1. Giriş	134
7.2. Veri Gönderim Sıklığının Harcanan Enerji Üzerine Etkisi	135
7.3. Sıçrama Sayısının Harcanan Enerjiye Etkisi	138
7.4. Deneysel Ortam ile Benzetim Ortamının Karşılaştırılması	142
7.5. Duyarga Düğüm Sayısının Tasarlanan Enerji Farkındalıklı Mimari Üzerine Etkisi	143
8. GENEL DEĞERLENDİRME	145
KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ	161

ÖZET

Yeni teknolojik gelişmelerin ışığında, bir ağ üzerinde büyük ölçekli bilgileri toplamak ve işbirliği yöntemleri ile hedefe ulaştırmak için küçük boyutlarda, çok sayıda algılama ve iletişim yeteneğini içinde barındıran, programlanabilen duyarga elemanları tasarlanabilmektedir. Çok sayıda duyarga düğümünün bir araya gelerek farklı konumlardaki sıcaklık, ses, basınç, hareket, kirlilik vb. gibi fiziksel veya çevresel koşulları işbirliği ile uzak bir noktadan izlemek için oluşturduğu ağ, telsiz duyarga ağ olarak bilinmektedir.

Telsiz duyarga ağların geniş uygulama alanları olmasına rağmen sınırlı enerji kaynakları, ağ içinde kullanılan duyarga düğümlerin sınırlı hesaplama ve sınırlı haberleşme yeteneklerinin olması, yapılan uygulamalara birçok kısıt getirmektedir. Kaynakların sınırlı olması doğrudan telsiz duyarga ağın yaşam ömrünü etkilemektedir. Bu nedenle telsiz duyarga ağların enerjisini verimli kullanacak çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Bu doktora çalışmasında telsiz duyarga ağlar için enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi önerilmiştir. Önerilen yönlendirme mimarisi telsiz duyarga ağlarda bir kaynak düğümden bir hedef düğüme veri iletimi için gerekli olan mekanizmaları oluşturmaktadır. Mimari yapıda öncelikle kaynak düğüm ile hedef düğüm arasındaki duyarga düğümler ile oluşturulacak tüm olası yolların keşfi gerçekleştirilmektedir. Bir sonraki aşamada ise bulunan yollar içinden telsiz duyarga ağ için ağ yaşam ömrü açısından en etkin yolun seçilmesi ve seçilen yol üzerinden kaynak düğüm ile hedef düğüm arasında iletişimin kurulması sağlanmaktadır. Önerilen yönlendirme mimarisinde belirlenen yol ve diğer yolların etkinliğini izlenerek etkinliğini yitiren yol yerine yeni yol üzerinden kaynak düğüm ile hedef düğüm arasındaki iletişimin sürdürülebilirliği gerçekleştirilmektedir. Sistem içerisindeki her bir mekanizma enerji tüketimini azaltmak, başarılı paket başına enerjiyi makul seviyelerde tutmak ve ağ yaşam ömrünü uzatmak için birer görev üstlenmektedir.

Sonuç olarak doktora tez çalışmasında önerilen telsiz duyarga ağlarda enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi hem benzetim hem de laboratuvar ortamında test edilmiş, geliştirilen mimari ve mimari yapının içindeki tüm mekanizmaların başarısı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Telsiz duyarga ağlar, ağ yaşam ömrü, enerji farkındalığı, yönlendirme mimarisi

SUMMARY

Design and Implementation of Energy-Aware Routing Architecture for Wireless Sensor Networks

In the lights of recent technological developments, compact programmable sensor devices having a wide range of sensing and communication capacity can be designed for obtaining large scale of information on a network and transmitting it to the destination through cooperation methods. The network, which is formed for monitoring the physical and environmental conditions such as temperature, noise, pressure, motion, pollution etc. in different locations, is known as wireless sensor network.

Although wireless sensor networks have a wide range of application, the facts that they have limited energy supply, sensor nodes used in the network have limited calculation and communication capacity bring several limitations to the applications. Having limited energy supply directly affects the lifetime of wireless sensor networks. Therefore, the studies on efficient use of wireless sensor networks are highly important.

In this study, energy aware routing architecture is suggested for wireless sensor networks. Suggested routing architecture consists of the mechanism required for data transmitting from one source node to the destination node on the wireless sensor networks. In the architectural structure, all potential routes formed by the sensor nodes between the source node and destination node are discovered at first. In the next stage, the most efficient route for the wireless sensor networks is selected in terms of network lifetime and the communication between the source node and target node is established. In the suggested routing architecture, the sustainability of the communication between the source node and the destination node is provided on a new route instead of the one that has lost its efficiency through monitoring the efficiency of the selected route and other routes. Each mechanism in the system has a task for reducing the energy consumption, keeping the energy per successful packet in appropriate levels and extending the network lifetime.

In conclusion, energy aware routing architecture in wireless sensor networks suggested in this thesis, is tested both in laboratory and in simulation as well, as a result the success of the developed architecture and all the mechanisms in its structure is verified.

Keywords: Wireless sensor network, life time of network, energy awareness, routing architecture

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Kablosuz iletişim teknolojileri ile ilgili ele alınan konular	6
Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum	8
Şekil 2.3. ISM frekans bandı	10
Şekil 2.4. Büyüklüklerine göre kablosuz ağ sınıfları ve kullanılan standartlar [56]	11
Şekil 2.5. Kablosuz ağ teknolojileri [56]	14
Şekil 2.6. Piconet ve Scatternet oluşumu	16
Şekil 2.7. ZigBee ağ topolojileri	20
Şekil 2.8. Bir cep telefonu şebekesinde hücreler ve kablosuz alıcı cihazının ilişkisi [6]	26
.....	
Şekil 3.1. TDA'lar ile ilgili konular	28
Şekil 3.2. Duyarga ağ mimarisi	32
Şekil 3.3. Bir duyarga düğümünün yapısal bileşenleri [1]	34
Şekil 3.4. İşlemci	34
Şekil 3.5. Flaş bellek mimarisi	36
Şekil 3.6. Duyarga düğümü	36
Şekil 3.7. RF ön birim blok şeması	38
Şekil 3.8. Güç kaynağı modülü	39
Şekil 3.9. Bir TDA'nın topolojik yapısı	53
Şekil 3.10. Bir TDA'nın mimari yapısı [126]	53
Şekil 3.11. Algılayıcı ağ katmanları üzerinde kullanılan protokoller [126]	54
Şekil 4.1. TDA'larda enerji farkındalıklı yönlendirme çalışmaları ile ilgili konular	56
Şekil 4.2. Enerji mesafe ilişkisi	57
Şekil 4.3. Yönlendirme	58
Şekil 4.4. Çarpışma	59
Şekil 4.5. Hata oranı	60
Şekil 4.6. Zayıf düğüm	61
Şekil 4.7. Yük paylaşımı	62
Şekil 4.8. TDA yönlendirme teknikleri	63
Şekil 4.9. Doğrudan yayılma protokolü yönlendirme yapısı	65
Şekil 4.10. Hiyerarşik yönlendirme	69
Şekil 4.11. LBR protokollerinin yapısı	73

Şekil 4.12. Protokol işlenmesi tabanlı yönlendirme yöntemleri.....	74
Şekil 4.13. MPR yapısı	75
Şekil 5.1. TDA mimarisi gerçekleştirme platformları	79
Şekil 5.2. Castalia modül yapısı	84
Şekil 5.3. Castalia birleşik düğüm modülü iç yapısı	85
Şekil 5.4. Castalia'da benzetim modelinin derlenmesi	87
Şekil 5.5. Node klasörü içeriği	88
Şekil 5.6. Deney seti içeriği	89
Şekil 5.7. Kullanılan düğümler a) Duyarga düğüm b) Hedef ve kaynak düğüm	90
Şekil 5.8. Kullanılan deney düzeneği	91
Şekil 6.1. Enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi süreçleri	92
Şekil 6.2. TDA yapısı	93
Şekil 6.3. Sistemin genel mimari yapısı	94
Şekil 6.4. Genel mesaj paketi yapısı.....	96
Şekil 6.5. ATYP mesajı örnek topoloji.....	100
Şekil 6.6. Ağ tanıma yayın süreci – KD yayını	101
Şekil 6.7. Ağ tanıma yayın süreci – 1, 2, 3 numaralı düğümler	102
Şekil 6.8. Ağ tanıma yayın süreci – 4, 5, 6 numaralı düğümler	103
Şekil 6.9. Ağ tanıma yayın süreci – 7, 8 numaralı düğümler	104
Şekil 6.10. Ağ tanıma yayın süreci – yol bilgilerinin HD'de tanımlanması	104
Şekil 6.11. ATYP mesaj yapısı.....	105
Şekil 6.12. KID süreçleri	106
Şekil 6.13. Örnek ağ topolojisi	109
Şekil 6.14. BY alanının güncellenmesi	109
Şekil 6.15. TOF modülü için DD'lerin davranışı.....	110
Şekil 6.16. YBGF modülünün genel yapısı.....	113
Şekil 6.17. Örnek ağ yapısı.....	114
Şekil 6.18. EYG bloğu ile YBT'nin güncellenmesi.....	118
Şekil 6.19. VIF modülünün genel yapısı	121
Şekil 6.20. VYT bloğu anlaşma yapısı	123
Şekil 6.21. İstek mesajı yapısı	124
Şekil 6.22. DD yönlendirme tablosu	124
Şekil 6.23. İstek mesajı süreçleri	125

Şekil 6.24. Cevap ve Onay mesajı yapısı	126
Şekil 6.25. Veri paketi yapısı.....	127
Şekil 6.26. VIS mesaj paket yapısı	129
Şekil 6.27. VIS bloğu anlaşma yapısı.....	130
Şekil 6.28. AYF süreçleri	132
Şekil 7.1. Gerçekleştirilen uygulamalar	134
Şekil 7.2. Farklı gönderim sıklığına göre düğümlerde harcanan toplam enerji	137
Şekil 7.3. Sıçrama sayılarına göre duyargalarda harcanan enerji (joule)	142
Şekil 7.4. Değişik duyarga sayılarına göre sistemde harcanan enerji (joule).....	144
Şekil 7.5. Değişik duyarga sayılarına göre duyarga başına harcanan enerji (joule)....	144

TABLÖLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Kablosuz iletişim teknolojilerinin sınıflandırılması	11
Tablo 2.2. Bluetooth'un genel teknik özellikleri	15
Tablo 2.3. HomeRF'in genel teknik özellikleri [38]	17
Tablo 2.4. ZigBee teknolojisinin karşılaştırmalı özellikleri.....	19
Tablo 2.5. Bir ZigBee Mantıksal Bileşenleri [6].....	19
Tablo 2.6. Bir ZigBee ağı fiziksel bileşenleri [6].....	19
Tablo 2.7. IEEE 802.11 a/b/g/n standartları ve genel özellikleri [38], [42], [72]	21
Tablo 2.8. Hiperlan2 ile 802.11a standardının karşılaştırması [38]	23
Tablo 2.9. Wi-MAX standartları [78]	25
Tablo 4.1. Yönlendirme tekniklerinin sınıflandırılması ve karşılaştırılması	78
Tablo 5.1. TDA uygulamalarında kullanılan benzetim platformlarının karşılaştırması [26]	81
Tablo 6.1. Sistem mimari yapısı için tanımlamalar	95
Tablo 6.2. MT tanımları	98
Tablo 6.3. Ağ başlangıç parametrelerinin tanımlanması	99
Tablo 6.4. Örnek yol belirleme tablosu (YBT)	114
Tablo 6.5. YKO alanına göre sıralanmış YBT.....	116
Tablo 7.1. Farklı gönderim sıklıklarına göre düğüm parametreleri	135
Tablo 7.2. Farklı veri gönderim sıklığına göre toplam harcanan enerji ve başarı oranı	137
Tablo 7.3. Değişik sıçrama sayılarına göre benzetim sonuçları.....	138
Tablo 7.4. 10 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri.....	139
Tablo 7.5. 20 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri.....	139
Tablo 7.6. 30 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri.....	140
Tablo 7.7. 50 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri.....	140
Tablo 7.8. Karşılaştırma tablosu	142
Tablo 7.9. Değişik duyurga sayılarına göre sistem parametreleri	143

SEMBOLLER LİSTESİ

$\mu(R)$	: Bir duyarga düğümünün iletim yarıçapı içerisinde bulunan diğer duyarga düğümlerinin sayısı
A	: İletim bölgesi
d	: Paketin gönderileceği DD ile olan mesafe
DD_s	: Yol üzerindeki toplam düğüm sayısı
E_{DD}	: Bir DD'nin başlangıç enerjisi
E_{Rx}	: Alım esnasında DD'nin harcadığı enerji miktarı
$E_{Rx-elec}$	: Alıcının harcadığı enerji miktarı
E_{Tx}	: İletim esnasında DD'nin harcadığı enerji miktarı
$E_{Tx-elec}$	: Vericinin harcadığı enerji miktarı
k	: Bit cinsinden paket boyutu
N	: Bir bölge içerisinde dağıtık duyarga düğümlerinin sayısı
N_R	: Birim zamandaki veri alım sayısı
N_T	: Birim zamandaki veri iletim sayısı
P_C	: Güç tüketimi
P_{out}	: Vericinin çıkış gücü
P_R	: Alım gücü
P_T	: İletim gücü
R	: İletimin yapılacağı sinyal aralığını
R_k	: Duyarga düğüm hata toleransı
t	: Zaman periyodu
T/R_{on}	: İletim zamanı
T/R_{st}	: İletim öncesi başlangıç zamanı
λ_k	: K duyarga düğümündeki hata oranı

KISALTMALAR

3G	: 3rd Generation
4G	: 4rd Generation
ABP	: Ağ Başlangıç Parametreleri
ACQUIRE	: Active Query Forwarding İn Sensor Networks
ADSID	: Air Delivered Seismic Intrusion Detector
AID	: Alıcı ID'si
APTEEN	: Adaptive Periodic Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol
ATYP	: Ağ Tanıma Yayın Paketi
AY	: Aktif Yol
AYF	: Ağ Yönetim Fazı
BR	: Basic Rate
BWRC	: Berkley Wireless Research Center
BY	: Bulunan Yol
CADR	: Constrained Anisotropic Diffusion Routing
CBR	: Coherent Based Routing
CDMA	: Code Division Multiple Access
CENS	: Center Of Embedded Networked Sensing
CSMA/CA	: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance
DD	: Duyarga Düğüm
DIR	: Compass Routing Method
DPM	: Dynamic Power Management
DSSS	: Direct Sequence Spread Sperctrum
DS-UWB	: Direct Sequence Ultra Wideband Systems
DVS	: Dynamic Voltage Scaling
DY	: Doğrudan Yayılma
EAR	: Energy Aware Routing
EDR	: Enhanced Data Rate
ETSI	: European Telecommunications Standards Institute
EYB	: Etkin Yol Belirleme
EYG	: Etkin Yol Güncelleme
FDD	: Frequency Division Duplex
FHSS	: Frequency Hopping Spread Spectrum
FIR	: Fast Infrared
FNR	: Flat Networks Routing
FPGA	: Field Programmable Gate Array
GAF	: Geographic Adaptive Fidelity
GBR	: Gradient Based Rouring
GEAR	: Geographical And Energy Aware Routing
GEDIR	: The Geographic Distance Routing
GFSK	: Gaussian Frequency Shift Keying
GID	: Gönderen ID'si
GOAFR	: The Greedy Other Adaptive Face Routing
GPRS	: General Packet Radio Service
GPS	: Global Positioning System
GSM	: Global System For Mobile
HD	: Hedef Düğüm

HE	: Harcanan Enerji
HID	: Hedef ID
HiperLAN	: High Performance Radio Lan
HiperMAN	: High Performance Metropolitan Area Networks
HNR	: Hierarchical Networks Routing
HomeRF	: Home Radio Frequency
HomeRF WG	: Home Radio Frequency Working Group
ID	: Identification Number
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IR	: Kızılötesi
IrDA	: Infrared Data Association
KD	: Kaynak Düğüm
KID	: Kaynak ID
LBR	: Location Based Routing
LD	: Lider Düğüm
LEACH	: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LTE	: Long Term Evolution
MAC	: Media Access Control
MCFA	: Minimum Cost Forwarding Algorithm
MECN	: Minimum Energy Communication Network
MFR	: Most Forward Within Radius
MMAC	: Multimedia Mobile Acces Communication System
MPR	: Multi-Path Based Routing
MT	: Mesaj Tipi
NBR	: Negotiation Based Routing
NED	: Network Description Language
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OMNET++	: Objective Modular Network Tested In C++
OOK	: On/Off Keying
PAM	: Pluggable Authentication Module
PC	: Kişisel Bilgisayar
PDA	: Kişisel Sayısal Yardımcı
PEGASIS	: Power-Efficient Gathering In Sensor Information Systems
PO	: Protocol Operation Based Routing
POCSAG	: Post Office Code Standardization Avisory
PSK	: Phase Shift Keying
QBR	: Query Based Routing
QoSBR	: Qos Based Routing
Rc	: Toplam Alınan Başarılı Paket
RF	: Radio Frequency
RR	: Rumor Routing
SAR	: Sequential Assignment Routing
SIR	: Serial Infrared
SMS	: Short Message Service
SPIN	: Sensor Protocols For Information Via Negotiation
SS	: Sıçrama Sayısı
SSİ	: Sayısal Sinyal İşlemciler
SWAP	: Shared Wireless Application Protocol
TDA	: Telsiz Duyarga Ağlar

TDD	: Time Division Duplex
TDMA	: Time Division Multiple Access
TEEN	: Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol
TOF	: Topoloji Oluşturma Fazı
Tx	: Toplam Gönderilen Paket
TYE	: Toplam Yol Enerjisi
UFIR	: Ultra Fast Infrared
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System
UMTS	: The Universal Mobile Telecommunications System
USB	: Universal Serial Bus
UWB	: Ultra Wide Band
VFIR	: Very Fast Infrared
VGA	: Virtual Grid Architecture Routing
VIBS	: Veri İletiminin Başlaması Ve Srdrlmesi
VIF	: Veri İletim Fazı
VIS	: Veri İletişimi Sonlandırma
VYT	: Veri Yolu Tanıma
WAP	: Wireless Application Protocol
WEP	: Wired Equivalent Privacy
WINS	: Wireless Integrated Network Sensors
WiBro	: Wireless Broadband
Wi-Fi	: Wireless Fidelity
WiMAX	: Worldwide Interoperability For Microwave Access
WLAN	: Wireless Local Area Networks
WMAN	: Wireless Metropolitan Area Networks
WPA	: Wi-Fi Protected Access
WPAN	: Wireless Personal Area Networks
WSN	: Wireless Sensor Network
WWAN	: Wireless Wide Area Networks
WWW	: World Wide Web
YBGF	: Yol Belirleme Ve Güncelleme Fazı
YBT	: Yol Belirleme Tablosu
YHE	: Yolda Harcanan Enerji
YID	: Yol ID’si
YKO	: Yol Kullanım mr

1. GİRİŞ

1.1. Literatür İncelemesi

Son yıllarda kablosuz teknolojideki gelişmeler ile birlikte mikroçip teknolojisindeki gelişmeler sayesinde çok küçük boyutlu, düşük enerji tüketebilen, düşük maliyetli ve bir duyarga ile bütünleştirilmiş, tümleşik devre tasarımının mümkün hale gelmesine paralel olarak Telsiz Duyarga Ağ (TDA) konusunda yapılan çalışmalarda yoğunlaşmıştır. TDA yapısı içinde bulunan duyarga düğümler algılama, veri işleme ve iletişim yetenekleri sayesinde farklı konumlardaki sıcaklık, ışık, ses, basınç, hareket gibi fiziksel veya çevresel koşulları algılayabilmekte, algılanan veriler üzerinde çeşitli hesaplamalar yapabilmekte ve işbirliği teknikleri ile algılanan veriyi iletebilmektedir [1-5]. TDA'yı belirli bir alandaki fiziksel veya çevresel koşulları izlemek için alan içine dağıtılmış çok sayıda duyarga düğümünden oluşan bir ağ olarak tanımlamak mümkündür [1], [6]. Teknolojideki hızlı gelişimin ışığında TDA'lar düşük maliyet, veri işleme ve kablosuz iletişim yapabilme gibi avantajlarından dolayı askeri güvenlik bölgeleri [7-10], doğal yaşam alanları [11], tıbbi alanlar [12-17], ev [18], ve işyerleri [11], gibi birçok alanda uygulama alanı bulmuştur.

TDA'ların geniş uygulama alanları olmasına rağmen sınırlı enerji kaynaklarına sahip olmaları, ağ içinde kullanılan duyarga düğümlerin sınırlı hesaplama ve sınırlı haberleşme yeteneklerinin olması, yapılan uygulamalara birçok kısıt getirmektedir. Kaynakların sınırlı olması doğrudan TDA'nın yaşam süresini etkilemektedir. Bu yüzden TDA'ların enerjilerini verimli kullanacak çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Enerjinin daha etkin kullanımına yönelik olarak araştırmacılar donanımların enerji kapasitelerini arttırma [19], verinin işlenmesi [5], [20] ve gönderilecek bilginin minimum maliyetli hale getirilmesi [21], verinin iletilmesi aşamasındaki yönlendirme teknikleri [22] ile verinin en az yönlendirme maliyeti ile hedefe ulaştırılması [23], [24] konuları üzerine odaklanmıştır. Özellikle son yıllarda enerjinin etkin kullanılabilmesi için veri toplama, işleme ve algılama faaliyetlerinin koordinasyonunun sağlanması ve duyarga düğümler arasında işbirliğinin kontrolü konusunda birçok araştırma yapılmıştır [25-27]. Bu koordinasyonun sağlanmasında hedef ile kaynak arasında iletişim esnasında kullanılacak yolların keşfi, bu yollar içinden enerji açısından en verimli yol üzerinden iletişimin gerçekleştirilmesi, algılanan verinin hedef düğüme gönderilirken en az enerji harcayacak şekilde gönderilmesi

son derece önemlidir. TDA'yı oluşturan duyarga düğümlerinin küçük enerji kaynakları ile uzun süreler çalışmasının sağlanabilmesi için hesaplama işlemlerinin ve verinin kaynaktan hedefe ulaştırılması için gerekli olan yönlendirme tekniklerinin optimum şekilde kullanılması ağ yaşam ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bu da ancak etkili yönlendirme tekniklerinin geliştirilmesi ile mümkün olabilmektedir.

TDA'larda kaynak düğümde algılanan verinin hedef düğüme iletilmesi için alan içindeki duyarga düğümlerden yararlanılmakta ve düğümler işbirliği teknikleri ile veriyi kaynak düğümden hedef düğüme iletilebilmektedir [19], [28]. TDA'nın yapısı itibari ile yönlendirme işlemi diğer kablosuz ağlara göre oldukça zordur. Bunun sebebi [6], [22], [29-32];

- TDA'ların çok sayıda duyarga düğümden oluşan bir ağ yapısı olması, ağ içindeki duyarga düğümlerin dağınık olması ve bu düğümler ile ilgili topolojinin önceden bilinmemesi duyarga düğümler için küresel bir adresleme düzeni inşa etmeyi olanaksız kılmaktadır.
- TDA ağlarında kullanılan duyarga düğümleri enerjileri tükendiğinde veya arızalandığında ağ topolojisi tamamen değişmekte bununla beraber verinin iletileceği yol bilgileri de değişmektedir.
- TDA'larda tipik iletişim ağlarının aksine birden fazla kaynaktan hedefe doğru iletişim veya bir kaynaktan hedefe çoklu yollar üzerinden verinin gönderilmesi söz konusu olabilmektedir.
- TDA'larda kullanılan duyarga düğümlerinin, veri işleme ve depolama kapasitelerinin kısıtlı oluşu verinin iletimi için kullanılacak yönlendirme sürecini zorlaştırmaktadır.
- Uygulamanın türüne göre TDA'ların tasarım gereksinimleri değişiklik göstermektedir. Örneğin düşük gecikmeli bir taktik gözetim gereksinimi olan bir uygulama ile belirli periyotlarda algılanacak olan bir verinin hedefe gönderilmesini amaçlayan bir uygulamanın tasarımsal gereksinimleri birbirinden farklı olacaktır.
- TDA'larda kaynaktan hedefe veri iletimi için kullanılan duyarga düğümler konumlarını ve yön tayinlerini yapabilmesi gerekmektedir. Bu işlemi yaparken de kısıtlı enerji kaynaklarından dolayı küresel konumlandırma sistemlerini kullanmaları oldukça maliyetli olduğundan tercih edilmemektedir.

Bu yüzden TDA'larda geleneksel IP tabanlı protokollerin kullanılması yerine kendine özgü yönlendirme süreçlerinin tasarlanması gerekmektedir.

Bu farklılıklar nedeni ile TDA’larda ki yönlendirme sorunlarının çözümü için araştırmacılar tarafından yeni algoritmalar ve mimariler öne sürülmüştür. Bu yönlendirme mekanizmaları oluşturulurken uygulama ve mimari gereksinimleri ile birlikte TDA’nın yapısının da dikkate alınması dolayısı ile dikkatli kaynak yönetimi gerekmektedir.

1.2. Tezin Amacı

TDA’lar üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde ağ içinde kullanılan duyarga düğümlerin enerjilerinin kısıtlı olması sebebi ile etkin yönlendirme teknikleri üzerine çalışmaların yoğunlaştığı görülmüştür. Bu tez çalışmasının amacı TDA kaynaklarının etkin bir şekilde yönetimini sağlayarak ağın toplam yaşam ömrünü verimli kullanmaya yönelik bir yönlendirme mimarisi tasarlamaktır. Bu amaçla tez çalışmasında yönlendirme mimarisi tasarlanırken en önemli kriter olarak enerji yönetimi seçilmiştir.

TDA’lar üzerinde yapılan enerji farkındalıklı yönlendirme çalışmaları incelendiğinde yapılan çalışmalarda yönlendirme süreçlerinin duyarga düğümlerin üzerindeki karar mekanizmaları ile ya da kaynak düğüm üzerinde ki karar mekanizmaları ile kontrol edildiği görülmektedir [20], [33], [34]. TDA üzerindeki yönlendirme süreçlerinin duyarga veya kaynak düğümler üzerinden yönetimi özellikle işlem yüklerinden dolayı kısıtlı enerji kaynağı olan düğümlerin enerjilerinin etkin kullanılamamasına neden olmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında ağ yönetim ve karar süreçlerinin hedef düğüm üzerinden gerçekleştirilmesi ile ağ içinde kısıtlı kaynakları olan duyarga düğümlerin yönlendirme esnasında minimum işlem yapması hedeflenmiştir.

Çalışmada amaçlanan faydaların ışığında yönlendirme süreçlerinin tümünü kontrol edebilecek bir yönlendirme mimarisi önerilmiştir. Önerilen mimari ile, TDA topolojisinin keşfi, keşfedilen topoloji üzerinden kaynak ile hedef düğüm arasındaki etkin yolların bulunması, en etkin yol üzerinden veri iletiminin gerçekleştirilmesi, yol etkinliğinin kontrolü ve yol etkinliği değiştiğinde daha etkin bir yol üzerinden veri iletiminin sürdürülebilirliğinin sağlanması, ağ içinde oluşabilecek hatalara karşı çözümlerin sağlanması, kaynak ile hedef düğüm arasındaki iletişim sürecinde enerji harcamalarını dolayısı ile ağ yaşam ömrünün izlenmesi süreçlerinin yönetilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca önerilen yönlendirme mimarisinde kaynak ile hedef düğüm arasındaki veri iletim sürecinde gönderilecek olan paket yapısının küçültülerek enerji harcamalarını düşürmek, ayrıca bu süreçte kullanılan duyarga düğümlerin işlem yüklerini ve karar süreçlerini minimum seviyeye düşürmek amaçlanmıştır. Bu sayede veri iletim sürecinde kaynak ile hedef düğüm

arasında kullanılacak duyurga düğümlerinin sadece verinin iletilmesi ile ilgilenmesi sağlanarak enerji farkındalıklı bir yönlendirme yapılmış olacaktır.

1.3. Tezin Yapısı

Bu doktora çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Tezin ilk bölümü giriş bölümüdür. Bu bölümde tezin literatürdeki yeri, amacı ve ileriki bölümlerde açıklanacak olan konular neler olduğundan bahsedilmektedir.

Tezin ikinci bölümünde, kablosuz iletişim teknolojileri kavramları üzerinde durulacak, kablosuz ağlar sınıflandırılacak ve kablosuz ağlar için geliştirilen teknolojiler açıklanacaktır.

Tezin üçüncü bölümünde, telsiz duyurga ağ konusu ele alınacaktır. Bu bölümde telsiz duyurga ağ kavramı ve karakteristik özelliklerine değinilecek, duyurga tipleri ve mimarisi açıklandıktan sonra telsiz duyurga ağların tasarım kısıtları, kullanım alanları ve mimari yapısı üzerinde durulacaktır.

Tezin dördüncü bölümünde, literatürde yapılan telsiz duyurga ağlarda enerji farkındalıklı yönlendirme çalışmaları incelenecektir. Bu bölümde öncelikle telsiz duyurga ağlarda enerji etkin yönlendirme gereksinimi ortaya konulacak, etkili yönlendirme kısıtları açılacak ve telsiz duyurga ağlar için gerçekleştirilen yönlendirme çalışmaları açıklanacaktır. Son olarak telsiz duyurga ağlarda gerçekleştirilen yönlendirme çalışmalarının enerji açısından kıyası yapılacaktır.

Tezin beşinci bölümünde, telsiz duyurga ağ mimarisinin test edilmesi için kullanılan benzetim ve deney platformları incelenecektir. Bu bölümde öncelikle Benzetim platformları tanıtılacak, sonrada tez çalışmasında kullanılan deney düzeneği tanıtılacaktır.

Tezin altıncı bölümünde telsiz duyurga ağlar için önerilen enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi ayrıntıları ile açıklanacaktır. Bu bölümde öncelikle önerilen yönlendirme mimarisinin amaçları ortaya konarak mimarinin genel yapısı tanıtılacaktır. Sonrasında ağ başlangıç parametreleri, topoloji oluşturma fazı modülü, yol belirleme ve güncelleme fazı modülü, veri iletim fazı modülü ve ağ yönetim fazı modülü olmak üzere beş bölümden oluşan sistem mimarisinin modüler yapısı ortaya konacaktır.

Tezin yedinci bölümünde uygulamalar bölümüdür. Bu bölümde telsiz duyurga ağlar için önerilen enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi kullanılarak elde edilen sonuçlar üzerinden yorumlar yapılacaktır.

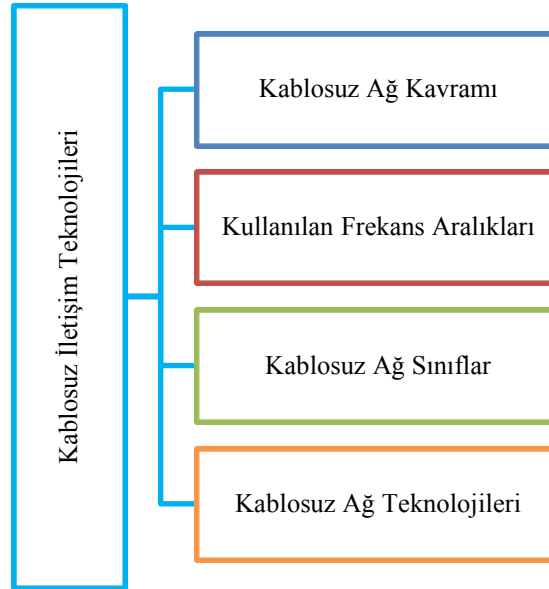
Tezin sekizinci ve son bölümünde, genel bir değerlendirme yapılarak, doktora tez çalışmasının bilime kazandırdıkları hususu ile bu tez çalışması üzerine ileride yapılabilecekler tartışılacaktır.

2. KABLOSUZ İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİ

2.1. Giriş

Bu bölümde, kablosuz iletişimin nasıl gerçekleştirildiği, oluşturulan bir kablosuz ağ ile ilgili kullanılan teknolojilerin neler olduğu incelenmiştir. Bu sayede tez çalışmasında kullanılacak olan kablosuz ortam üzerinden gerçekleştirilen iletişimin daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir.

Bu bölümde ilk olarak kablosuz kavramı üzerinde durulmuş, sonra ise kablosuz ağlar için kullanılan frekans aralıkları, kablosuz ağ sınıfları ve kablosuz ağ teknolojileri açıklanmıştır. Bu bölümde ele alınan konular Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kablosuz iletişim teknolojileri ile ilgili ele alınan konular

2.2. Kablosuz Ağ Kavramı

Kablosuz iletişim, kullanıcıların iletişim esnasında mekândan bağımsız olabildikleri, hareket özgürlüğüne sahip oldukları bir iletişim şeklidir [2], [35]. Kablosuz iletişim teknolojisi, en basit tanımıyla, noktadan noktaya veya bir ağ yapısı şeklinde bağlantı sağlayan, bir teknolojidir. Bu açıdan bakıldığında, kablosuz iletişim teknolojisi, günümüzde yaygın olarak kullanılan kablolu veya fiber optik iletişim yapılarıyla benzerlik göstermektedir. Kablosuz iletişim teknolojisini diğerlerinden ayıran nokta ise; iletişimde fiziksel bir bağlantıya gereksinim duymayıdır. [2], [36], [37].

Kablosuz ağ teknolojileri incelendiğinde ilk olarak Marconi'nin kablosuz olarak gerçekleştirdiği telgraf sistemi üzerinden yapılan iletişimin bu alanda yapılan ilk çalışma olduğu söylenebilir [38].

Bu çalışmanın ardından radyo alıcı ve verici sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmış, taşınabilir radyoların kullanılması 1920'li yıllarda gerçekleşmiştir [3].

İkinci dünya savaşı sürecinde sırtta taşınabilen telsizlerin kullanımı, radyo frekansları hücrelere bölünerek gürültü ve parazitlerin azaltılması gibi konularda ilerleme kaydedilmiştir [38].

1957 yılında ilk uydunun dünya yörüngesine gönderilmesi, 1969 yılında mobil telefonlara radyo frekans bandı tahsisi, kablosuz iletişim teknolojilerinin gelişim sürecini hızlandırmıştır [39].

1970'li yıllarda mobil telefon sistemlerinin geliştiği yıllar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yıllarda AT&T firması hücre sistemini kullanan ilk mobil telefon sistemini hizmete sokmuş ve POCSAG (*Post Office Code Standardization Avisory*) sayısal sayfalama kodu standardı geliştirilmiştir [39].

1980'li yıllarda sesli mesaj ve kısa mesaj servislerinin gelişmesinde etkili olan ilk dijital hücre yayını (CDMA – Code Division Multiple Access, TDMA – Time Division Multiple Access ve GSM – Global System for Mobile) Birleşik Devletler'de test edilmiştir [3].

1990'lı yıllar özellikle kablosuz iletişimde ses verisinin taşınması ile ilgili teknolojik gelişmelerin olduğu yıllar olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca kısa mesaj servisi (SMS), kablosuz uygulama protokolü (WAP) [40], Bluetooth teknolojisi [41], ve 802.11 bu yıllarda geliştirilen teknolojilerdir [42]. 1990'lı yılların en önemli gelişmelerinden biride WWW (World Wide Web) standartlarının oluşmasıdır [41], [43].

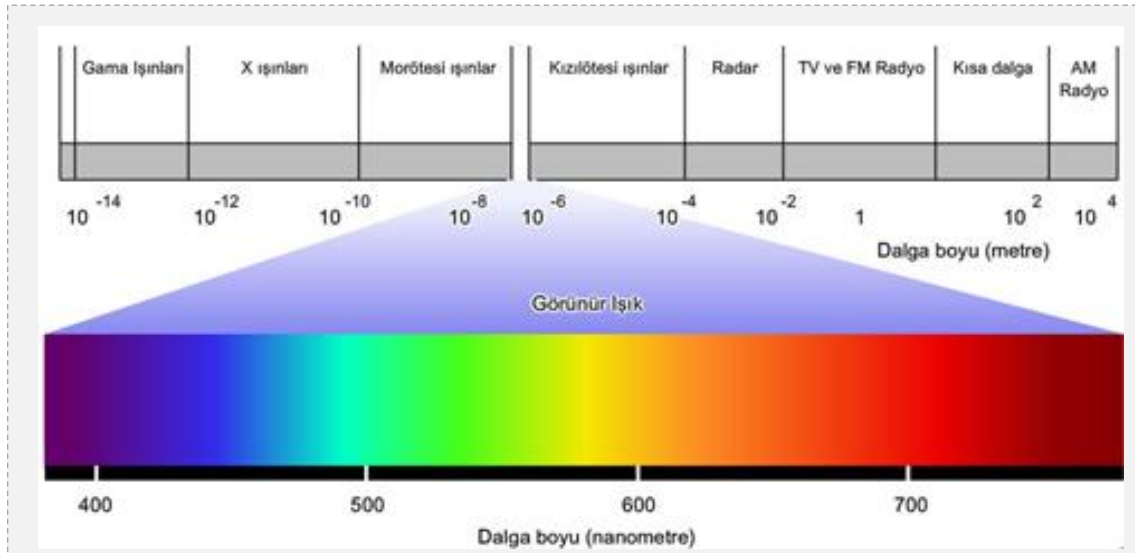
2000'li yıllardan günümüze kadar özellikle taşınabilir cihazların artışı, ve internet kullanım oranı çok hızlı bir artış göstermiştir [1]. 2000'li yılların ortalarından itibaren kablosuz iletişimin gelişmesine paralel olarak duyarga teknolojileri de hızlı gelişim göstermiştir [19]. Bu da başta askeri ve sağlık projeleri olmak üzere, güvenlik, ortam izleme gibi alanlarda kablosuz duyargaların kullanılarak geliştirilen projeleri arttırmıştır. Kablosuz algılayıcı ağ, telsiz duyarga ağ veya tasarsız duyarga olarak literatürde geçen sistemler kablosuz teknolojilerdeki gelişmelere paralel olarak son yıllarda güncel bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır [1], [11], [19].

2.3. Kullanılan Frekans Aralıkları

Kablosuz ağ teknolojileri, teknolojinin hızlı gelişimi ile birlikte günümüzde kablolu ağ teknolojilerinin kullanıldığı tüm ortamlarda verimlilik ve üretkenliği arttırmak, hareketlilikten kaynaklanan esnekliği sağlamak ya da kablolu ağ hizmetlerinin yedeklenmesi amacı ile kullanılmaktadır [38]. Bu hızlı gelişim ve kablosuz ağ teknolojilerinin avantajları nedeniyle kablosuz ağlar artık sadece iş yerlerinde değil havaalanı, parklar, fuarlar gibi birçok alan ve evlerde kullanılır hale gelmiştir. Ayrıca kablosuz ağ teknolojisinin gelişmesi ile kablosuz ağlar ticari ve bilimsel uygulamalarda da kullanılır hale gelmiştir.

Kablosuz ağ teknolojileri, cihazlar arasında bilgi taşıyabilmek için elektromanyetik dalgaları kullanmaktadır. Elektromanyetik dalga, havada bilgileri kablosuz olarak taşıyan ortamdır. Elektromanyetik dalga farklı dalga boylarını kullanarak havada bilgileri uzak mesafelere taşıyabilmektedir. Bunu sağlayan yapıya elektromanyetik spektrum denilmektedir [44].

Elektromanyetik spektrum, radyo ve televizyon yayın bantları, görünür ışık, x ışınları ve gama ışınları gibi öğeler içermektedir. Bunların her biri, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi belirli bir dalga boyu aralığına ve ilişkilendirilmiş enerjiye sahiptir.



Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum

Spektrumun bazı bölümleri hükümetler tarafından yönetilir ve belirli uygulamalar için çeşitli kuruluşlara lisanslanır. Spektrumun belirli alanları ise özel izin kullanma

zorunluluğu gibi bir kısıtlama olmadan genel kullanım için ayrılmıştır. Genel kablosuz iletişim için kullanılan en yaygın dalga boyları arasında Kızılötesi ve Radyo Frekansı (RF) bandının bir bölümü yer alır. [44]

2.3.1. Kızılötesi (IR)

Kızılötesi (IR) düşük seviyeli bir enerji olduğu için duvar veya diğer nesnelerden geçememektedir. IR, elektromanyetik spektrumda gözle görülebilen ışığın altındaki frekansları (3×10^{14} kHz / 850-950 nm) veri iletiminde kullanılmaktadır. Bu yüzden IR Kişisel Sayısal Yardımcı (PDA) ve PC (Kişisel Bilgisayar) gibi aygıtlar arasında bağlantı ve veri taşıma amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kızılötesi Doğrudan Erişim (IrDA) bağlantı noktası olarak bilinen özel bir iletişim bağlantı noktası, aygıtlar arasında bilgi alışverişi yapılmasını sağlamak için IR'yi kullanır. IR yalnızca birebir bağlantı türüne izin verir [45].

IR, serbest kullanıma açık olması, kullanımı için herhangi bir lisanslama gerekmemesi, RF sinyallerinden etkilenmemesi, güç tüketimlerinin düşük olması ve güvenli olması gibi avantajları olmasına rağmen iletişim mesafesinin 10-15 m gibi kısa bir mesafe olması, önünde bulunan cisimlerden etkilenmesi, ortam şartlarından etkilenmesi gibi dezavantajlardan dolayı çeşitli uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. IR'ların özellikle iletişim mesafesinin kısıllığı ve fiziksel engellerin ötesine ulaşamaması nedeniyle kablosuz ağ teknolojileri geliştikçe kullanımı azalmıştır [46]. IR teknolojisi, uzaktan kumanda aygıtları, kablosuz fareler ve kablosuz klavyeler gibi genellikle kısa mesafeli iletişimin yapılması gereken cihazlarda tercih edilen bir teknolojidir. Ayrıca profesyonel anlamda kızılötesi teknolojisi geçici ağ kurma ihtiyacı duyulan yerlerde de kullanılmaktadır. Bu tür kullanımda yerel kablolu ağ ile bağlantı kurarak bilgi alış verişinde bulunmak ve sunucuya bağlı faks ve yazıcı gibi cihazlardan faydalanmak gibi konularda IR'dan yararlanılmaktadır [47]. Daha geniş ağ yapıları için IR sinyalini nesnelerden yansıtmak gerekmektedir. Daha büyük aralıklar için yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar gerekir [44], [48].

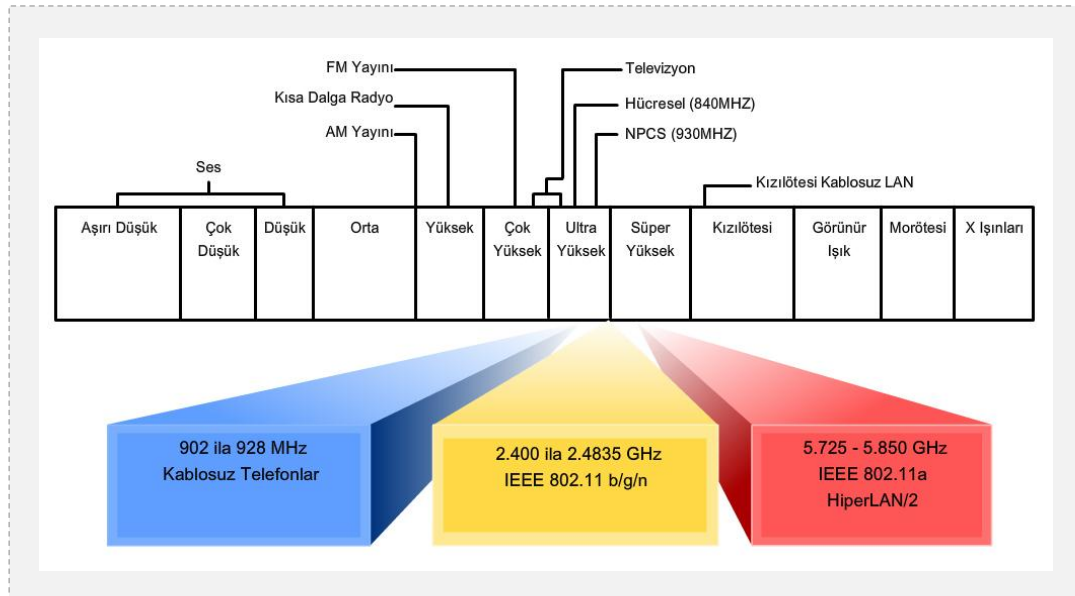
2.3.2. Radyo Frekansı (RF)

Radyo Frekansı (Radio Frequency - RF), veri iletimi için günümüzde sıklıkla kullanılan dalga türüdür. RF dalgaları ile belli frekans aralığında veriyi iletmek veya almak verici ve alıcı devreleri ile mümkün hale gelmektedir. Verici gücü ve alıcı duyarlılığı ile iletimin mesafesi belirlenmektedir. Televizyon gibi uzak mesafeli yayın için

yüksek çıkış güçlü vericiler gerekirken, kablosuz telefon gibi kısa mesafeli haberleşme sistemlerinde düşük güçlü vericiler yeterli olmaktadır [49-50].

RF dalgaları duvarlardan ve diğer nesnelerden geçerek IR'den daha geniş bir haberleşme menzili sağlamaktadır. RF teknolojisinde; fiziksel bağlantı yerine elektromanyetik dalgalar kullanılarak, kablosuz iletişim gerçekleştirilmekte ve bu yüzden kablosuz ağ sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalganın frekans spektrumunun kapsama alanı içinde tekrar kullanılması nedeni ile tükenen bir kaynak olduğundan verimli kullanılması kritik öneme sahiptir. Artan sistem ve kullanıcı sayısı da yeni frekans talebini artırmaktadır. Yine yoğun frekans kullanımı, frekans kirliliği ve girişim riskini de artırmaktadır. Bu nedenlerle son yıllarda frekans spektrumunu daha verimli kullanan ve girişimden daha az etkilenen RF teknolojileri geliştirilmiştir [50-52].

IR'de olduğu gibi RF dalgaları üzerinden haberleşme yapılırken bir lisans veya kullanım ücreti gerekmez. Bu yüzden önceden tahsis edilmiş ISM frekans bandları kullanılmaktadır. Ülkemizde ISM bandının yaygın olarak kullanılan frekansları, 315MHz, 418MHz, 433.92MHz, 868MHz, 915MHz ve 2.4GHz olarak belirlenmiştir. Bu bandlar öncelikle diğer telsiz servislerinin kullanımı için de tahsisli olduklarından kablosuz ağ sistemleri muhtemel girişim riskini baştan kabul etmek zorundadırlar. Bu durum kablosuz ağ sistemleri için girişime dayanıklı teknolojilerin geliştirilmesini ve kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir [53]. Şekil 2.3'de radyo dalgalarının elektromanyetik spektrum üzerindeki frekans dağılımı gösterilmektedir.



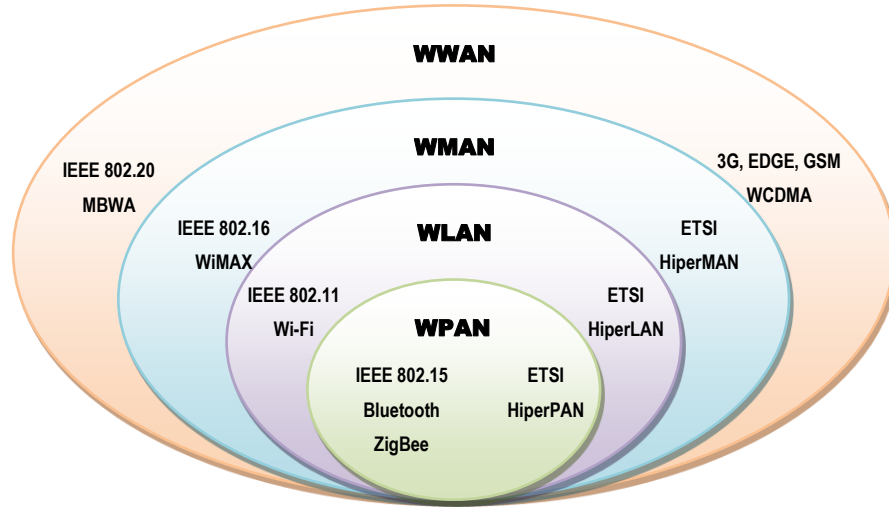
Şekil 2.3. ISM frekans bandı

2.4. Kablosuz Ağ Sınıfları

Kablosuz ağlar kullanım alanlarına göre çok çeşitlilik göstermelerine rağmen, genellikle verinin aktarıldığı uzaklığa yani kapsama alanlarına bağlı olarak dört farklı kategori altında toplanmaktadırlar [54-55]. Bunlar;

- Kablosuz Kişisel Alan Ağları (Wireless Personal Area Networks, WPAN)
- Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Networks, WLAN)
- Kablosuz Metropol Alan Ağları (Wireless Metropolitan Area Networks, WMAN)
- Kablosuz Geniş Alan Ağları (Wireless Wide Area Networks, WWAN)

Şekil 2.4’de büyüklüklerine göre kablosuz ağ sınıfları ve yaygın olarak kullanılan standartları gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Büyüklüklerine göre kablosuz ağ sınıfları ve kullanılan standartlar [56]

Kablosuz ağ teknolojileri kullanımları dikkate alındığında Tablo 2.1’de belirtildiği şekilde sınıflandırmak mümkündür [38].

Tablo 2.1. Kablosuz iletişim teknolojilerinin sınıflandırılması

İletişim	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
Standart	Bluetooth, HomeRF	IEEE 802.11 HiperLAN	IEEE 802.16 HiperMAN	GSM, GPRS, CDMA ve 3G
Hız	< 1 Mbps	11 – 54 Mbps	11 – 100 Mbps	10 – 384 Kbps
Mesafe	Kısa (0-10m)	Orta (0-250m)	Orta – Uzun (250m – 50km)	Uzun (>50km)
Uygulama	Cihazlar arası bağlantı, Piconet	Cihazdan cihaza, Ağ kurulumu	Kablo yerine Son kullanıcı erişimi	Mobil Telefon, Mobil Veri

2.4.1. Kablosuz Kişisel Alan Ağları (WPAN)

Ev ya da küçük iş yerlerinde birkaç bilgisayar ve çevre biriminden oluşan ağlara Kişisel Alan Ağları (Personal Area Networks, PAN) denmektedir. Kablo yerine kablosuz iletişim teknolojisi kullanılması durumunda ise bu ağlar Kablosuz Kişisel Alan Ağları (Wireless Personal Area Networks, WPAN) olarak adlandırılmaktadır. Bir başka ifadeyle WPAN'lar yakın mesafedeki elektronik cihazları kablosuz olarak birbirine bağlayan ağlardır. Bu tür sistemler diğer ağlara kıyasla daha düşük veri hızına ve daha kısa iletişim mesafesine sahiptirler. WPAN'ların hızları 1 Mbps ve menzilleri 10 metre civarındadır. WPAN'ların en yaygın uygulamaları Bluetooth ve HomeRF'dir [38].

WPAN teknolojilerinin geliştirilmesini standartlaştırmak amacıyla IEEE 802.15 standardı oluşturulmuştur. Bu standardın amacı basit, etkin ve az güç tüketen WPAN'ların gelişmesini sağlamaktır [57]. Bu ağlar kısa mesafeler içinde değişik amaç ve hızlarda haberleşmeler için farklı alt gruplara ayrılmıştır. IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.3 (UWB) ve IEEE 802.15.4 (ZigBee) gibi standartlar bu grup ağlardandır. Yaygın olarak kullanılan WPAN ağları içerisinde IrDA ve HomeRF'i de saymak mümkündür [57].

2.4.2. Kablosuz Yerel Alan Ağları (WLAN)

Yerel alan ağları (Local Area Networks, LAN) bir bina, okul, hastane, kampüs gibi sınırlı bir coğrafi alanda kurulan ve çok sayıda kişisel bilgisayarın yer aldığı ağlardır. LAN'lar, kamu kurum ve kuruluşlarında, şirketlerde, üniversitelerde, konferans salonlarında ve benzeri pek çok yerde kullanılmaktadır. Bir LAN içinde çok sayıda bilgisayar, yazıcı, çizici, tarayıcı ve diğer bilgisayar çevre birimleri yer alabilir. LAN'larda bilgisayarlar ve ağ içerisindeki diğer cihazlar arasında iletişimi sağlamak üzere kablo yerine RF veya kızılötesi teknolojisi kullanılması durumunda, Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Networks, WLAN) olarak adlandırılmaktadır. En kısa tanımıyla WLAN sistemi bir kablosuz LAN'dır. Kablosuz bir sistem olması nedeniyle cadde, sokak, park, bahçe ve benzeri açık alanlarda WLAN sistemleri başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [38].

Dünyada yaygın olarak kullanılan WLAN standartları IEEE 802.11x (Amerika) ve HiperLAN (Avrupa) ile belirlenmiştir. Bu standartlar haricinde Japonya'da geliştirilen MMAC (Multimedia Mobile Acces Communication System) standardı da mevcuttur [56].

WLAN'lar, çok sayıda kablo bağlamanın engelleyici olacağı geçici ofislerde kullanılabileceği gibi, kullanıcıların bina içinde farklı yerlerde ve farklı zamanlarda çalışabilmeleri için varolan bir LAN'ı tamamlamak için de kullanılabilir. WLAN'lar iki farklı yöntemle çalıştırılabilir. Altyapı (Infrastructure) WLAN'larında, kablosuz istasyonlar (radyo ağ kartı veya harici modemleri olan aygıtlar), istasyonlarla var olan ağ omurgası arasında köprü görevini yerine getiren kablosuz erişim noktalarına bağlanır. Eşler Arası (Ad-Hoc) WLAN'larda, sınırlı bir bölgenin içindeki çok sayıda kullanıcı, erişim noktası kullanmadan geçici bir ağ oluşturabilir [56].

2.4.3. Kablosuz Metropolitan Alan Ağları (WMAN)

Bir şehri kapsayacak şekilde yapılandırılmış iletişim ağlarına veya birbirinden uzak yerlerdeki yerel bilgisayar ağlarının (LAN) birbirleri ile bağlanmasıyla oluşturulan ağlara Metropol Alan Ağları (Metropolitan Area Networks, MAN) denilmektedir. MAN'larda da WAN'larda olduğu gibi genellikle kiralık hatlar veya telefon hatları kullanılmaktadır. Bu tür ağlarda kablo yerine uydu veya RF iletişimi teknolojileri kullanılması durumunda Kablosuz Metropol Alan Ağları (Wireless Metropolitan Area Networks, WMAN) olarak isimlendirilmektedir. WWAN'lar çok sayıda şubesi bulunan kurum ve büyük şirketler ile dağınık yerleşime sahip üniversiteler gibi yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. WWAN'lar kablolu ağlardan çok daha ucuz, esnek ve kolay kurulum özelliklerine sahiptir. Ancak, bu tür uygulamalar oldukça yenidir ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu alanda WIMAX adı altında uygulamalar yapılmaktadır. IEEE 802.16 standardı WWAN için geliştirilmektedir [37].

WMAN teknolojileri kullanıcılara, şehir alanı içerisinde çeşitli yerler arasında fiber, bakır kablo veya kiralık hatların yüksek maliyetine katlanmadan, kablosuz bağlantılar kurma olanağı verir. Buna ek olarak, WMAN'lar, kablolu ağların birincil kiralanmış hatları kullanılabilir olmadığında yedek olarak da hizmet verebilir.

2.4.4. Kablosuz Geniş Alan Ağları (WWAN)

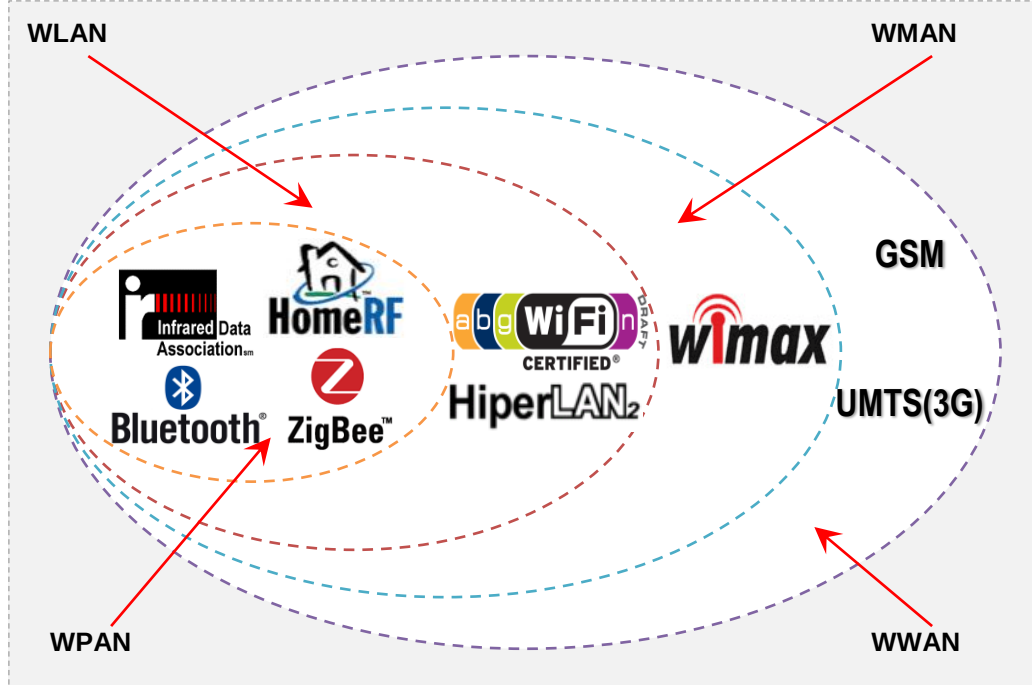
Bir ülke ya da dünya çapında yüzlerce veya binlerce kilometre mesafeler arasında iletişimi sağlayan ağlara Geniş Alan Ağları (WAN, Wide Area Networks) denilmektedir. İnternet bunun klasik bir örneğidir. Özellikle hücresel WAN kullanan uydu hizmetlerini kullanan Global System for Mobile GSM, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), Long Term Evolution (LTE) gibi sistemleri içerir. Bu sistemler genellikle 3. şahıs

servis sağlayıcılar tarafından kontrol edildiklerinden ağ yöneticisinin kontrolü dışındadırlar [6].

WAN’larda genellikle kiralık hatlar veya telefon hatları kullanılmaktadır. Bu tür ağlarda kablo yerine uydu veya telsiz iletişimi kullanılması durumunda Kablosuz Geniş Alan Ağları (WWAN, Wireless Wide Area Networks) olarak isimlendirilmektedir. Uzak yerleşim birimleriyle iletişimin kurulduğu bu ağlarda çok sayıda bilgisayar çalışabilir. WWAN uygulamalarına örnek olarak GSM, GPRS, CDMA ve 3G sistemleri sayılabilir. WWAN’larda trafik yükünün büyük kısmı ses iletişimi ile ilgilidir. Ancak son yıllarda yoğun olarak veri iletişimi ve internet erişimi talepleri yaşanmaktadır [37], [58-59].

2.5. Kablosuz Ağ Teknolojileri

Günümüzde kablosuz ağ altyapısı kullanılarak geliştirilen birçok teknoloji mevcuttur. Bu teknolojiler kullanım alanlarına ve kapsama alanına göre sınıflandırılmaktadır. Mevcut kablosuz ağ teknolojileri Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Bu bölümde bu teknolojiler özetlenecektir.



Şekil 2.5. Kablosuz ağ teknolojileri [56]

2.5.1. Bluetooth

Bluetooth, sayısal cihazlar arasında kısa mesafeli veri iletişimini sağlamak üzere geliştirilmiş teknolojinin adıdır. Bluetooth teknolojisi 2.4GHz bandında ilk olarak Ericsson Mobile Com. tarafından 1994 yılında geliştirilmiştir [38].

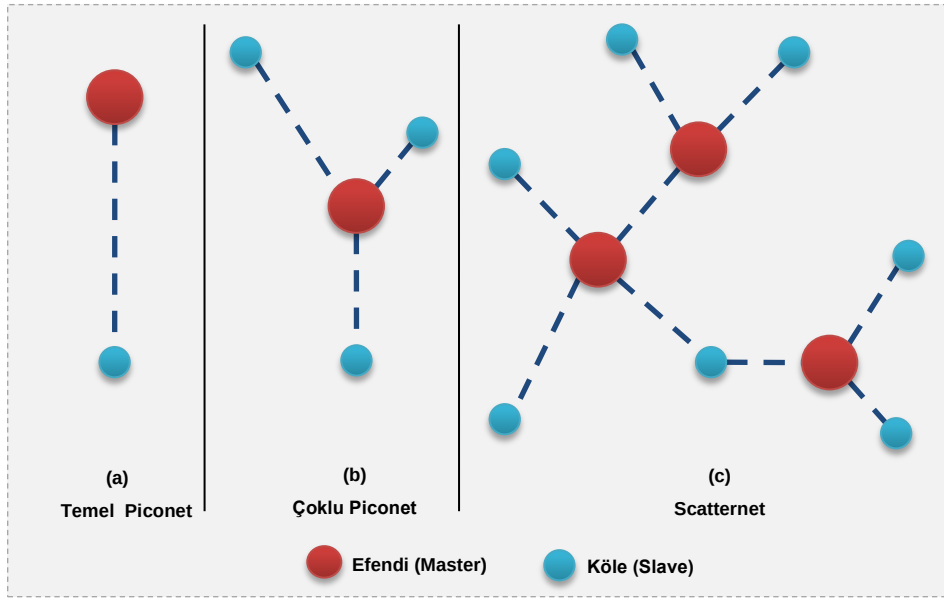
Bluetooth'un amacı; dizüstü bilgisayarlar, cep bilgisayarları, modemler, LAN erişim noktaları, cep, ev ve işyeri telefonları gibi sayısal cihazların birbirileri ile kablo bağlantısı olmadan görüş hattı doğrultusu dışında olsalar bile haberleşmelerine olanak sağlamaktır. Böylece Bluetooth, kısa mesafede ve kişisel kullanım esas alınarak, düşük ücret, düşük güç ve düşük profilli bir teknoloji olarak hedeflemiştir.

Bluetooth, 2.4GHz ISM bandında çalışan RF tabanlı bir WPAN teknolojisidir. Bu teknolojiye 2.402GHz'den başlayarak 2.480GHz'e kadar 1MHz atlayarak oluşturulan 79 atlama frekansı kullanılmaktadır. Modülasyon tekniği olarak FHSS kullanır. Full duplex olarak saniyedeki frekans atlama sayısı 1600'dür. Veri iletimi için Basic Rate (BR) ve Enhanced Data Rate (EDR) olmak üzere üç farklı iletim modu kullanır. Varsayılan temel iletim modu Basic Rate olup bu modda maksimum 1Mbps veri iletimi yapılabilirken EDR modunda bu değer 3Mbps'e kadar çıkmaktadır [41], [60]. EDR, Bluetooth teknolojisinde mimari yapıyı değiştirmeden veri iletim hızını arttıran bir yöntemdir. BR yönteminden farklı olarak GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) yerine PSK (Phase Shift Keying) kullanır. Bluetooth teknolojisinin genel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir [38], [41].

Tablo 2.2. Bluetooth'un genel teknik özellikleri

	Sınıf1	Sınıf2	Sınıf3
Frekans Aralığı:	2402 - 2480 MHz		
Veri Oranı:	1 Mbps (fiziksel) / EDR ile 3Mbps		
Kanal Band genişliği:	1 MHz		
Kanal sayısı:	79		
RF atlama:	1600 kez/s		
Şifreleme:	Cihaz ID ve 0/40/64 bitlik anahtar uzunlukları		
TX Çıkış Güç Seviyesi:	20 dBm (100mW)	4dBm (2.5mW)	0dBm (1mW)
İletişim Mesafesi :	~100 metre	~10 metre	~1 metre

Bluetooth teknolojisi ile kullanıcılara kablosuz ağ bağlantısı veya internet erişimi hizmeti verilebilmektedir. Bluetooth teknolojisi ile bir cihazın master (efendi) olması durumunda 7 adet slave (köle) cihaz ile bir ağ oluşturmaları mümkündür. Bu oluşturulan ağa “Pikonet” (Piconet) adı verilmektedir. Slave cihazlar master cihaza bağlanarak kablosuz ağ zincirini oluşturmaktadır. Master cihazın görevi ağı kontrol etmektir. Eğer kapsama alanının genişletilmesi ve daha fazla cihazın birbirine bağlanması isteniyor ise Pikonet’lerin birbirine bağlanması sağlanır. Bu yapıdaki ağlara Scatternet denilmektedir. Farklı kullanıcı sayılarına sahip Piconet ve Scatternet yapısı Şekil 2.6’de verilmiştir [38].



Şekil 2.6. Piconet ve Scatternet oluşumu

2.5.2. HomeRF

HomeRF, ev ve küçük işyerleri için geliştirilen kablosuz erişim standardına verilen addır. Özellikleri Mart 1998’de kurulan Home Radio Frequency Working Group (HomeRF WG) isimli çalışma grubu tarafından ortak kablosuz erişim protokolü (Shared Wireless Application Protocol-SWAP) adı altında duyurulmuştur. HomeRF teknolojisi ile PC, kablosuz telefon ve diğer cihazlar arasında ses ve veri iletişimini kablosuz ortam kullanarak gerçekleştirilmektedir [61-62]. HomeRF üzerine yapılan çalışmalar SWAP 2.0’ın geliştirilmesini sağlamıştır. SWAP 2.0 ile başlangıçta 1.6Mbps olan veri iletişim hızı 10Mbps’e kadar çıkarılmıştır [62]. HomeRF 2.0 sürümü’nün genel teknik özellikleri Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3. HomeRF'in genel teknik özellikleri [38]

Frekans Aralığı:	2402 - 2480 MHz
Veri Oranı:	10 Mbps (v.2 için)
Mesafe:	~50 metre
RF atlama:	50 kez/s
TX Çıkış Gücü:	Azami 20 dBm (100 mW)

HomeRF 2.0 sistemlerinde FHSS modülasyon tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte veri kanalı bir frekanstan diğerine saniyede 50 defa atlamaktadır. 2.4GHz ISM bandını kullanan HomeRF aynı frekans bandını kullanan WLAN sistemleri tarafından girişime maruz kalmaktadır. HomeRF, kullandığı FHSS tekniği saniyesinde birbirine girişim yapmayan 15 frekans kanalına sahiptir. Bu değer DSSS tekniği kullanan WLAN sistemleri için 3'tür. HomeRF sistemler 120 ağıta kadar bağlantıyı destekleyebilirler. Veriyi şifreli olarak iletebilirler. Bu sayede güvenlik artırılmaktadır. Hali hazırda var olan kablolu ağlara katmak ise oldukça güçtür [38], [61-63].

2.5.3. IrDA

Infrared Data Association (IrDA), bir çeşit kızılötesi iletişim teknolojisinin adıdır. IrDA, 1993 yılında 2m'den küçük mesafelerde kızılötesi tabanlı bağlantılar üretmek için geliştirilmiştir. İletişim kurulabilmesi için ilgili cihazların bağlantı uçları birbirilerine dönük olmalı ve aralarında herhangi bir engel olmamalıdır [45], [48].

IrDA çeşitli hızlarda veri alışverişine izin verebilir. SIR (Serial Infrared) ile 9600bps, 19.2kbps, 38.4kbps, 57.6kbps ve 115.2kbps; MIR (Medium Infrared) ile 0.576Mbps ve 1.152Mbps; FIR (Fast Infrared) ise 4Mbps hızlarında çalışabilir. 16Mbps hızına çıkabilen VFIR (Very Fast Infrared) ve 100Mbps hızına çıkabilen UFIR (Ultra Fast Infrared) üzerindeki çalışmalar halen devam etmektedir [45].

2.5.4. UWB

Ev ağlarında, geniş band veri iletişimi için video kamera, televizyon ve bilgisayar gibi aygıtlar arasındaki iletişimin kablosuz olarak sağlanması amacıyla geliştirilen teknoloji UWB (Ultra Wide Band) olarak adlandırılmaktadır. UWB, yüksek hızlı iletişim gerçekleştirmek amacı ile geliştirilmiştir. 3.1Ghz ile 10.6GHz arasındaki (7.5GHz'lik) bir band genişliğini, kısa mesafede düşük güç ile kullanır. Kanal kapasitesi bakımından IEEE

802.11x ve Bluetooth gibi diğer kısa mesafe kablosuz teknolojilerden daha üstün performans göstermektedir [64].

UWB, IEEE 802.15.3a standardını temel alır. Oluşturulan standartta 10m mesafede 110Mbps veri iletim hızına, 4m mesafede ise 200Mbps veri iletim hızına çıkılmaktadır [65]. Daha düşük mesafelerde çok daha yüksek veri iletim hızları hedeflenmekte olup bu teknoloji üzerindeki geliştirmeler halen devam etmektedir [64].

İki farklı UWB tekniği mevcuttur. Bunlardan ilki DS-UWB diğeri ise OFDM tekniğidir. UWB tamamen sayısal bir haberleşme sistemi olduğu için Darbe Konum Modülasyonu (PPM), Darbe Genlik Modülasyonu (PAM) ve OOK (On/Off Keying) gibi temel band sayısal modülasyon teknikleri kullanır [64].

2.5.5. ZigBee

ZigBee düşük veri hızları ve düşük güç tüketimi gerektiren gömülü uygulamalar için geliştirilmiş teknolojinin adıdır. Wi-Fi ve Bluetooth teknolojilerinin bazı uygulama alanlarında yetersiz olması sebebi ile ilk olarak 1998 yılında kendi kendine organize olabilen ad-hoc kablosuz ağları geliştirilmiş daha sonra IEEE tarafından 802.15.4 olarak Mayıs 2003'te standartlaştırılmıştır. ZigBee'nin ilk teknik detayları ZigBee Alliance tarafından Aralık 2004'te onaylanmış ve Haziran 2005'te versiyon 1.0 (ZigBee 2004 olarak) kullanıma sunulmuştur. Versiyon 1.0'a göre daha gelişmiş olan ZigBee 2006 Eylül 2006 tarihinde yayınlanmıştır. Son olarak Eylül 2007'de ZigBee PRO adıyla bilinen en son halini almıştır [66-67]. ZigBee, telsiz duyurga ağlar için oluşturulan temel standartları belirlediği için diğer teknolojilere göre daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır [66].

Zigbee uzaktaki cihaz yada duyurgalar ile iletişimin sağlanması için düşük güçlü, düşük maliyetli ve güvenilir bir kablosuz ağ protokolü sunmaktadır. Başka bir diğer deyişle ZigBee belli periyotlar ile veri alış verişinin sağlandığı duyurga düğümleri ile kablosuz haberleşmenin sağlanması için geliştirilmiştir [67-68].

ZigBee, 2.4GHz ISM bandını ve DSSS modülasyon tekniğini kullanmaktadır. Ayrıca Amerika kıtasında 915MHz ve Avrupa'da 868MHz'de bandı da kullanılmaktadır. 2.4GHz bandında 10 kanal ile 250kbps, 915MHz frekansında 6 kanal ile 40kbps ve 868MHz frekansında 1 kanal ile 20kbps hızlarına erişilebilmektedir. İletişim mesafesi iletim gücü ve çevre etkilerine bağlı olarak 10 ile 75m arasında değişmektedir [68-69].

Enerji tasarrufu sağlamak için veri akışına bağlı olarak ZigBee cihazları gerek duyduğunda uyku moduna geçirebilir. Bu sayede saatler süren uyku devreleriyle birlikte

bataryanın kullanım süresi aylarca sürebilmektedir [68], [70]. Bu özelliği ile ZigBee izleme ve kontrol amaçlı Telsiz duyurga ağlarda çok önemli bir konuma gelmektedir. Tablo 2.4’de bu teknolojinin temel özellikler ve diğer teknolojiler ile karşılaştırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.4. ZigBee teknolojisinin karşılaştırmalı özellikleri

Özellik	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi	GPRS/GSM
Odaklanma Alanı	İzleme ve Kontrol	Kablo Yerine	Web, E-mail, Video	Geniş Alan Ses ve Veri
Sistem Kaynağı	4-32 Kb	250 Kb +	1 Mb +	16 Mb +
Pil Ömrü (Gün)	100-1000 +	1-7	0,5-5	1-7
Ağ Boyutu (Uç)	2 ⁶⁴	7	32	1000
Ağ Veri Genişliği (kbps)	100-1000 +	720	11000-54000	64-128 +
Kapsama Alanı (m)	1-75	1-10 +	1-100	1000 +
Başarı Alanları	Dayanıklılık, Maliyet, Düşük Güç tüketimi	Maliyet, Rahatlık	Hız, Esneklik	Ulaşılabilirlik, Kalite

ZigBee cihazlarını “kullanım amaçları” ve “işlevsellik” bakımından incelendiğinde “mantıksal bileşenler” ve “fiziksel bileşenler” olarak gruplandırmak mümkündür. Tablo 2.5’de ZigBee ağının mantıksal bileşenleri, Tablo 2.6’da fiziksel bileşenleri gösterilmektedir.

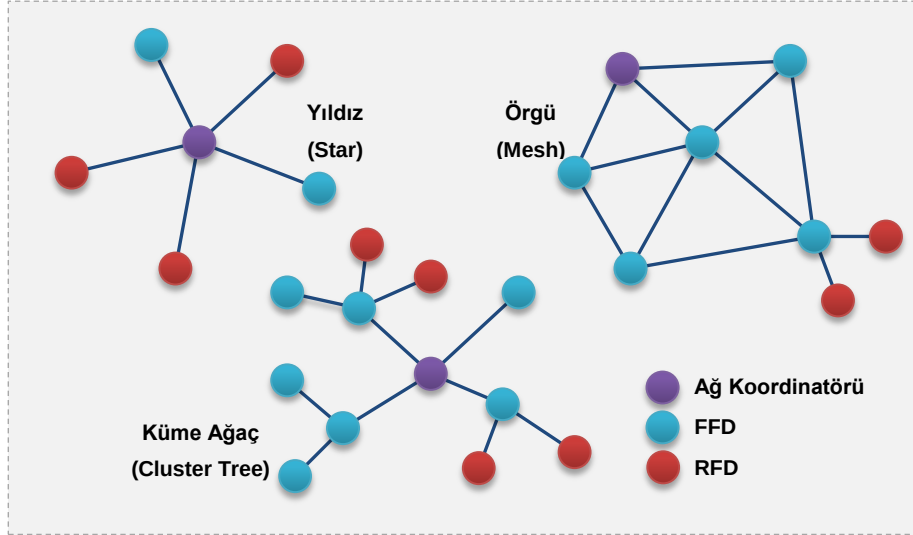
Tablo 2.5. Bir ZigBee Mantıksal Bileşenleri [6]

Mantıksal Roller	Özellikleri
ZigBee koordinatörü	Bir ağ başlatılır. Diğer ağ düğümlerini yönetir. Ağ düğüm bilgisini depolar.
ZigBee yönlendirici	Eğitilmiş düğümler arasında yönlendirici mesajları
ZigBee son cihaz	Ağdaki bir yaprak düğüm olarak görünür

Tablo 2.6. Bir ZigBee ağı fiziksel bileşenleri [6]

Fiziksel Bileşen	Mümkün Mantıksal Rolü	Özellikleri
Azaltılmış fonksiyon Aygıt RFD	ZigBee son cihaz	- Çoğunlukla veri gönderme alma için kullanılır; kullanılabilen şebek arar; ağ koordinatöründen veri talep eder. - Bir ZigBee koordinatör olamaz. Diğer RFD’ler doğrudan iletişimli değildirler. - Minimum donanım kullanır (Bellek gibi) - Genellikle pil kullanılır.
Tam Fonksiyon Cihazı FFD	ZigBee son cihaz ZigBee koordinatör ZigBee yönlendirici	Bir yönlendirici olarak; koordinatör olarak veya başka bir RFD olarak işlev yapabilir. Pil gücü veya cihaz doğrudan güce sahip olabilir

ZigBee ağlarda, Yıldız (Star), Örgü (Mesh) ve Küme Ağaç (Cluster Tree) olmak üzere 3 farklı topoloji söz konusudur. Daha az güç tüketimi ve bu sayede batarya ömrünü uzatmak için yıldız topoloji uygunken etkin iletişim ve kesintisiz veri iletimi için örgü topoloji daha kullanışlıdır. Küme ağaç topolojisi ise ilk iki topolojinin bir kombinasyonu niteliğinde olup etkin iletişim ve verimli güç kullanımı amaçlar [70]. Şekil 2.7’de ZigBee teknolojisinde kullanılan ağ topolojileri gösterilmektedir.



Şekil 2.7. ZigBee ağ topolojileri

ZigBee ağında, ağ koordinatörü, ağın oluşturulması ve yönetilmesi görevlerini üstlenmektedir. Ağ içindeki tüm düğümlerin bilgileri ağ koordinatörü tarafından saklanır. Yönlendirici ise düğümler arası haberleşme ve verilerin yönlendirilmesinden sorumludur [68], [70].

İşlevsel açıdan bakıldığında, FFD cihazlar herhangi bir topolojide (koordinatör veya düğüm gibi) herhangi bir rol üstlenebilirler. Diğer FFD ve RFD cihazlar ile konuşabilirler ve genelde şebekeden besleme alırlar. RFD cihazlar ise Ağ koordinatörü olamazlar ve sadece FFD’ler ile konuşabilirler. Çok basit yapıdadırlar ve genellikle batarya beslemesi kullanırlar. Bir ağ içerisinde daha çok düğüm görevi görürler [70].

2.5.6. Wi-Fi

Wireless Fidelity (Kablosuz Bağlantı Alanı “Wi-Fi”), kişisel bilgisayarlar, akıllı telefonlar, video oyun konsolları, dijital ses oynatıcılar gibi cihazların internete bağlanmasını sağlayan teknolojinin adıdır. Wi-Fi cihazların kablosuz haberleşmesini

sağlayan ve IEEE tarafından 802.11x adı altında belirlenen standartlar dizisidir. Wi-Fi teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen kablosuz haberleşme IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g ve IEEE 802.11n standartları ile gerçekleştirilmektedir [71].

Tablo 2.7’de IEEE 802.11 a/b/g/n standartları ve genel özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.7. IEEE 802.11 a/b/g/n standartları ve genel özellikleri [38], [42], [72]

	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Çıkış Tarihi	1997	1999	1999	2003	Kasım 2009
Max. Veri Hızı	2 Mbps	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	600 Mbps
Modülasyon	FHSS, DSSS	OFDM	DSSS, CCK	DSSS, CCK	DSSS, CCK OFDM
Frekans Bandı	2,4 GHz	5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz, 5 GHz
Uzaysal Saçınım	1	1	1	1	1, 2, 3, 4
Kanal Genişliği	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 ve 40 MHz
Kanal Sayısı		19	11,13,14	11,13,14	11,13,14,19
Menzil	~20 -100m	~35 -120m	~38 -140m	~38 -140m	~70 -250m
Güvenlik	WEP, WPA	WEP, WPA	WEP, WPA	WEP, WPA	WEP, WPA

Wi-Fi dizüstü bilgisayarlar, PDA’lar ve diğer taşınabilir cihazların yakınlarındaki kablosuz erişim noktaları aracılığı ile yerel alan ağına bağlanabilmesine olanak sağlar. Bağlantı kablosuz erişim noktaları ve cihazın desteklediği, IEEE 802.11.x protokolüne bağlı olarak 2.4GHz veya 5 GHz radyo frekansında gerçekleşmektedir. Veri, CSMA/CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) protokolüne uygun gönderilip alınır ve böylece paketlerin iletimi sırasında hata oluşması sorunu çözülür.

IEEE 802.11 temel standardı ile 2.4GHz bandında FHSS veya DSSS teknikleri kullanılarak 2Mbps’e kadar veri iletişimi sağlanabilmektedir. 802.11 standardının esas amacı mevcut kablolu LAN’ların, kablosuz olarak genişlemesine olanak tanımak ve sabit sistemlerle mobil sistemleri bir çatı altında toplamaktır [73]. 2.4GHz bandında çalışan ve 11Mbps veri iletim hızına sahip olan IEEE 802.11b ve aynı frekans bandında 54Mbps hızına sahip olan 802.11g Türkiye dahil dünyanın bir çok yerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2], [42].

Wi-Fi teknolojisi;

- Lisans gerektirmeyen belirli frekanslarda çalışması,
- Ağ için kablolu gereksinimi olmaması, böylece kablo çekilemeyecek binalarda veya binalar arası bağlantılarda kolaylık sağlaması,
- Diğer kablosuz çözümlere göre çok daha ucuz olması ve kolay kurulabilmesi,
- Birden çok kablosuz erişim noktası kullanılan ağlarda kablosuz dolaşım ile iletişim kesilmeden bir erişim noktasından diğerine geçiş yapılabilmesi,
- WEP, WPA ve benzeri kablosuz şifreleme yöntemleri veya IEEE 802.1x gibi yetkilendirme yöntemleri ile çeşitli güvenlik seçenekleri sunması,
- Wi-Fi yetenekli cihazların dünyanın her yerinde aynı şekilde çalışması

gibi birçok avantajı yüzünden geniş kullanım alanı bulmuştur [74].

Wi-Fi ağlarının menzili kullanılan ortama göre oldukça değişik mesafelere ulaşmaktadır. Bu sinyal kalitesinin çevredeki yapılara bağlı olarak düşmesiyle alakalı bir durumdur. Sinyal seviyesindeki düşüş ile hız kaybı da oluşmaktadır. Teorik olarak 300 Mbit olarak ifade edilen hız çevresel faktörlere göre düşerek bağlantıda kayıplara veya kopmalara neden olmaktadır. Teorik olarak 1.5km ifade edilen hız kapalı alanlarda ve mevcut engellere bağlı olarak 300 metreye kadar düşmektedir [42].

2.5.7. HiperLAN

HiperLAN (High Performance Radio LAN), yüksek hıza sahip WLAN standardı olarak Avrupa ülkelerinde geliştirilmiştir. HiperLAN1 ve HiperLAN2 olmak üzere iki tipi vardır. Her iki tipte ETSI tarafından tanımlanmış olup, OFDM kodlama-modülasyon yöntemi ile 5 GHz bandında çalışmaktadır. HiperLAN'lar, 802.11 standartları ile benzer özellik ve kapasiteye sahiptir. HiperLAN1 1996 yılının başlarında geliştirilmiş olup; 5 GHz frekans bandında 20 Mbps data hızı sağlamaktadır. HiperLAN2 ise aynı frekans bandını kullanarak 54 Mbps data hızlarına ulaşabilmektedir. HiperLAN2'nin PHY1 katmanı 802.11a ile aynıdır ve iki grup ortak çalışma yürütmektedirler. 802.11a özellikle çoklu ortam (multimedia) uygulamalarını kısıtlarken, HiperLAN2 daha pahalı bir sistem olmakla birlikte yüksek veri oranlarıyla resim ve görüntü aktarımında daha iyi performans sağlamaktadır. HiperLAN'lar ATM teknolojisi esaslıdır ve 802.11 teknolojisinden daha iyi

servis kalitesine sahiptir. Mevcut WLAN uygulamaları içinde HiperLAN'ların en iyi alternatif teknoloji olduğu söylenebilir. Ancak henüz 802.11 teknolojisi kadar yaygın değildir. HiperLAN2 ağlarında AP'lerden uç sistemlere bağlantıya yönelik bir yaklaşım vardır; Bu yapı hizmet kalitesi kriterlerinin (QoS) sağlanmasına olanak vermektedir. Böylece, 802.11 kablosuz LAN uygulamalarının aksine ses ve görüntü aktarımı için gerekli iletişim türü desteklenebilmektedir. Tablo 2.8'de HiperLAN2 ile 802.11a standardı karşılaştırmalı olarak verilmiştir [38].

Tablo 2.8. Hiperlan2 ile 802.11a standardının karşılaştırması [38]

Özellik	HiperLAN2	802.11a
Brüt Aktarım Oranı	54 Mbps	54 Mbps
Net Veri Oranı	32 Mbps	32 Mbps
Frekans Bandı	5 GHz	5 GHz
Frekans Seçimi	Tek Taşıyıcı	DFS ile Tek Taşıyıcı
Ortama Erişim	TDMA/TDD	CSMA/CA
Şifreleme	DES, 3DES	40 bit RC4
Modülasyon Yöntemi	OFDM	OFDM

ETSI tarafından geliştirilen iki adet tamamlayıcı standart daha vardır. Bunlardan birincisi 25 Mbps veri iletişim hızına sahip Hiperaccess'dir. Bu standart kişisel kullanım ve küçük işyerleri için tasarlanmış ve noktadan çok noktaya yüksek hızlı erişim hedeflenmiştir. Frekans bandı olarak 40.5-43.5 GHz olması yönünde CEPT/ERC çalışma grubunda görüşmeler devam etmektedir [38].

İkincisi ise 2 GHz– 11 GHz frekansları arasında çalışacak geniş bant sabit kablosuz erişim (broadband fixed wireless access) sistemi olan Hiperman'dır. IEEE 802.16 standardının benzeri Hiperman iki gurubun yakın işbirliği ile hazırlanmaktadır [38].

Ayrıca, kısa mesafe ve çok yüksek veri hızlarında bağlantı sağlamak için Hiperlink isimli bir standart daha düşünülmektedir. Hiperlink'in, 17 GHz'de 150 metreye kadar mesafede 155 Mbps veri hızına ulaşması tasarlanmıştır. Ancak bu standart ile ilgili çalışmalar henüz başlamamıştır [38], [42],.

2.5.8. HiperMAN

HiperMAN, WiBro ve WiMAX (IEEE 802.16) standartlarına karşılık olarak, ETSI BRAN grubu tarafından bir WMAN standardı olarak geliştirilmiştir. Ağlar arasında 2-11

GHz frekans aralığında sabit geniş band kablosuz erişim (Fixed Broadband Wireless Access - FBWA) hedefleyen bir iletişim teknolojisidir [75-77].

HiperMAN, 256 nokta dönüşümü ile OFDM tekniğini kullanır. TDD (Time Division Duplex) ve FDD (Frequency Division Duplex) çoğullamalarının her ikisini de kullanır. Tipik kanal genişliği, kullanıma bağlı olarak 1.5MHz ile 28MHz arasında değişmektedir [77]. Anten kazancı, propagasyon ve çevresel faktörlere bağlı olarak veri iletim mesafesi NLOS koşullarda 2-4km ve LOS koşullarda 10km'ye kadar çıkabilmektedir [75], [77]. Noktadan - Çoklu Noktaya (Point-to-Multipoint - PTMP) ve Örgü (Mesh) ağ yapılarını destekler [76].

2.5.9. WiMAX

WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access - Mikrodalga Erişimi için Evrensel Uyumluluk), genişband erişim altyapısını kullanarak kablosuz hızlı internet erişimi sağlayan, IEEE 802.16 standartlarını kullanan teknolojinin adıdır. WiMax, verici antenden yaklaşık 50km mesafeye kadar bir etki alanı ve 75Mbps hızında iletişim sağlayan kablosuz bağlantı sistemidir [71], [78]. İlk sürümü Ekim 2001'de tamamlanan IEEE 802.16 standardı, WMAN teknolojisi olarak, kullanıcılara kablosuz ortamda ses ve yüksek hızda veri sağlamak amacıyla bir hava arayüzü ve Ortam Erişim Kontrolü (Media Access Control / MAC) sağlamaktadır. IEEE 802.16 standardı PMP mimarisinde çalışan kablosuz genişband erişim sistemlerinin modern sürümüdür. Daha sonra geliştirilen 802.16a/d sürümleri örülü ağ (Mesh Network) şebeke mimarisini de desteklemektedir. Başlangıç sürümü 10-66 GHz arasında çok sayıda çalışan kablosuz genişband erişim sistemlerin yayılım ihtiyacını karşılamak amacıyla geliştirilmiştir. Sonraki sürümlerin 2-11 GHz ve bunun ardından da 2-6 GHz arasında çalışan sistemler standartlaştırılmıştır [78].

2001 yılında geliştirilen ilk IEEE 802.16 standardı 10-66 GHz frekans aralığı için tasarlanmışken, 2003 yılının Ocak ayında 2-11 GHz frekans aralığını kapsayacak şekilde değiştirilerek IEEE 802.16a olarak adlandırılmış ve görüş hattı gerektirmeyen (NLOS) kullanım ihtiyaçlarına cevap verecek özelliğe kavuşturulmuştur. IEEE 802.16 standardındaki sonraki değişiklik 2004 yılının Haziran ayında IEEE 802.16-2004 (802.16d) standardı adı altında onaylanmış ve bu standart ile 802.16a, 802.16c ve ilk 802.16-2001 versiyonu kullanımdan kalkmıştır. IEEE 802.16-2004 standardı sadece sabit sistemlere yöneliktir. 07 Aralık 2005 tarihinde ise mobilite destekli IEEE 802.16- 2005

(802.16e) standardı onaylanmıştır. Tablo 2.9’da Wi-MAX teknolojisi standartları gösterilmektedir [78].

Tablo 2.9. Wi-MAX standartları [78]

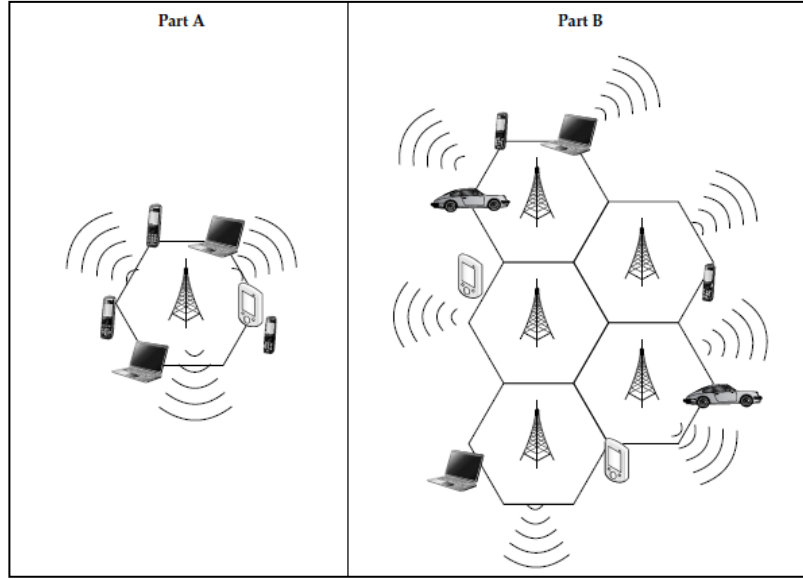
Standard	802.16	802.16a	802.16d	802.16e
Tamamlanma Tarihi	Ekim 2001	Ocak 2003	Haziran 2004	Aralık 2005
Spektrum	10–66 GHz	11 GHz’e kadar	11 GHz’e kadar	6 GHz’e kadar
Çalışma Şekli	LOS	NLOS	NLOS	NLOS
İletim Hızı	32–134 Mbps	70 Mbps’e kadar	70 Mbps’e kadar	15 Mbps’e kadar
Hücre Yarıçapı	5 Km’ye kadar	8 Km’ye kadar	8 Km’ye kadar	5 Km’ye kadar

2.5.10. GSM

GSM (Global System for Mobile – Mobil İletişim için Küresel Sistem), cep telefonu iletişim protokolünün adıdır [37]. GSM farklı ülkelerde kolayca uyarlanabilir bir standart olarak yaygın kullanılan bir dijital ses ve veri hizmetidir.

Şekil 2.8’de hücresel ağ ve kablosuz alıcının hücresel ilişkisi gösterilmektedir. A’da hareketlilik tek hücre sınırları içerisinde nasıl olduğu gösterilmektedir. B’de hareketliliğin daha fazla hücre ve mobil kullanıcı eklendiğinde hücreler arasında dolaşımın nasıl olacağı gösterilmektedir [6].

2G GSM teknolojisi dünyanın büyük bölümünde 900-1800 MHz frekans bantlarında faaliyet göstermektedir [6].



Şekil 2.8. Bir cep telefonu şebekesinde hücreler ve kablosuz alıcı cihazının ilişkisi [6]

2.5.11. UMTS (3G)

3G (3rd Generation - Üçüncü Nesil iletişim) görüntü ve ses ağırlıklı iletişim için geliştirilmiş teknolojinin adıdır [37]. The Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); çeşitli ad veya markalar tarafından çeşitli uygulamalar için kullanılan bir 3G cep telefonu standardıdır.

2.5.12. 4G

Gezgin yeni veri servislerindeki güncel gelişmeler, değişik kablosuz ve kablolu ağların bir arada var olmalarını gerektirmektedir. Ancak, bunlardan hiç biri genel bir çözüm olarak değişik sebeplerden dolayı düşünülememektedir. Bu sebepler genel olarak, çözümlerin belirli bir grup servis ve uygulamaya yönelik olması, belirli bir coğrafik kapsama alanında uygulanabilmesi, belirli bir bant genişliği ve gecikme ile çalışmalarından kaynaklanmaktadır. Üstelik, bu veri ağları arasında her hangi bir entegrasyon bulunmamaktadır; her biri kendi fiziksel erişim teknolojisine, kullanıcı kimlik doğrulama mekanizmasına ve gezgincilik yönetim prosedürlerine sahiptir. Bu durum, dünyanın her tarafındaki araştırmacıları 4G ağlarının araştırılmasına yöneltmiştir [79].

4G ağların yüksek hız, yüksek kapasite, bit başına düşük maliyet, IP tabanlı servisler gibi özellikleri içermesi tasarlanmaktadır. 4G sistemlerinin hepsi açık sistem yaklaşımına dayalı birleşik ve global bir ağıdır. 4G ağlarının amacı, mevcut merkezi hücresel ağları, IP tabanlı dünya çapında tek bir merkezi hücresel ağ standardında birleştirmektir. Bu yeni

ağın, kontrol, video, IP üzerinde ses gibi birçok servisi desteklemesi planlanmaktadır. Ancak, 3G tamamen hayata geçmediğinden, araştırmacılar 2010 yılında hayata geçmesi planlanan bu yeni “kablosuz dünyaya” kendi fikir ve çalışmaları ile katkıda bulunmaya çalışmaktadırlar [79].

4G kablosuz ağların, hava ara yüzünde 20 Mbit/s ile 100 Mbit/s arasında veri iletim oranını desteklemesi beklenmektedir. 4G ağlarına yönelik, izlediğin kadar öde, evden alışveriş, elektronik ticaret ve çevrim içi veri dağıtımı gibi yeni yayınlar ve veri uygulamaları düşünülmektedir veya geliştirilmeye başlanmıştır. Bir de, Internet’in hızlı büyümesi ve bütün dünyada kabul görmesi, güvenli ve yüksek bant genişliğine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır [79].

4G yerel alan ağları trenler, kamyonlar, binalar veya rasgele organize olan ve bir birinin radyo etki alanı içerisinde kalan cihazların kurulumundan oluşmaktadır. Bu tür ağlarda yönlendirme işlemi yeni mimarilerin yapısına bağlı olmaktadır [79-81].

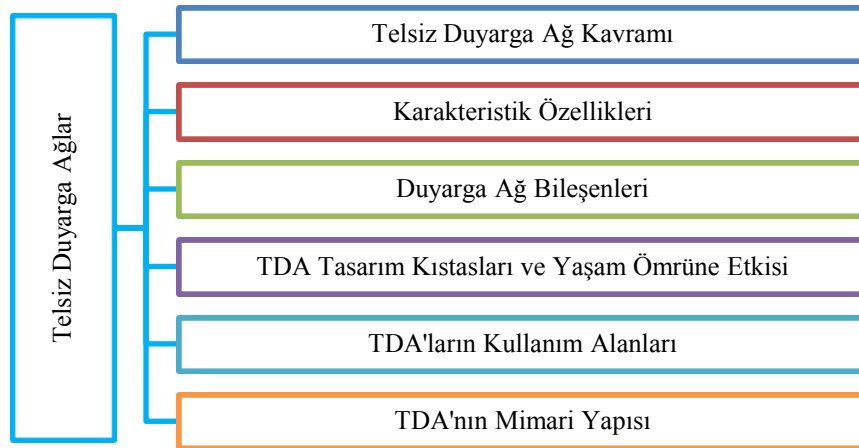
3. TELSİZ DUYARGA AĞLAR

3.1. Giriş

Telsiz Duyarga Ağlar (TDA) 21. yüzyılın en önemli teknolojilerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır [82]. Kablosuz teknolojideki gelişmeler ile mikroçip teknolojisindeki gelişmeler sayesinde çok küçük boyutta ve bir duyarga ile bütünleştirilmiş, tümleşik devre tasarımının mümkün olması TDA'ların uygulama alanını genişletmiştir [21], [23], [83].

Bu doktora çalışmasında kullanılan telsiz duyarga ağ kavramı [4], [84-85], literatürde yapılan çalışmalarda kablosuz algılayıcı ağ [86], tasarsız duyarga ağ [87], kablosuz duyarga ağ [88] olarak da adlandırılmıştır. Bu çalışmada ağ topolojisinin tamamen rastgele oluşması, kullanılan duyargalarda sadece radyo frekansları üzerinden iletişimin gerçekleşmesi, duyargalarda herhangi bir uydu veya GPS bağlantısının olmayışı gibi nedenlerden ötürü telsiz duyarga ağ (TDA) kavramının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

Bu bölümde duyargaların yapısı, TDA'lar ve tasarım kısıtları anlatılarak, duyarga ağ mimari yapısı üzerinde durulmuştur. Böylece tez projesinin uygulama alanı içerisinde temel unsurlar olan duyarga ve duyarga ağ kavramlarının daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir. Bu bölümde ele alınan konular Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. TDA'lar ile ilgili konular

3.2. Telsiz Duyarga Ağ Kavramı

TDA, farklı konumlardaki fiziksel veya çevresel koşulları (sıcaklık, ses, basınç, hareket, kirlilik vb. gibi) işbirliği ile izlemek için ağlar kullanan, dağıtık cihazlardan

oluşan bir ağ olarak tanımlanabilir [1-2], [82]. TDA'lar askeri güvenlik bölgeleri, doğal yaşam alanları, ev ve işyeri gibi çok sayıda ortamda uygulanabileceği gibi taşınabilen ve hafif duyargaların tasarımı TDA'ların medikal alan gibi farklı alanlara da uygulanabilmesini olanaklı kılmıştır [89]. Bu ağlarda belirli bir alana dağılmış her bir duyarga veri toplama ve veriyi belirli bir hedefe yönlendirebilme kapasitesine sahiptir. Hedef duyargaya gönderilen veriler burada analiz edilebilir ya da internet, uydu bağlantısı yolu ile uzak noktalara gönderilebilmektedir.

1950'li yılların başlarında TDA'ların ilk örnekleri askeri alan üzerindeki çalışmalar ile başlamıştır. Yapılan çalışmada Atlantik okyanusunda deniz altını gözetlemek için Ses Gözetim Sistemi adı verilen projede akustik duyargalar kullanılmıştır. Sonrasında sistem iyileştirilerek Entegre Denizaltı Gözetim Sistemi (Integrated Undersea Surveillance Systems - IUSS) ile geliştirilmiş ve Birleşik Devletlerin deniz altı koruma sistemi olarak kullanılmıştır [7].

TDA (Wireless Sensor Network - WSN) kavramı tam olarak 1980'lerin başlarında ortaya çıkmıştır. 1990'lı yıllarda kablosuz haberleşme sistemlerindeki gelişim ile birlikte TDA'lar önemli bir araştırma alanı haline gelmeye başlamıştır [7], [90].

1980'li yılların başından 1990'lı yıllara kadar yerleşik kara radar sistemleri ve hava sahası uyarı kontrol sistemi olarak bilinen AWACS sistemlerinin içerine entegre edilmiş TDA'lar ile hava gözetim, kontrol ve iletişimi sağlanmış, AWACS uçaklarının üzerinde bulunan radarlar ile 300km uzaktaki hareketli bir hedefin algılanması sağlanmıştır. Sistem geliştirilerek geniş alanda çoklu radar düzenekleri arasında kurulan bağlantı ile ordu duyarga ağı geliştirilmiştir [91].

TDA'lar üzerinde yapılan diğer bir çalışma ise Vietnam savaşında kullanılmak üzere Amerikan Hava Kuvvetleri tarafından geliştirilen Air Delivered Seismic Intrusion Detector (ADSID) sistemidir. Yol boyunca yerleştirilen duyargalar hareket eden nesnelerin titreşimini algılayarak doğrudan alıcı uçağa iletmekteydi [7], [90].

TDA'ların ilk uygulamaları oldukça yüksek güç tüketmekte ve çok ağır olması ve yaşam ömürlerinin sadece birkaç hafta ile kısıtlı olması en önemli dezavantajı olarak görülmektedir [7]. Önceleri askeri alanda kullanılmakta olan bu ağlar teknolojinin ilerlemesine paralel olarak maliyetlerin düşmesi ile birlikte duyargaların kabiliyetlerinin artması sonucunda geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur [1].

1996 yılında UCLA ve Rockwell Bilim Merkezi tarafından üretilen düşük güçlü kablosuz mikro duyargalar (LWIMs) ile kablosuz duyargalar ticari alanlarda da

kullanılmaya başlanmıştır [92]. Üzerinde çok sayıda duyarga barındıran LWIM, elektronik arayüz, kontrol ve iletişim birimleri tek bir aygıtta toplamayı başarmıştır. Duyarga ağların en önemli sorunu olan güç tüketimi konusunda da gelişim sağlanarak LWIM ile 1mW verici üzerinden 10 metrelik bir alanda 100Kbps kablosuz iletişimi sağlanabilmekteydi [93].

1998 yılında yine UCLA ve Rockwell Bilim Merkezi, ikinci nesil duyarga düğümü olan Entegre Kablosuz Ağ Duyargalarını (Wireless Integrated Network Sensors - WINS) üretti [92]. WINS, 32 bitlik Intel Strong ARM SA1100 işlemci (1 MB SRAM ve 4 MB flash hafıza), 1 ile 100mW arasında ayarlanabilen güç tüketimi ile 100Kbps kablosuz iletişimi destekleyen bir radyo kartı ve bir duyarga kartı barındırmaktaydı. İşlemcinin aktif güç tüketimi 200mW seviyesindeyken uyku halinde güç tüketimi 0.8mW civarındaydı [94].

1999 yılında Berkley Üniversitesinde geliştirilen Smart Dust projesi ile WeC adı verilen duyarga düğümü üretildi. WeC, 8 bitlik 4 MHz hızında aktif güç tüketimi 15mW, pasif güç tüketimi 45µW olan Atmel Mikro denetleyici (512b Ram 8Kb Flash hafıza) üzerinde barındırmaktaydı. Aynı zamanda WeC 10Kbps hızında kablosuz veri iletişimini 36mW verici ve 9mW alıcı güç tüketimi ile desteklemekteydi [95].

2001 yılında ise Mica, Mica2, Mica2Dot ve MicaZ ürün grupları Mica ailesi olarak kullanılmaya başlandı. Mica 8 bit 4 Mhz hızındaki ATmega103L işlemcisini kullanmaktayken önceki duyarga düğümlere kıyasla daha üstün bir kapasiteye sahip olduğu kabul edildi. Mica 4Kb Ram ve 128 Kb flash hafızası ve basit bit düzeyinde radyo kullanan RFM TR1000 ile neredeyse WeC ile aynı güç tüketim değerleriyle 40Kbps kablosuz veri iletişimine olanak tanımaktaydı. Mote mimarisi, birden fazla değişik türevde duyarga, veri erişim kartı veya ağ ara yüz kartı monte edilmesine izin veriyordu [94], [96], [97].

2002 yılında Mica2 ve Mica2Dot düğümleri, 33mW aktif ve 75µW pasif güç tüketimine sahip, ATmega128L mikrodenetleyicisi ile kullanılmaya başlandı. Radyo modülünü de daha geniş frekans seçeneği sunan ve FSK modülasyonu kullanarak gürültü düzeyini düşüren Chipcon CC1000 modülü ile değiştirildi. Bundan bir yıl sonra MicaZ, 802.15.4/ZigBee protokolü destekleyen, 250Kbps üzeri kablosuz veri iletişimi sağlayan Chipcon CC2420 geniş band modülüyle üretildi. Bu modül aynı zamanda tümleşik olarak şifreleme ve kimlik doğrulamayı da destekliyordu [94], [97].

Motes ailesinin diğ er bir ürünü olan Telos 2004 yılında üretildi [96-97]. 3mW aktif, 15 W pasif g   tüketime sahip Texas Instruments firmasının mikro denetleyicisini kullanan Telos oldukça düşük güç t ketimeyle dikkat çekmiştir. Bununla birlikte maliyeti düşüren PCB üzerinde tümleşik anten, PC ile kolay iletişim kurmayı sağlayan tümleşik USB bağlantı arayüzü, entegre nem, sıcaklık ve ışık algılayıcısı, kimlik tanımlama için 64 bit MAC adresleme Telos ile sunulan yeniliklerdendir [96].

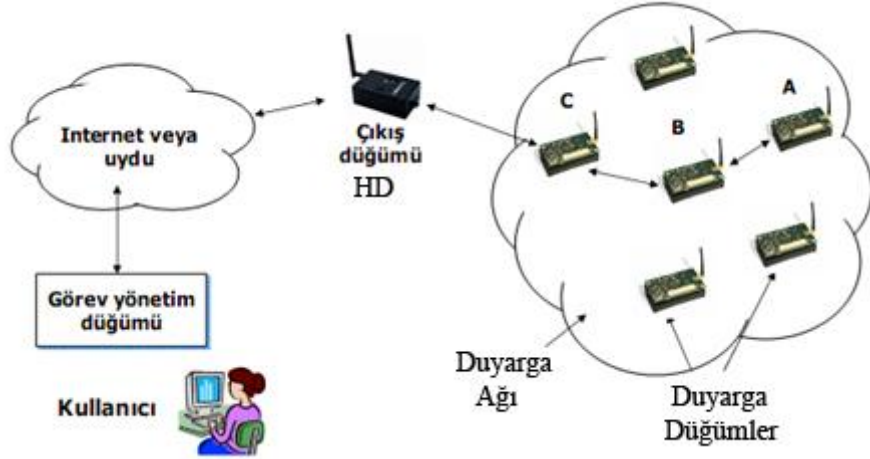
2002 yılında Medusa MK-2 adı verilen duyarga d   m  CENS (Center of Embedded Networked Sensing) tarafından geli tirilmitir. MK-2 de iki adet mikrodenetleyicisi bulunmaktaydı. Bunlardan birisi düşük işlem kapasitesi gerektiren işlerde, radyo bandı işleme ve algılanılan bilgilerin  rneklelenmesinde kullanılırken diğ er mikrodenetleyicisi (ise daha fazla güç gerektiren karmaşık işlemlere ayrılmıştır. Bu iki farklı özellikte mikro denetleyicinin bir araya gelmesiyle TDA'larda, yüksek hız ve uzun pil ömrü ihtiya ı gerektiren ortamlarda esnek bir kullanım sağlanmıştır [92].

2003 yılında Berkley Kablosuz Araştırma Merkezi (BWRC) gücünü güneşten ve titreşim sinyallerinden alan ilk kablosuz verici olan PicoBeacon'u üreterek kablosuz düğümlerin önemli bir sorunu olan enerji tüketime konusunda tasarruf sağlamıştır. Entegre edilen RF modülü 400 W'tan daha az g   tüketmekteydi. Yoğun ışıklı bir ortamda %100, karanlık bir ortamda titreşime bağlı olarak %2.6 işlem kapasitesiyle çalışmaktaydı [92], [98].

2004 yılından günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, zaman ve yakıt tasarrufu sağlamak amacı ile geliştirilen akıllı trafik uygulamaları [99], gürültü ve kirliliğin önüne geçilmesi, ayrıca atıkların kontrolü için izlenmesi amacı ile geliştirilmiş akıllı  ehir uygulamaları [100], tarım arazilerinin ve seraların kontrolü amacı için geliştirilmiş uygulamalar [101], TDA'ların yaşam ömrünü uzatmak amacı ile güneş enerjisinin kullanımına yönelik çalışmalara yoğunla ıldığı görülmektedir [102].

3.3. Duyarga Ağların Karakteristik  zellikleri

Duyarga ağ temel elemanları sezme, veri işleme ve haberleşme özelliğine sahip algılayıcı d   mlerdir. Duyarga ağlar herhangi bir kablo olmaksızın, izleyecekleri ortama rasgele saçılmış halde bulunmaktadır [93]. Şekil 3.2'de bir duyarga ağ mimarisi karakterize etmektedir.



Şekil 3.2. Duyarga ağ mimarisi

Şekil 3.2’de görülebileceği gibi veri 3 seviye de işlenmektedir.

- İzlenilecek ortamda ki olaylar, duyarga düğümler tarafından algılanır. Her bir duyarga düğüm elde ettikleri veriyi ayrı ayrı işlemektedir.
- İkinci seviye de her düğüm algılayıp, işledikleri veriyi komşularına yollamaktadır.
- Duyarga ağ haberleşmesinde ki en üst katman, işlenmiş veya ham verinin hedef düğüm olarak da adlandırılan merkez düğüme yollanılması aşamasıdır.

TDA’ları daha iyi anlamak ve yapılacak çalışmalara ışık tutması amacıyla duyarga ağların dikkat edilmesi gereken karakteristik özelliklerinin çıkarılması gerekmektedir. TDA’ların karakteristik özellikler [3-4];

- Kablolu ağlara göre çok yüksek miktarda haberleşen düğüm bulunmaktadır.
- Duyarga düğümleri haberleşme alanına yoğun bir biçimde yerleştirilmiş olabilir. Bu da bir düğümün birçok komşusunun olabileceği anlamına gelmektedir.
- Duyarga düğümleri sınırlı miktarda enerjiye sahiptir ve genellikle bu enerjinin yenilenmesi mümkün olmamaktadır.
- Duyarga ağların işlem kapasitesi sınırlıdır.
- Hata yapma ve hizmet dışı kalma olasılığı çok yüksektir.
- Ağ topolojisi gezginlikten ve hatalardan dolayı sıklıkla değişmektedir.
- Duyarga ağlarında noktadan noktaya haberleşme yerine çoğunlukla yayın haberleşme teknikleri kullanılmaktadır.

- Duyarga düğümlerin kendilerine ait özel bir tanımlayıcı numarası (ID) bulunmayabilir ki bunun yerine günümüz ağ yapısında MAC ve IP adresleri kullanılmaktadır [27], [83], [93].

3.4. Duyarga Tipleri

Duyarga ya da sensör adı verilen cihazlar çeşitli enerji biçimlerini elektriksel enerjiye dönüştürmektedir. Literatürde bu terimler için “ölçülebilen fiziksel özellik, miktar ve koşulları kullanılabilir elektriksel miktara dönüştüren bir araç” tanımı yapılmaktadır [56].

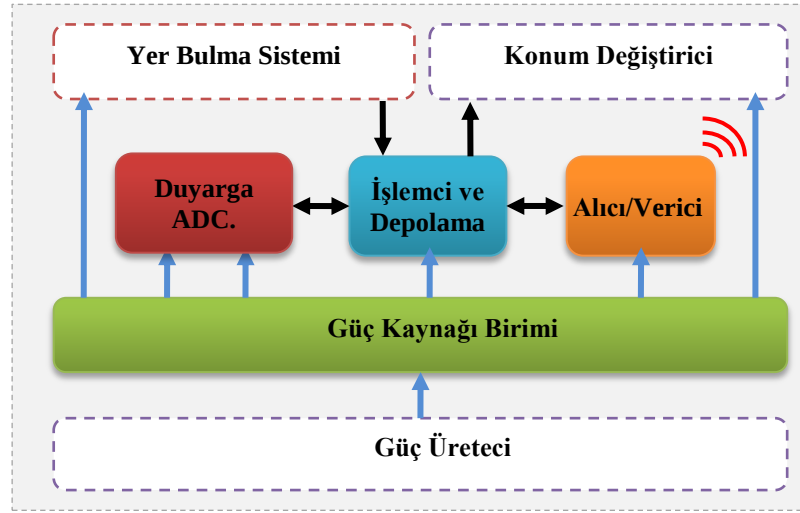
Ölçülmek istenen niceliği algılama şekillerine göre duyargaları üç ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür. Bunlar [27], [103]:

- **Aktif Duyargalar:** Radar veya sonar duyargaları bazı sismik duyargaları bu gruba örnek vermek mümkündür. Bu duyargalara sürekli çalışarak algılama sürecini kesintisiz olarak yaptıkları için aktif duyargalar denilmektedir.
- **Pasif, her yöne açık (yönsüz) duyargalar:** Isı, basınç ve nem gibi değerleri ölçmek için kullanılan duyargaları bu gruba örnek vermek mümkündür. Bu duyargalarda yön kavramı yoktur. Bu duyargalar, ortamdan algıladığı değerleri dışarıdan herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan kendi üzerindeki enerji kaynakları ile elektriksel sinyallere dönüştürmektedir.
- **Pasif, dar ışınlı duyargalar:** Kamera gibi bir yönden gelen bilgileri algılayan duyargalar bu gruba girmektedir. Bu yüzden ölçüm yönlü olarak yapılabildiği için bu gruba giren duyargalara dar ışınlı duyargalar denilmektedir.

TDA’lar üzerinde kullanılan duyargaların düğümlerinin belli bir kapsama alanı vardır. Bu düğümler kapsama alanı içerisinde algıladıkları bilgiyi raporlama yeteneklerine sahiptir [104-105].

3.5. Duyarga Mimarisi

Duyargalar temel olarak algılayıcı, işlemci, alıcı/verici ve güç birimi olmak üzere dört ana birim ve bunlara ek olarak kullanım amacı doğrultusunda bir düğümün, yer bulma sistemi, güç kaynağı, konum değiştirici gibi ek birimlerden oluşmaktadır [1]. Şekil 3.3’de bir duyarga düğümünün yapısal bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Bir duyarga düğümünün yapısal bileşenleri [1]

3.5.1. İşlemci

İşlemci, duyargalardan alınan bilgiyi işlemek ile görevlidir. Ayrıca düğüm içerisindeki diğer bileşenlerin işlevselliğini denetler. İşlemcinin bir diğer görevi ise toplanılan bilgiyi nereye ne zaman göndereceğine karar vermektir. Ayrıca işlemciler diğer duyarga düğümlerinden veri alarak nasıl işlem yapılacağına karar verir. İşlemciler kritik sinyal işlemi ve iletişim protokollerine göre değişen çeşitli programları çalıştırmak ile yükümlüdür. [18] İşlemciler aynı zamanda duyargaların uyku durumunu da kontrol ederek güç sarfiyatını önleme konusunda da görevlidir [3]. Bunlara ek olarak işlemcilerin programlanabilmesi esneklik kabiliyeti kazandırmaktadır [106]. Şekil 3.4’de bir TDA’larda kullanılan bir işlemci örneği görülmektedir.



ATMEGA128

Şekil 3.4. İşlemci

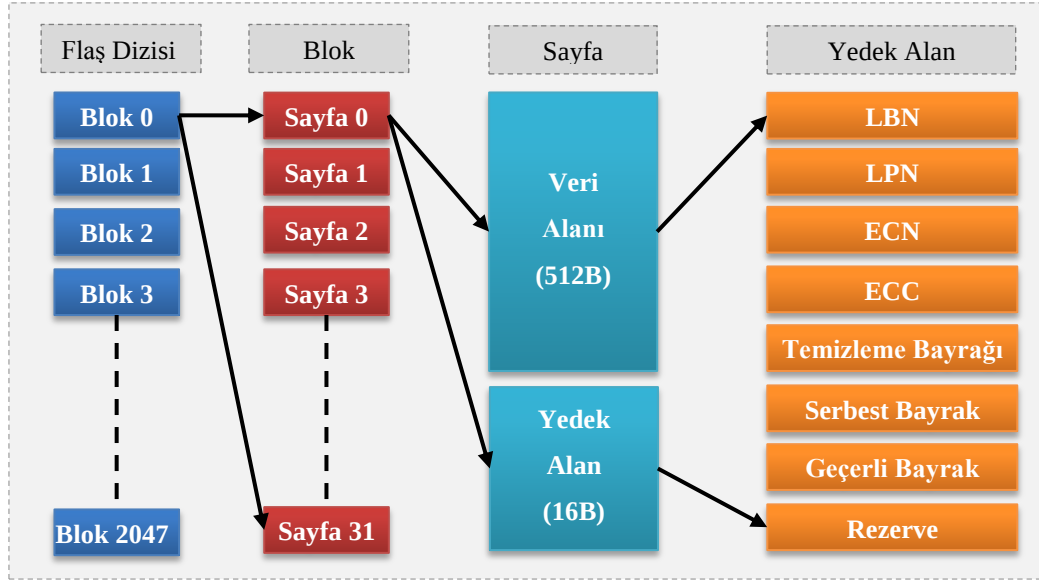
Genel amaçlı masaüstü mikroişlemci, sayısal sinyal işlemciler (SSİ), alanı programlanabilir geçit dizileri (FPGA) ve uygulamaya özgü tümleşik devreler işlemci olarak kullanılabilecek alternatiflerdir. Ancak diğer aygıtlara bağlanmadaki esneklikleri, programlanabilir olması, bu aygıtlar uyuma moduna girebildiği ve sadece denetleyicinin bir kısmının etkin olması nedeniyle düşük enerji tüketimi nedeniyle gömülü sistem

uygulamaları için mikrodenetleyiciler en uygun seçimdir [21], [107]. Genel amaçlı mikroişlemciler mikrodenetleyicilerden daha fazla enerji harcamaktadır. Sayısal sinyal işlemciler (SSİ) ise geniş bant kablosuz iletişim uygulamalarında kullanılmaktadır. SSİ'ler iletişiminin ve sinyal işleme süreçlerinin karmaşık olması nedeni ile TDA'larda tercih edilmemektedir [21]. FPGA'lar ise gereksinimlere göre tekrar programlanabilme ve yapılandırılabilme avantajları olmasına karşın bu işlemlerin bu zaman ve enerji tüketimine yol açması yüzünden TDA uygulamalarında çok fazla kullanılmamaktadır [27].

3.5.2. Bellek / Depolama Ünitesi

Duyargalardan iletilen bilgilerin depolanması ve diğer duyarga düğümlerden gelen paketlerin saklanması amacı ile duyarga düğümleri bir depolama ünitesine ihtiyaç duymaktadır. Duyarga ağın kullanım alanına göre depolama şekli değişiklik göstermektedir. Örneğin anlık veriyi ana düğüme transfer etmesi gereken sistemlerde kullanılacak belleğin kapasitesi ile veriyi uzun zaman aralıkları sonrasında ana düğüme transfer eden sistemlerin bellek gereksinimleri birbirinden farklı olacaktır. Bu yüzden duyarga düğümlerde kullanılacak olan bellek tipinin seçimi son derece önemlidir. Bazı sistemlerde yapılacak hesaplamalar için depolama ünitesinin kapasitesi önemli bir gereksinimdir. Mikro disk üzerinde depolama yapan düğümlerde mevcuttur. Bunlar nispeten daha büyük fiziksel boyutlara sahiptir. Bellek seçiminde ilk seçenek giderek azalan maliyetleri ve yüksek kapasiteleri ile flash belleklerdir. Ancak bunların aynı fiziksel bölgeye kaç sefer yazma/silme işlemi yapabileceği kuşkuludur. İkinci seçenek, nanoelektronik tabanlı MRAM'lerdir bunların da yakın gelecekte, çok sayıda alanda kullanıma destek vermesi beklenmektedir. Bellek tipi ne olursa olsun asıl hedef az sayıda bağlantı kurup enerji sarfiyatını az tutmak ve bağlantının süresini olabildiğince kısa tutmaktır [93].

32 Mb kapasiteli bir bellek birimin mimari yapısı Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Flash bellek birimleri blok adı verilen eşit büyüklükteki silme birimlerine ve her blok sayfa olarak isimlendirilen okuma yazma birimlerine bölümlendirilmiştir. Her sayfa veri alanı ve yedek alan olarak iki birimden oluşur. Yedek alan ise, lojik blok numarası, lojik sayfa numarası, silme sayıcı numarası, hata doğrulama kodu, temizleme bayrağı kullanılan/serbest bayrağı ve geçerli bayrak birimi bilgisini barındırır [108].



Şekil 3.5. Flaş bellek mimarisi

3.5.3. Duyarga

Duyargalar ortamın sıcaklık, basınç gibi fiziksel büyüklüklerini ölçebilen donanım aygıtlarıdır. Duyargalar alandaki fiziksel veriyi ölçme veya algılamak ile görevlidir. Duyargalar tarafından algılanan analog veriler sayısal hale getirilerek mikro denetleyicilere gönderilmektedir. TDA uygulamalarında duyarga seçimi yaparken düğümlerin küçük boyutlarda, düşük enerji tüketimli, her türlü çalışma ortamında çalışabilecek özelliklere sahip olması tercih sebebidir [1], [21]. Şekil 3.6'da örnek bir duyarga düğümü görülmektedir



Şekil 3.6. Duyarga düğümü

Duyargalar güç tüketim kaynakları olarak;

- Sinyal örnekleme ve fiziksel sinyalleri elektrik sinyallerine çevirme,
- Sinyal iyileştirme

- Analog verinin sayısal veriye çevrilmesi sayılabilir [109].

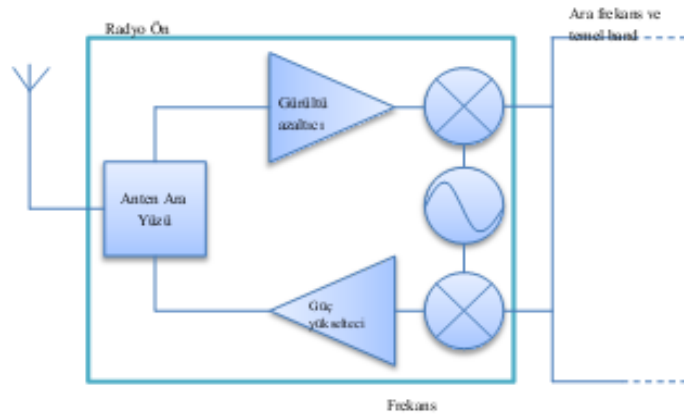
Duyargaları; ölçülen büyüklük, çıkış büyüklüğü ve besleme ihtiyacına göre sınıflandırmak mümkündür:

- **Ölçülen Büyüklüklerine Göre Sınıflandırma:** Algılayıcılarla ölçülen büyüklükler 6 gruba ayrılabilir [92-93].
 - **Mekanik:** Uzunluk, alan, kütleli akış, kuvvet, tork (momentum), basınç, hız, ivme, pozisyon, ses dalgaboyu ve yoğunluğu
 - **Termal:** Sıcaklık, ısı akısı
 - **Elektriksel:** Akım, gerilim, direnç, endüktans, kapasite, dielektrik katsayısı, polarizasyon, elektrik alan şiddeti ve frekans
 - **Manyetik:** Manyetik alan şiddeti, akı yoğunluğu, manyetik moment, manyetik geçirgenlik katsayısı
 - **Işıma:** Yoğunluk, dalgaboyu, polarizasyon, faz, yansıtma, gönderme
 - **Kimyasal:** Yoğunlaşma, içerik miktarı, oksidasyon/redaksiyon, reaksiyon hızı, pH değeri,
- **Çıkış Büyüklüklerine Göre Sınıflandırma:** Analog ve Dijital olarak ikiye ayrılırlar. Analog çıkışlara alternatif olan dijital çıkışlı algılayıcılar, bilgisayarlarla doğrudan iletişim kurabildiklerinden günümüzde daha çok tercih edilmektedir. Bilgisayarlarla bağlantılarda RS232, RS422, RS485 gibi çeşitli protokoller kullanılır [92].
- **Besleme İhtiyacına Göre Sınıflandırma:** Algılayıcılar besleme ihtiyacına göre iki sınıfa ayrılabilir [6].
 - **Pasif Algılayıcılar;** Hiçbir şekilde dışardan harici enerji almadan (besleme kaynağına ihtiyaç duymadan) fiziksel ya da kimyasal değerleri bir başka büyüklüğe çevirirler. Bu algılayıcı tipine örnek olarak termocouple (T/C) ya da termik anahtar gösterilebilir.
 - **Aktif Algılayıcılar;** Çalışmaları için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. Bu algılayıcılar tipik olarak zayıf sinyalleri ölçmek için kullanılırlar [56].

3.5.4. Alıcı / Verici

Duyarga düğümlerinin dışarıdan ve alması ve dış ortama veri göndermesi için kullanılan birime Alıcı/Verici birimi denilmektedir. Alıcı/Verici birimleri iletişimi çift yönlü kurabileceği gibi tek yöne iletişimde söz konusu olabilir. Duyarga düğümlerinin birbirleriyle haberleşebilmesi için optik (Lazer), kızılötesi (IR) ve RF dalgalar gibi iletişim yöntemlerini kullanabilir [6], [97].

Atmosfer koşullarından etkilenme ve tek yönlü iletişim kurabilme gibi dezavantajlarından dolayı lazer ve kızılötesi iletişim TDA uygulamalarında tercih edilen yöntemlerden değildir [19]. RF dalgalar kullanım kolaylığı, bütünlük ve ticari olarak yaygın kullanım gibi avantajları nedeniyle tercih TDA uygulamalarında tercih edilmektedir [19]. RF'in en önemli dezavantajı ise anten gereksiniminin olmasıdır. İletimin ve alımın sağlıklı yapılabilmesi için minimum anten uzunluğunun $\lambda/4$ olması gerekmektedir. Buda duyarga düğümünün boyutunu arttırmaktadır [92], [109]. Şekil 3.7'de alıcı/verici biriminin ön uç birimi görülmektedir. Bu birim geçerli radyo frekans bandında analog sinyal işleme görevi üstlenmektedir. Hemen gerisinde bulunan ara frekans ve temel bant işleme birimi ise dijital platformda sinyal işleme ve duyarga düğümünün işlemcisi veya diğer dijital devre birimi ile iletişimi sağlamakla görevlidir. Güç yükselteci birimi dönüştürülmüş sinyali alarak yükseltip antene iletir. Gürültü azaltıcı yükselteç ise antenden gelen sinyali alarak ortam gürültüsünü önemli ölçüde azaltıp geçerli veri sinyalinin genliğini arttırarak işlenmek üzere ilgili birime iletir. Osilatör ve karıştırıcı birimleri ise sinyali RF spektrumundan orta düzey frekansa veya temel bant frekansına dönüştürme işlemlerinde kullanılır.



Şekil 3.7. RF ön birim blok şeması

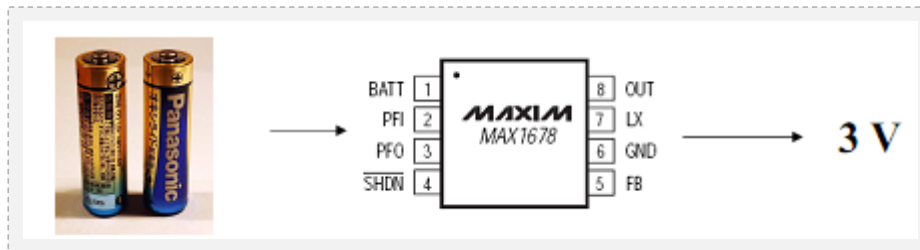
TDA'lar, 433MHz ve 2.4GHz arasındaki iletim bandını kullanmaktadır [82]. Genellikle alıcı ve vericinin işlevselliği alıcı/verici adı verilen tek bir üniteye birleştirilmiştir. Alıcı/verici üniteleri dört farklı modda çalışırlar. Bu modlar [85]:

- **İletme (Transmit) Durumu:** Alıcı-verici biriminin verici kısmının aktif olduğu ve antenden enerji yaydığı durumdur.
- **Alma (Receive) Durumu:** Alıcı kısmının aktif olduğu durumdur.
- **Boş (Idle) Durumu;** Alıcı-vericinin veri almaya hazır olduğu fakat aktif olarak veri almaya başlamadığı durumdur. Boş durumunda alıcı-verici biriminin birçok kısmı aktif durumdadır.
- **Uyku (Sleep) Durumu;** Alıcı-vericinin birçok önemli biriminin kapalı halde beklediği durumdur.

Günümüzde kullanılan duyarga düğümlerinde alıcı/verici üniteleri bu dört modun hepsini desteklemekte ve modlar arasında otomatik geçiş yapabilmektedir [51]. Alıcı/Verici biriminin boşta çalışmada harcadığı güç yaklaşık olarak alma modundaki enerji tüketimine eşittir. Bu yüzden herhangi bir işlem yapmayan alıcı/vericileri boş moda bırakmak yerine kapatmak enerji verimliliği açısından en iyi çözüm olacaktır. Yine paket iletimi yapılırken uyku modundan iletime moduna geçerken önemli miktarda enerji tüketimi olmaktadır. Bu yüzden uyku modu ile iletim modu geçişlerini uygun algoritmalar ile düzenlemek son derece önemlidir [47], [106], [108].

3.5.5. Güç Kaynağı

Duyarga ağların işlevselliğini sürdürebilmesi için en önemli birim güç kaynağıdır. Duyarga ağların gelişimindeki en büyük kısıtlamanın enerji olduğu bilinmektedir. Şekil 3.8'de güç kaynağı modülü gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Güç kaynağı modülü

Duyarga ağlarda enerji kaynağı olarak genellikle piller kullanılmaktadır. Ayrıca duyarga düğümlerinde yenilenebilir (güneş enerjisi, ısı enerjisi, titreşim enerjisi vb. gibi) enerji kaynaklarını da kullanılması konusunda çalışmalar yapılmaktadır [110].

Duyarga düğümlerinde güç kaynaklarının kısıtlı olması ve duyarga düğümlerinin yaşam ömürlerinin uzun olabilmesi için çeşitli güç yönetim politikaları kullanılmaktadır. Duyarga düğümlerinde yaygın olarak kullanılan iki güç yönetim politikası vardır. Bunlar [94], [109];

- **Dinamik Güç Yönetimi (Dynamic Power Management - DPM):** Duyarga çalışırken kullanılmayan veya etkin olmayan birimlerin uyku modunda veya kapalı tutulması ve bu sayede güç sarfiyatının azaltılmasını sağlamak.
- **Dinamik Voltaj Ölçeklendirme (Dynamic Voltage Scaling - DVS):** Duyarga düğümünün anlık iş yüküne bağlı olarak güç seviyesini belirlenmesi ile duyarga düğümünün çalışma gerilimi, frekans ile birlikte değiştirilerek güç sarfiyatının azaltılması mümkündür. Duyarga düğümünün yoğun çalışmadığı durumlarda gerilimi ve frekansı düşürülerek daha az güç harcanmasını sağlanmaktadır.

3.6. Telsiz Duyarga Ağ Tasarım Kısıtları

Bir TDA'da güç tüketimini etkileyecek birçok faktör bulunmaktadır. Bir TDA oluşturulurken dikkat edilmesi gereken önemli koşullar şu şekilde özetlenebilir [35], [37], [46];

- Ağ üzerinde kullanılacak duyarga adedi
- İletilecek olan bilginin çözünürlüğü ve bant genişliği
- Duyargalarda kullanılan pilin gücü ve ömrü
- Duyarganın büyüklüğü ve montaj edilebilirliği
- Dinamik uygulamalar için veri saklanabilmesi
- Kullanılan duyarganın kapsama alanı
- Kullanılacak bilgi iletim standardı

Bir TDA'da oluşturulurken mimariyi etkileyecek birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar [1], [31], [82];

- Güç tüketimi
- Genişleyebilirlik
- Hata toleransı

- Ölçeklenebilirlik
- Üretim maliyetleri
- Donanım kısıtları
- Örnekleme oranı ve veri hızı
- Gerçek zaman senkronizasyonu
- Ortam şartları
- Giyilebilir veya taşınabilirlik
- Güvenlik
- Düğümlerin hareket edebilirliği
- Çoklu gönderim

Bu maddeler ışığında bir TDA oluştururken dikkat edilmesi gereken tasarım ölçütlerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

3.6.1. Güç Tüketimi

Bir TDA geliştirirken dikkat edilmesi gereken en önemli ölçüt o ağın yaşam ömrüdür. Ağın yaşam ömrü de kullanılan duyarga düğümlerinin kullandıkları enerji kaynakları ve yapılan iletişimin sıklığı ile doğrudan ilintilidir. Bu bağlamda duyarga düğümlerinin pil ömrü TDA'lar için son derece önemli ve yapılan uygulamaya bağımlı olarak değişen bir unsurdur. Örneğin askeri amaçla geliştirilen bir TDA'da duyarga düğümlerinin pil ömrünün 1-2 yıl olması istenebilirken [56], tıbbi amaçlı bir TDA uygulaması için ise pil ömrünün, hastane personeli sık sık meşgul etmeyecek düzeyde, evde gözetim halinde ise hastanın rahatını bozmayacak düzeyde olması yeterlidir. Buda bu tarz bir TDA uygulamasında 1-2 haftalık pil ömrü olması kabul edilebilir sayılabilir [56], [94], [111].

Bir TDA'da duyarga düğümlerinin asıl görevi olayları tespit ederek hızlı bir şekilde veriyi iletmektir. Bu bağlamda duyarga düğümleri öncelikle veriyi algılamakta, sonra veriyi işlemekte ve son aşamada da veriyi göndermek için iletişim kurmaktadır. TDA'lar da güç tüketiminin fazla olduğu kısım ise verinin işlenmesi ve iletişimin kurulması aşamalarıdır. Bu alanlarda güç tüketiminin azaltılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir [89], [106], [112]. Aşağıda her bir durum ayrı ayrı irdelenmiştir.

- **İletişim:** Bir duyarga düğümü veri iletimi esnasında maksimum enerjiyi tüketmektedir. İletişim esnasında harcanan gücün bir kısmı veri iletimi için harcanırken bir kısmı da duyarga birimleri için harcanmaktadır [1]. Duyarga düğümündeki alıcı/verici devresi, güç yükseltme katmanı, osilatörler vb. gibi

birimler oldukça yüksek güç tüketmektedir. Bu yüzden duyarga düğümünün iletişimi esnasında harcanan güç hesaplanırken düğümün harcadığı gücünde dikkate alınması gerekmektedir.

Bir TDA'da duyarga düğümünün güç tüketimine P_c denilecek olursa;

$$P_C = N_T[P_T(T_{on} + T_{st}) + P_{out}(T_{on})] + N_R[P_R(R_{on} + R_{st})] \quad (3-1)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada; $P_{T/R}$ alıcı/verici tarafından harcanan gücü P_{out} vericinin çıkış gücünü, T/R_{on} iletim zamanını, T/R_{st} iletim öncesi başlangıç zamanını, $N_{T/R}$ birim zamandaki veri iletim sayısını vermektedir [113].

- **Veri İşleme:** Veri işleme ile iletişim arasındaki güç tüketimi karşılaştırıldığında veri işleme esnasında harcanan gücün daha az olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar 1 Kb boyutundaki veri 100m mesafeye 3 milyon defa gönderildiğinde harcanan enerji maliyeti yaklaşık olarak bir işlemcinin veriyi 100 milyon defa işlemesine eş değer olduğunu göstermiştir [114]. Bu nedenle duyarga düğümlerde veri işleme sürecinde harcanacak gücün azaltılması, ayrıca bir duyarga düğümünün dahili veri işleme birimlerinin kapasitesinin iyileştirilmesi de güç tüketimini azaltmak literatürde çalışılan konulardır [1].

3.6.2. Genişleyebilirlik

Oluşturulan bir TDA'nın istendiği zaman modüler bir şekilde genişleyebilmesi bir TDA oluştururken istenilen özelliklerden biridir. TDA'ların sabit bir topolojisi yoktur. Ağ üzerindeki duyarga düğümlerinin yaşam ömrü bittiğinde ağdan çıkmakta ya da ağa yeni duyarga düğümleri katılarak topolojinin değişmesi söz konusu olmaktadır. Bu yüzden ağa katılan düğümler için önceden bir biçimlendirme yapma olasılığı yoktur. TDA'ların kendi kendine yeni topolojiyi oluşturması gerekmektedir [22], [115]. Örneğin tıbbi amaçlı bir TDA içinde hastaların farklı zamanlarda farklı hayati parametrelerinin izlenmesi istenebilir. Ayrıca aynı anda birden fazla hastanın denetimi yapıldığı durumlarda ağa katılan yeni bir hasta için ağ kendi kendine biçimlenebilmeli ağ trafiği için veri yolları yeniden inşa edilebilmelidir.

3.6.3. Hata Toleransı

Bir TDA uygulamasında algılanan verilerin hassasiyeti uygulamanın önemine göre değişebilmektedir. Bazı uygulamalarda anlık ve hassas verilere ihtiyaç duyulurken bazı

uygulamalarda algılanan verinin yaklaşık bir bilgi vermesi yeterlidir. Duyarga düğümler, sınırlı enerji kaynakları olan, ortam şartlarından etkilenerek bozulabilme ihtimali olan ve bu yüzden yanlış ölçüm yapabilme ihtimali olan cihazlardır. TDA uygulamalarında bozulan veya enerjisi tükenmekte olan duyarga düğümlerinin, tüm ağın performansını düşürmesine izin verilmemesi gerekir. Yapılan TDA uygulamasında kabul edilebilir bir güvenilirlik ve hata toleransı belirlemek gerekmektedir. Hata toleransı, duyarga düğümler de oluşabilecek hatalara rağmen, ağın doğru çalışabilirliğinin sağlanması şeklinde tanımlanabilir. Bu yüzden hata toleransı yapılan TDA uygulamalarında enerji kaynaklarının doğru kullanımı için önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır [18], [116-117].

Buna göre bir duyarga düğümünün hata toleransına $R_k(t)$ denilecek olursa;

$$R_k(t)=\exp(-\lambda_k t) \quad (3-2)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada λ_k k duyarga düğümündeki hata oranı, t ise zaman periyodudur.

3.6.4. Ölçeklenebilirlik

TDA uygulamasında izlenilecek ortam için yerleştirilen duyarga düğümler uygulamanın büyüklüğüne göre yüzlerce, binlerce olabilir. Duyarga ağı genişledikçe ağı izlemek ve kontrol altında tutmak güçleşmektedir. Bu yüzden oluşturulan ağ için ağ şemaları oluşturulmalı ve ölçeklenebilir olmalı, ortamda kullanılacak duyargaların yoğunluğunun hesaplanabilir olması gerekmektedir. Buna göre $\mu(R)$ bir duyarga düğümünün iletim yarıçapı içerisinde bulunan diğer duyarga düğümlerinin sayısı olarak tanımlanırsa;

$$\mu(R)=(N\pi R^2)/A \quad (3-3)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada N, bir bölge içerisinde dağıtık duyarga düğümlerinin sayısı, R iletimin yapılacağı sinyal aralığını A ise bölgeyi tanımlamaktadır [118].

3.6.5. Üretim Maliyeti

Bir TDA tasarlarırken ağ içerisinde kullanılacak olan düğüm sayısını optimum seviyede tutmak gerekmektedir. TDA'lar, çok sayıda duyargayı içinde barındırdığından, tek bir duyarganın maliyeti, tüm ağın maliyeti için büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden oluşturulan TDA'da kullanılan her bir duyarganın maliyeti ve ağın toplam maliyetinin belirlenmesi son derece önemlidir. [93]

3.6.6. Donanım Kısıtları

Gerçekleştirilecek olan TDA uygulamasında ihtiyaca yönelik olarak donanımın genişletilmesi gerekebilir. Örneğin çoğu duyarga ağda, yol bulma teknikleri ve sezme (algılama) işlemleri yüksek seviyede doğruluğa sahip konum bilgisi gerektirmektedir. Konum bilgisinin bulunması için yer bulma sistem biriminin donanıma eklenmesi gerekmektedir. Yine duyargaların belirli biri işi gerçekleştirmek için hareket etmesi gerekiyor ise hareket ettirici biriminin kullanılması gerekmektedir. [93]

3.6.7. Örnekleme Oranı ve Veri Hızı

TDA'larda birim zamandaki veri aktarım oranı kadar bu oranın sabit ya da değişken olması ağ performansını etkileyen önemli bir parametredir [24], [107]. Bu parametre ağın performansını etkileyebileceği gibi ağın yaşam ömrünü de doğrudan etkileyen bir değerdir. Örneğin tıbbi algılayıcıların oluşturduğu bir ağ için hayati parametrelerin örnekleme oranı, 1 Hz den 1000 Hz e kadar çok geniş bir tayfa sahiptir. Bu özellik, en verimli paket büyüklüğünün seçimi, ağ trafiğinin düzenlenmesi gibi çok sayıda kıstasın ağ tasarımında göz önünde tutulmasını zorunlu kılmaktadır.

Tasarlanacak olan TDA'larda veri aktarım hızı ve örnekleme oranının geliştirilecek olan algoritmalar ile değişken hale getirilmesi ile ağın yaşam ömrünü uzatmak mümkün olabilmektedir. [93]

3.6.8. Gerçek Zaman Senkronizasyonu

Veri toplama amaçlı tasarlanmış bir TDA ağında gerçek zamanlı doğru veri toplama, verinin en düşük maliyetle doğru noktaya iletimi son derece önemlidir. TDA'larda yaşam ömrünü bitiren duyarga düğümleri kapanarak ağın topolojisinin değişmesine yol açmaktadır. Yine ağın genişlemesi durumunda ağa yeni katılacak düğümlerde ağ topolojisinin değişmesine yol açmaktadır. Bu nedenle ağı oluşturan düğümlerin ağa

katılmaları veya ağdan ayrılmaları durumunda mevcut veri yollarının gerçek zamanlı veri aktarımına engel olmayacak şekilde yeninde inşa edilmesi gerekmektedir. Ağ yönlendirme algoritmaları bu önemli unsur göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır [31].

3.6.9. Ortam Şartları

TDA uygulamalarında duyarga düğümlerinin bulunduğu ortam bazen erişilebilir ve gözlemlenebilirken bazı uygulamalarda ise coğrafik koşullardan dolayı gözlemlemek zor olabilir. Örneğin yapılan TDA çalışmalarında duyarga düğümleri; büyük bir makinenin iç kısmında, okyanusun derinliklerinde, trafiği yoğun bir kavşak üzerinde, biyolojik veya kimyasal bir alanda, bir savaş sahası içerisinde düşman alanında, büyük bir nehir içinde olabilir. Duyarga düğümlerin aşırı sıcak veya aşırı soğuk ortamlarda, yüksek basınç altında veya çok gürültülü bir ortam gibi her türlü zor koşullarda ve her türlü çevresel etmene karşılık çalışması beklenmektedir. Bir TDA tasarlanırken de yapılacak uygulamanın önemine ve çevre koşullarına dikkat edilerek uygun donanımların seçilmesi gerekmektedir [19], [116].

3.6.10. Giyilebilir veya Taşınabilirlik

Bazı TDA uygulamalarında duyarga düğümlerinin taşınabilir olması gerekmektedir. Özellikle tıbbi uygulamalarda duyarga düğümlerinin küçük, hafif ve giyilebilen şekilde olması gerekmektedir. Duyarga düğümünün taşınabilir boyutlarda olması donanımsal olarak cihazın boyutlarının küçülmesi anlamına gelmektedir. Bir duyarga düğümünün en büyük birimi ise güç üniteleridir. Dolayısı ile taşınabilir bir duyarga düğümü tasarlarken güç ünitesinin küçük olması buna paralel olarak da pil ömrünün kısılması sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle pil ömrü ile düğüm boyutu arasında karşıt bir ilişki vardır. Tasarımda, pilin değiştirilme sıklığı, hayati verinin tipi ve algılayıcı düğümünün büyüklüğü arasındaki ilişkiler göz önünde tutulmalıdır [93].

3.6.11. Güvenlik

Hassas uygulamalarda verilerinin belirli güvenlik gereksinimlerini karşılamak zorundadır. TDA'lar için geliştirilen birçok şifreleme tekniği ve güvenlik önlemleri mevcuttur. Tasarlanacak olan TDA uygulamasında güvenlik düzeyini iyi belirlemek gerekmektedir. Güvenli veri iletimi verinin şifrelenmesi dolayısı ile veri boyutunun artması bununla birlikte enerji tüketiminin artması anlamına gelmektedir [18].

3.6.12. Ağ Oluşturan Düğümlerin Hareket Edebilirliği

Tasarlanacak olan TDA'da ki duyarga düğümleri hareket halinde olabilir. Duyarga düğümlerinin sürekli hareketli olması ağ topolojisinin sürekli değişmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle haberleşme katmanının, sinyal kalitesindeki değişimlere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilmesi ve ağ topolojisindeki değişimler sonucunda yeni veri yolları inşa edebilmesi gerekir [83].

3.6.13. Çoklu Gönderim

Bazı TDA uygulamalarında bir duyarga düğümünün aynı anda birden çok veriyi, birden çok yere göndermesi gerekebilir. Örneğin tıbbi amaçlı bir kullanılan bir TDA uygulamasında, bir hastanın birden fazla verisini, aynı anda birden fazla doktor ya da hemşireye gönderilmesi gerekebilir. Bu da ağ katmanının bir çoklu gönderim algoritmasını desteklemesi gerektiği anlamına gelmektedir [115], [119].

3.7. Telsiz Duyarga Ağların Kullanım Alanları

TDA'lar sundukları avantajlar yüzünden günümüzde aktif biçimde kullanılmakta ve araştırılmaktadır. Yapılan çalışmaların genel yapısı incelendiğinde yapılan çalışmaların çoğu konum saptama, enerji yönetimi ve dinamiklik konularında olduğu görülmektedir.

- **Konum Saptama:** TDA'larda ölçülen büyüklüğün yerinin tespiti son derece önemlidir [120-121]. Ölçülen büyüklük konum bilgisi olmadan tek başına bir anlam ifade etmemektedir. Örneğin bir akıllı ev uygulamasında ölçülen sıcaklık bilgisinin hangi odaya ait olduğu bilinmez ise herhangi bir ısıtma veya soğutmanın doğru bir şekilde yapılması söz konusu olamaz.
- **Enerji Yönetimi:** Kısıtlı pil ömrü TDA'larda yaşam süresini belirlemektedir. Bu yüzden enerji kaynaklarının etkin yönetimi bu ağlarda en önemli gereksinim ve araştırma konusudur [24], [105], [122]. Özellikle yönlendirme katmanında etkili enerji yönetimi önemli bir araştırma konusudur [112].
- **Dinamiklik:** TDA'ların topolojik şartlardaki değişikliğe ve oluşabilecek hatalara adapte olması gerekmektedir. Bu yüzden her katmanda dinamik şartlara uyum sağlayabilmek için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [26], [122].

TDA uygulamaları genel anlamda bir ortamı izleme veya kontrol amaçlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden TDA'lar birçok alanda kullanılmaktadır. Bunları; askeri uygulamalar, çevre ve doğa izleme, felaketten korunma, akıllı ev uygulamaları, ticari uygulamalar, trafik kontrol uygulamaları, akustik algılama uygulamaları, tıbbi uygulamalar vb. gibi sıralamak mümkündür.

TDA uygulamalarında genel olarak; sıcaklık, nem, ışık, basınç, nesne hareketleri, toprak bileşimi, gürültü seviyesi, bir nesnenin mevcudiyeti, belirli bir nesnenin; ağırlık, boyut hareket hızı, yönü, son konumu gibi fiziksel durumları incelenebilmektedir.

TDA'lar ile ilgili günümüzdeki çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

3.7.1. Askeri Uygulamalar

TDA'lar, düşük maliyeti ve dağıtık yapısı sayesinde, askeri amaçlı faaliyetlerde geleneksel duyargalara göre daha kullanışlıdır. TDA'lar askeri komuta, kontrol, iletişim, hesaplama, istihbarat, nezaret, savaş alanının gözetim altında tutulması, saldırı tespiti, keşif ve hedef tespit sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olmaya başlamıştır [1], [11], [21].

Askeri amaçla kullanılan TDA uygulamaları ile düşman hareketleri, patlamalar ve diğer ilgili olaylar hakkında bilgi toplamak mümkündür. Ayrıca sonik duyargalar ile keskin nişancı noktalarını belirlemek, nükleer, biyolojik, kimyasal saldırıları tespit etmek mümkün hale gelmektedir [8-9].

- Askeri amaçla kullanılan TDA uygulamalarını şu şekilde sıralamak mümkündür.
- Teçhizat ve cephane takibi [1], [10], [89].
- Muharebe alanının izlenmesi: [1].
- Düşman güçlerin ve bölgesinin taranması ve gözlenmesi: [122-123].
- Hedefleme [5]
- Tahribat hesaplaması: [123].
- Nükleer, biyolojik ve kimyasal saldırıların tespiti ve keşfi: [5].
- Keskin nişancı yer tespiti ve hedef koruma: [5].

3.7.2. Çevre Algılama ve İzleme Uygulamaları

TDA'lar ile bir coğrafik alan üzerinde çevre izleme ya da çevre kontrolü amacı ile yüzlerce ya da binlerce duyarga düğümünden yararlanarak bir bilgi ağı oluşturmak mümkündür.

TDA'ların çevresel alanda uygulanmasına, Hawaii'deki nadir bitkilerin ekolojik olarak incelenmesi, California Redwood Ormanları projesinde yangın, doğal afetlerin tespit edilmesi, Great Duck Island'a nesli tükenmekte olan kuşların gözetimi, Tungurahua aktif volkanının gözetim altında tutulması projeleri örnek olarak gösterilebilir [11], [93].

Bu uygulamalarda da görüldüğü gibi izlenmesi gereken alan çok geniş bir coğrafyadır ve bu coğrafyanın izlenmesi için kablolu haberleşme ağlarının kurulması hem çok maliyetli hem de kimi coğrafik alanlarda imkânsızdır. Bu amaçla geniş alanlara yayılmış bir alanın izlenmesinde TDA'lardan yararlanılmaktadır. Bitki örtülerinin, iklimsel değişikliklere ve hastalıklara tepkilerinin ölçülmesinde, ayrıca ses ve görüntü algılayıcıları da, kuş ve diğer türlerin nüfus takibinde TDA'lar kullanılmaktadır [11].

3.7.3. Felaketten Korunma ve İzleme

TDA'lar acil durumlarda ya da felaket durumlarında yerleştirildikleri afet alanlarında etkili olabilmektedir. Dağıtılmış duyarga düğümleri aracılığı ile yapılan doğru ve zamanında yer tespiti, kurtarma operasyonlarında hayati önem taşımaktadır. Yer tespitinin yanında ölü sayısı, potansiyel tehlikeler ya da acil durumun kaynağı, kimlik tespit işlemleri ve kurtarılmayı bekleyen insanların tespiti de hayati verilerdir [11], [55].

3.7.4. Akıllı Ev Uygulamaları

TDA'lar tüm insanlık için daha rahat ve akıllı yaşam alanlarının oluşturulmasında rol alabilmektedir. Bu tür uygulamalara örnek olarak; TDA'lar ile gaz, elektrik, oda sıcaklığı gibi verileri kablosuz ağ aracılığı ile istenen noktaya iletebilir. Ya da parkmetrenin süresinin dolmak üzere olduğunu araç sahibine iletebilir [11], [18].

3.7.5. Akıllı Alanlar

Teknolojideki gelişmeler ile birlikte TDA uygulamaları ile kişisel mobilya ya da araçlara iliştilmesi mümkün kılınmıştır. Bu sayede otonom bir ağ oluşturulabilmektedir. Örnek olarak, akıllı bir buzdolabı ailenin doktordan alınan diyet programına göre buzdolabının envanterini tutup, alışveriş listesini tutan kişisel dijital asistana alınacaklar listesini gönderebilmektedir [11].

3.7.6. Ticari Uygulamalar

Binaların yapısal ve sismik olarak gözetim altında tutulması TDA'ların ticari olarak kullanıldığı alanlara arasındadır. Coronado Köprüsü, San Diego Fabrika binası (UCLA),

Golden Gate Köprüsü bu uygulamalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca makineler ve üretim hatlarında kullanılan telsiz duyurga ağlar ile erken hata teşhisi yapılabilmektedir [6], [18].

3.7.7. Trafik Kontrolü Uygulamaları

TDA'lar trafik kontrolü ve takibi için uzun yıllardır kullanılmaktadır. TDA'lar; kaza, araba arızası, yol durumu ve sinyalizasyon onarımını takip etmek için oldukça fonksiyoneldir. Benzer şekilde trafik sıkışıklıklarını tespit edip kullanıcıları uyarmak açısından da verimlidir. Bunların yanı sıra, trafiğin akışını değiştirip taşımacılık kapasitesini arttırabilmek için de uygundur. Ayrıca park alanlarının yönetimi ve yasal olmayan sürüş ve park davranışlarını tespit için de kullanışlıdır [21].

3.7.8. Nezaret – Gözetim Uygulamaları

Anlık ve uzaktan gözetim TDA'lar ile geliştirilen önemli uygulamalardan biridir. Örnek olarak; çok sayıda akustik ağ algılayıcısı ile belirlenen hedeflerin tespiti ve takibi belirli güvenlik kriterlerinin uygulandığı alanlarda kullanılabilmektedir. TDA'lar bu gibi amaçlarla binalara, yerleşim alanlarına, hava alanlarına, tren istasyonlarına vs. yerleştirilerek ziyaretçilerin tanınması ve anlık olarak ana komuta merkezine iletilmesi gibi görevleri yerine getirebilir. Benzer şekilde duman algılayıcıları evlere, otel odalarına, okullara yerleştirilerek olası kaza, yangın ve felaketlerin fark edilerek en hızlı biçimde gerekli müdahalenin yapılmasını mümkün kılmaktadır [19].

3.7.9. Tıbbi Uygulamalar

Kablosuz medikal ağlar ile hasta izleme sağlayacağı önemli faydalar nedeniyle çok popüler bir araştırma konusudur. Bu konuda çok sayıda çalışma vardır bunlardan en önemlileri aşağıda sıralanmıştır.

- **Body Area Network Projesi:** Fraunhofer Institute tarafından yürütülen bir projedir [12]. Hasta verilerinin duyurgalar aracılığıyla izlenip internet üzerinden ulaşılabilir kılmaya yönelik bir projedir. Bu projede amaçlanan hastaların evlerinden izlenebilmesi ve Body Area Network (vücut ağı) aracılığıyla hastanın kablolardan bağımsız yapılarak, evdeki günlük yaşamının kolaylaştırılmasıdır.
- **Human++ Projesi:** IMEC tarafından yürütülen bir projedir [13]. Bu projenin amacı PDA ile haberleşebilen duyurgalar içeren kablosuz bir ağın

gerçeklenmesidir. Uzun ömürlü, vücutla uyumlu, akıllı algılayıcı devreleri geliştirmek, bu projenin amaçları arasındadır.

- **A WBAN of Intelligent Motion Sensors for Computer Assisted Physical Rehabilitation Projesi:** Alabama Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü tarafında yürütülen bir projedir [14]. Bu projede, çok kullanılan bir dizi fizyolojik, kinetik ve çevresel duyargalar içeren Zigbee ve IEEE 802.15.4 ile uyumlu WBAN adında bir prototip tasarlanmaktadır. Çok katlı bir “telemedicine” (uzaktan tıbbi izleme ve müdahale) sistem tanımlanmıştır. Geliştirilen WBAN prototipinin bilgisayar destekli fizyolojik rehabilitasyon için nasıl kullanılacağı açıklanmıştır. Sistem, algılayıcılarından alınan verileri gerçek zamanlı analiz ederek, kullanıcıya yol gösterir, kullanıcının müdahalesine olanak tanır ve birtakım uyarılarla kullanıcıyı bilgilendirir. Ayrıca bu sistemde, tüm kaydedilen bilgiler internet üzerinden bir sunucuya ve veritabanına aktarılabilir. WBAN ucuz, dikkat çekmeyen, denetlenmesi gerekmeyen, uzun süreli hasta izleme gerçekleyen bir prototip vaat etmektedir. Bu teknolojiyi her yerde kullanılabilir, kolayca elde edilebilir yapmak için sistem tasarımı, standartlaşma, güvenlik, gizlilik gibi birçok konuda, çok sayıda problemin çözülmesi gerekmektedir.
- **Noninvasive Wireless Body Area Network Projesi:** Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Teknoloji Enstitüsü tarafından Zürih’te yürütülen bir projedir. Bu projenin amacı, düşük enerji tüketen, dikkat çekmeyecek boyutlarda, non-invasive (deri üzerinden) bir WBAN tasarımı ve optimizasyonudur [124].
- **Body Area Network – A “Healthy aims” Projesi:** Healthy Aims kapsamında, Zarlink Semiconductor Inc. yürüttüğü bir projedir. Healthy Aims bir EU FW VI projesidir. 9 Avrupa ülkesi tarafından yürütülen, 6 sı yatırımcı 26 ortaklı oluşan büyük bir projedir. Bu ortaklar yaşlılara ve özürlülere yardımcı olacak geniş çaplı tıbbi çözümler geliştirmeye çalışmaktadır. Proje Information Society Technologies (IST), Microsystem programı tarafından parasal olarak desteklenmekte ve farklı disiplinlerden çok sayıda kişiyi bir araya getirmektedir [111].
- **MobiHealth Projesi:** Twente Üniversitesi ve Ericsson tarafından yürütülen bir projedir. Hastalar hafif bir izleme sistemi takarlar (MobHealthBAN). Kan basıncı, EKG gibi veriler MobiHealthBAN tarafından ölçülerek kablosuz olarak doktora veya hastaneye iletilmektedir. Uzun süreli ya da periyodik gözlem gerektiren hastaların hastaneye gitmeden izlenmesini sağlamak amaçlanmaktadır [93].

- **CodeBlue: Wireless Sensor Networks for Medial Care Projesi:** Harvard Üniversitesi Mühendislik ve Fen bilimleri bölümü tarafından yürütülmekte olan bir projedir [15]. CodeBlue, medikal uygulamalar için TDA teknolojilerinin uygulanabilirliğini araştırmaktadır. Hastane öncesi ve hastanede tedavi, felçli hastaların rehabilitasyonu gibi bir dizi uygulama CodeBluenun araştırma alanına girmektedir. CodeBlue halen geliştirilmekte olan bir sistemdir. Araştırmanın odak noktaları, tıbbi algılayıcıların düşük güçlü kablosuz ağlar ile bütünleştirilmesi, ciddi bakım, güvenlik, doğruluk gibi önceliklere göre kablosuz ad-hoc yönlendirme protokolleri, düşük güçlü algılama, hesaplama ve haberleşme için donanım yapıları, hastane bilgi sistemleri ile birlikte çalışabilme (gizlilik ve veri doğrulu dikkate alınarak), radyo sinyal bilgisini kullanarak 3D yer bulma, uydurulabilir kaynak yönetimi, ağ çarpışma kontrolü ve ağda kanal paylaşımı olarak sıralanabilir. CodeBlue projesi National Science Foundation, National Institutes of Health, U.S.Army, Sun Microsystems, ve Microsoft Corporation tarafından desteklenmektedir.
- **Proactive Health Projesi:** Intel tarafından yönetilen bir projedir [16]. Proje, fiziksel ve kavramaya ilişkin zayıflamaya odaklanmıştır. Geleceğin yaşlı nüfusuna yardım etmek, kanser ve kalp hastalıkları gibi kronik durumların ihtiyaçlarına cevap verecek sistemler geliştirmek, ruh sağlığı, iyi beslenme gibi konularda yardımcı olacak sistemler geliştirmek, olmak üzere üç inceleme alanı içermektedir.
- **Telemedicare Projesi:** SINTEF tarafından yürütülen bir projedir [17]. Hastaların evden gözlemine hedefleyen bir projedir. Gelişmiş ve güvenli algılayıcılar hastadan 24 saat sürekli veri toplayarak bunu hastanın evindeki bir bilgisayara kablosuz iletişim ile aktarır, bilgisayar bu verileri depolar ve analiz eder. Hasta üzerine yerleştirilen 4 duyargadan gerçek zamanlı olarak, yüksek kalitede EKG, kan basıncı, oksimetri, ve sıcaklık verisi elde edilir. Bu veri kablosuz iletişim ile yerel hasta bilgisayarına aktarılır. Proje yerel hasta bilgisayarı ve hasta arasında, güvenli web tabanlı bir ara yüz sağlar. Ayrıca proje var olan hastane bilgi sistemlerine uyumu da göz önünde bulundurmaktadır.
- **UbiMon Projesi:** UbiMon (Ubiquitous Monitoring Environment for Wearable and Implentable Sensors), DTI tarafına finanse edilen bir projedir. Bu projede geçici fakat hayati tehlikeye sebep olabilecek olayları yakalamak amacıyla hastanın,

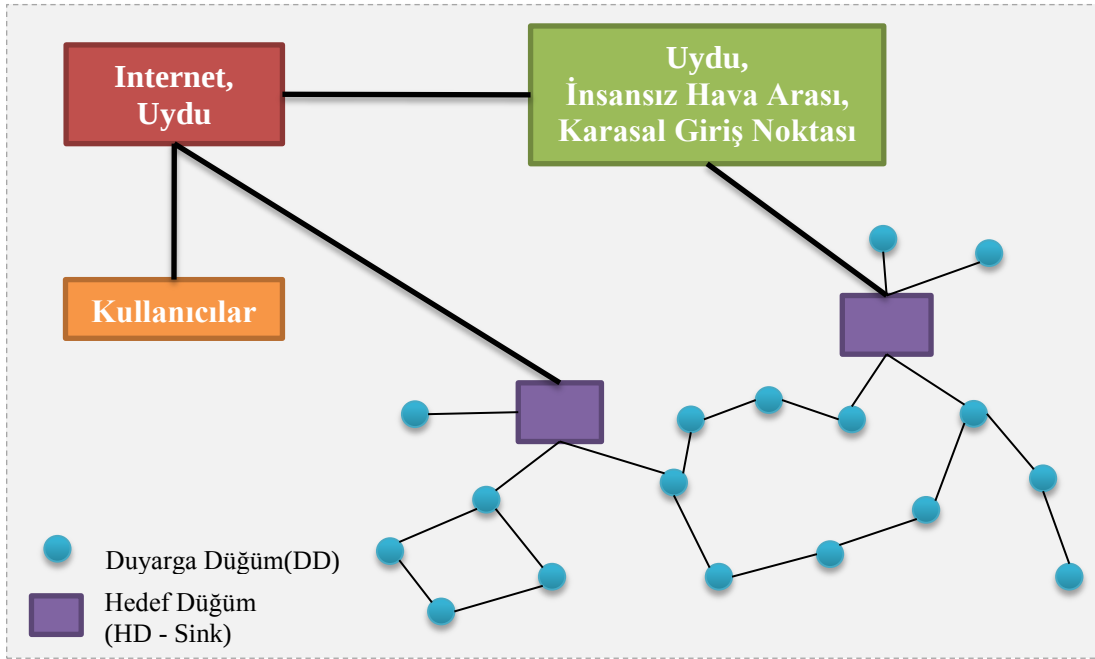
sürekli gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Londra Imperial College, Computing bölümü tarafından yürütülmektedir [125].

- **WsHC (Wireless Health and Care) Projesi:** Çok disiplinli bir araştırma ve geliştirme projesidir. Kablosuz haberleşebilen prototip ürün ve hizmet geliştirmeyi hedeflemektedir. Duyarga verilerinin Bluetooth, Zigbee ya da özel tasarlanmış protokoller aracılığıyla toplanması, sağlık personeline ulaştırılması ve sağlık personelinin arasındaki haberleşme bu projenin aşamalarıdır [93].

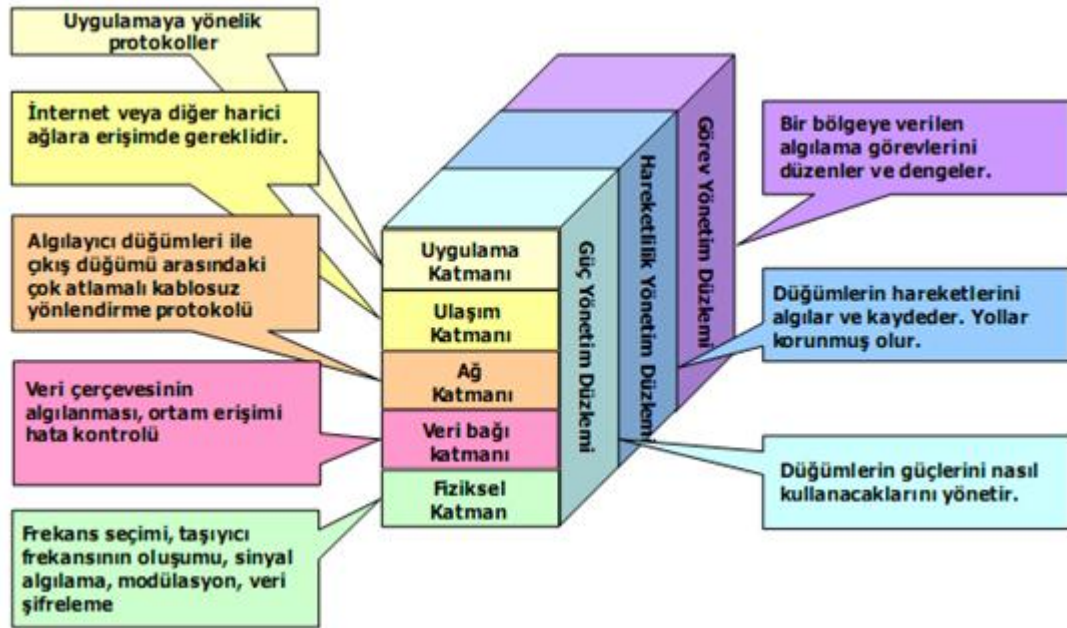
3.8. Duyarga Ağların Mimari Yapısı

Bir TDA'da, duyarga düğümleri genellikle belirli bir alan içerisinde dağınık bir yapıda bulunmaktadır. Bu ağda çok sayıda duyarga düğümü (DD) ve bu duyarga düğümlerinden gelen bilgilerin toplandığı hedef düğüm (HD) noktaları bulunmaktadır. Her bir DD'de toplanan veriler HD noktasına diğer DD'ler üzerinden gönderilmektedir. HD noktaları, toplanan verileri internet, uydu bağlantısı veya benzeri bir iletişim platformu üzerinden veri merkezine gönderilmesi ile sorumludur. Aynı zamanda HD noktaları DD'lerin birbirleri ile haberleşmesini de sağlamaktadır. Bir TDA'nın topolojik yapısı Şekil 3.9'da gösterilmektedir.

Dağınık bir şekilde alana yayılmış olan duyargalar ve HD noktalarının oluşturduğu bir TDA'nın iletişim için ihtiyaç duyduğu altyapıyı oluşturan mimari yapı Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bu mimari yapı, TDA'nın güç tüketimi ve yol belirleme konularında duyarlı bir şekilde etkin veri aktarımı yapabilen ve duyarga birimlerinin birbiri ile işbirliği yapmasını kolaylaştıran çeşitli katmanlardaki protokollerden oluşmaktadır.

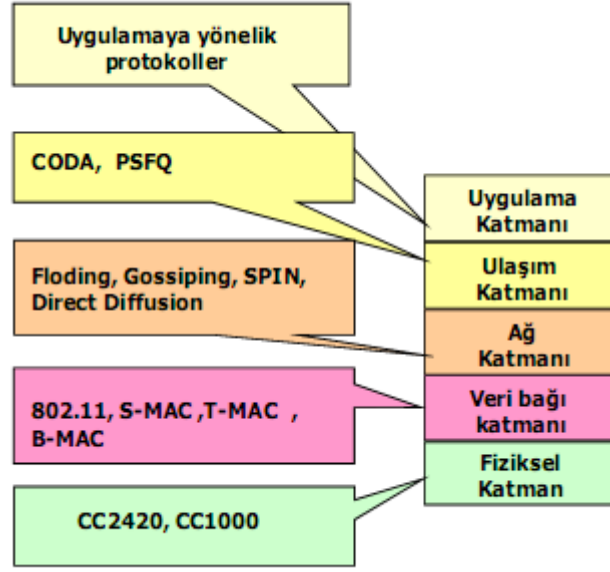


Şekil 3.9. Bir TDA'nın topolojik yapısı



Şekil 3.10. Bir TDA'nın mimari yapısı [126]

Bir TDA'nın mimari yapısı yapılan işlere göre fiziksel katman, veri bağı katmanı, ağ katmanı, ulaşım katmanı, uygulama katmanı, güç yönetimi düzlemi, hareket yönetim düzlemi ve iş yönetimi düzlemi olarak bölümlendirilmiştir. TDA mimari yapısı üzerinde kullanılan protokoller Şekil 3.11'de gör  lmektedir.



Şekil 3.11. Algılayıcı ağ katmanları üzerinde kullanılan protokoller [126]

Fiziksel katman frekans seçimi, modülasyon, veri şifreleme ve iletim gibi niteliklerden sorumlu katmandır. Veri bağı katmanı veri çevresinin algılanmasından, ortam erişiminden ve hata kontrolünden sorumludur. Ortam erişim protokolü (MAC) bu katmandadır. MAC protokolü ortak olan iletişim kaynaklarının düğümler arasında etkin ve adil bir biçimde paylaşılmasını sağlamaktadır. Ortam gürültülü ve duyarga düğümler hareketli olduğundan, MAC protokolünün güç yönetimi ve komşularda yapılan yayınlara karşı çarpışmaları minimize etme niteliği taşımalıdır. Ağ katmanı ulaşım katmanı tarafından sürülen verinin, yol bulma işleviyle ilgilenir. Uygulama katmanının ihtiyaç duyması halinde, ulaşım katmanı veri akış kontrolünü yapmakla görevlendirilmiştir. Sezme işlemlerine göre, farklı tipte uygulamalar geliştirilip, uygulama katmanının da kullanılabilir. Bunlara ek olarak, güç, hareket ve iş yönetim düzlemleri, güç hareket, duyargalar arası iş paylaşımı gibi görevleri yürütmektedirler. Bu düzlemler duyargalara algılama işlemlerini koordine etmek ve harcanılan enerjiyi daha düşük bir düzeyde tutmaya yardımcı olurlar. Güç yönetimi düzlemi, bir duyarganın gücünü nasıl kullanacağını yönetir [1], [127].

Örneğin, duyarga düğüm herhangi bir komşusundan mesaj aldıktan sonra kendini geçici bir süre kapatabilir. Bu da aynı mesajı tekrar almasını önler. Aynı zaman da duyarga düğümün enerjisi belirli bir seviyenin altına düştüğünde diğer duyargalara yol bulma mesajlarına katılamayacağını bildirebilir. Geri kalan güç, algılama için ayrılır. Hareket yönetim düzlemi duyarga düğümlerin, hareketlerini sezip kaydedebilmektedir. Böylece o

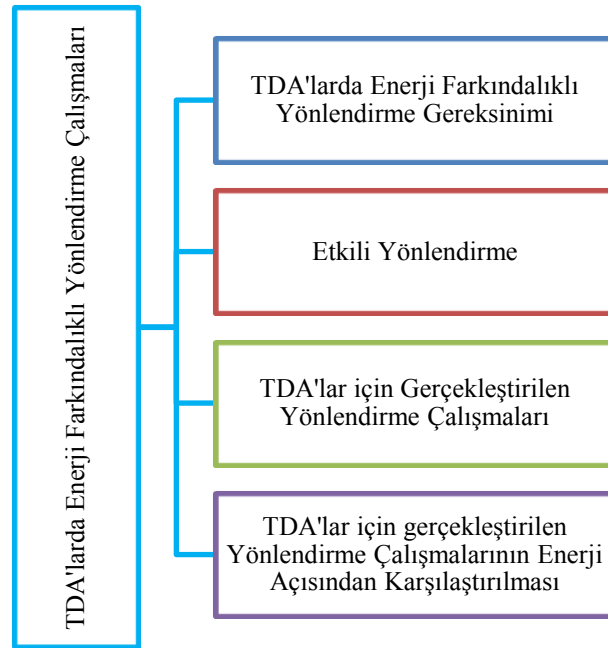
düğüme geri dönüş yolu bulunup, komşularının kim olduğu rahatlıkla bulunabilir. Komşu duyarga düğümlerinin kim olduğunun bulunması, duyarga düğümlerin iş ve güç kullanımını dengelemektedir. İş yönetim düzlemi belirli bir bölgede verilen algılama işlevinin bölünüp farklı zamanlı işlemlere ayrılması ve bunların dengeli dağıtılmasını sağlar. Çünkü aynı anda bütün duyargaların algılama işlevi yapması gerekmemektedir. Bu yönetim düzleri düğümlerin güçlerini verimli bir şekilde kullanmalarını, hareketli TDA’larda verinin yol bulmasını ve duyargalar arasında kaynakların paylaşımını sağladıklarından TDA’lar için büyük bir önem taşımaktadır [1], [95], [114], [127].

4. TELSİZ DUYARGA AĞLARDA ENERJİ FARKINDALIKLI YÖNLENDİRME ÇALIŞMALARI

4.1. Giriş

Doktora tezinin konusu telsiz duyarga ağlarda enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi geliştirmek olduğundan çalışmada tasarlanan mimarinin kolaylıkla anlaşılabilmesi ve literatürdeki yerinin algılanabilmesi için hem kablosuz duyargalarda enerji farkındalığın öneminin kavranabilmesi hem de yayınlardaki güncel çalışmaların takibi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle bu bölümün ilk kısmında TDA'lar için enerji farkındalıklı yönlendirme gereksinimi ortaya konulacaktır. Bölümün son kısmında ise TDA'lar üzerinde araştırmacıların yaptığı yönlendirme çalışmaları incelenecek ve yayınlanmış çalışmaların enerji açısından verimliliği karşılaştırılacaktır

Bu bölümde ele alınan konular Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. TDA'larda enerji farkındalıklı yönlendirme çalışmaları ile ilgili konular

4.2. Telsiz Duyarga Ağlarda Enerji Farkındalıklı Yönlendirme Gereksinimi

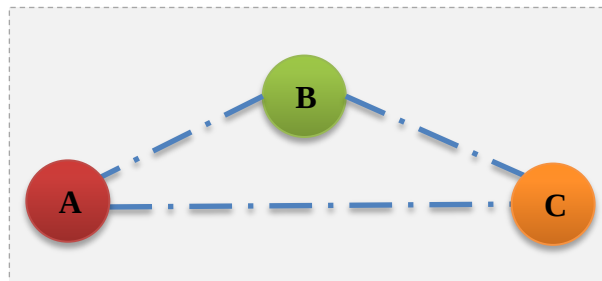
Genellikle TDA'lar da kullanılan duyarga düğümlerinin kaynakları sınırlıdır ve bu sınırlı kaynağın mimari yapı çerçevesinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi gerekmektedir. TDA'larda enerjinin etkin kullanımı için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar

donanımsal kaynakların arttırılmasına yönelik çalışmalar [3], [66] veya mimari yapı [23], [22] üzerinde yapılan çalışmalar şeklinde olabilir. Enerjinin etkin kullanımına yönelik çalışmaları yapabilmek için bir TDA alt yapısında enerjinin nerelerde harcandığını ve dolayısı ile nerelere iyileştirme yapmak için yoğunlaştırılması gerektiğinin tespit edilmesi hayati önem taşımaktadır. Burada bu kısımlar hakkında bilgi verilecektir.

4.2.1. İletim

TDA'lar da temel enerji sarfiyatlarından birisi düğümlerin algıladıkları veriyi veya kendisine gelen veri paketini yönlendirmesi esnasında gerçekleşen güç harcanımıdır. Araştırmalar bir verinin A noktasından B noktasına iletilmeden önce işlenerek mümkün olan en az veriyi yönlendirmenin enerji tüketimi açısından önemli olduğunu ortaya koymuştur [112]. Bu amaçla verinin iletilmeden önce çeşitli işlemlerden geçirilerek işlenmesi gerekmektedir. Örneğin verinin gönderimden önce sıkıştırılması veya birkaç paketin birleştirilerek iletilmesi enerji sarfiyatını azaltacaktır. Bu işlem yapılırken verinin işlenmesi ve iletilmesi aşamalarında ki enerji harcamaları dikkate alınarak, iletişim ve verinin işlenmesi maliyetleri arasında uygun bir dengenin kurulması gerekmektedir.

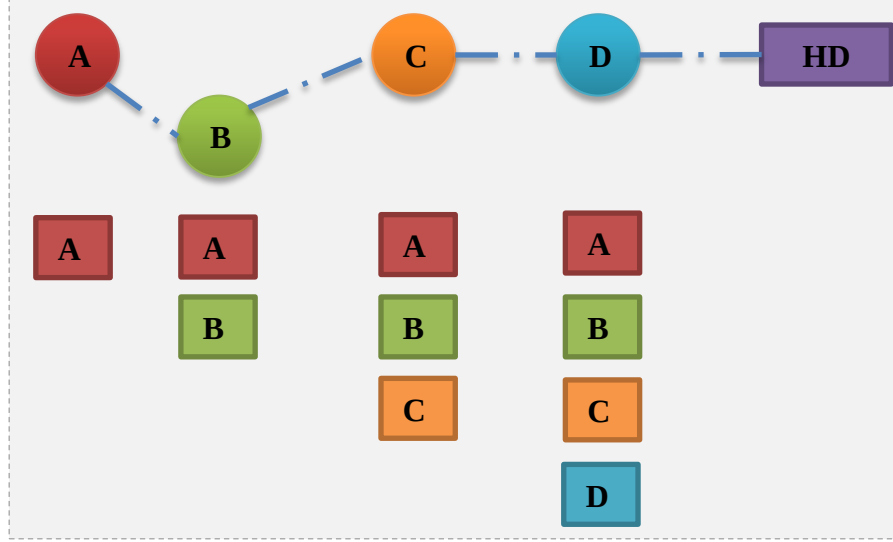
İletim esnasında ölçülen enerji sarfiyatları incelendiğinde TDA'lar da iki duyurga düğümü arasındaki iletim mesafesinin enerji sarfiyatını etkilediği görülmüştür [112]. Şekil 4.2'de gösterilen topolojide A düğümünün C'ye göndereceği verileri direkt olarak değil de B üzerinden aktarması ağın toplam enerjisini daha etkin kullanımını hem de doğru veri iletimini sağlamaktadır. Mesafenin uzaması enerji gereksinimini doğrudan etkilemektedir ve hata olasılığını arttırmaktadır. Çünkü mesafenin arttırılabilmesi için alıcı/verici anten çıkış gücünün arttırılması gerekecektir. Ayrıca mesafe arttıkça sinyal-gürültü oranı düşeceğinden bilginin yanlış anlaşılmasına sebep olabilecektir.



Şekil 4.2. Enerji mesafe ilişkisi

4.2.2. Yönlendirme

TDA'larda kaynaktan hedef düğüme doğru yönlendirme yapıldığı için yönlendirme esnasında harcanan enerji HD'ye yakın düğümlerde çok daha fazla olmaktadır [25]. Bu durum Şekil 4.3'de açıklanmıştır.



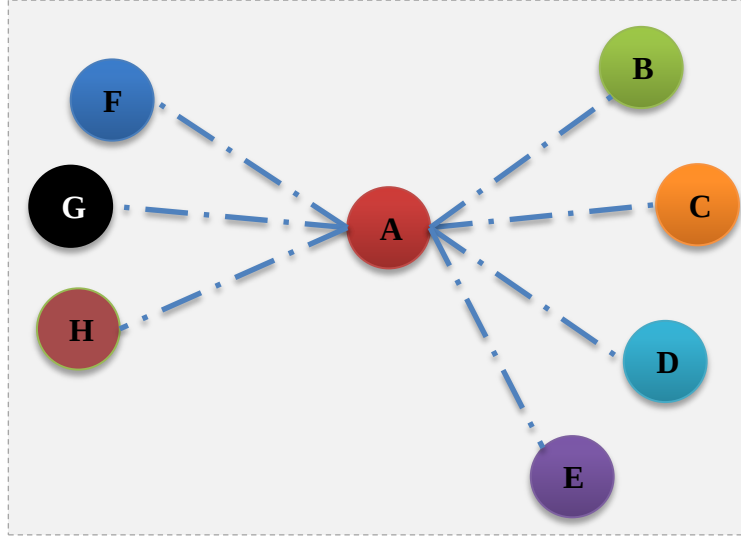
Şekil 4.3. Yönlendirme

Şekil 4.3'de gösterildiği gibi HD'ye en yakın düğüm olan D düğümü hem kendi hem de A, B ve C düğümlerinin paketlerini iletmek zorunda kalmaktadır. A, B, C ve D'nin eşit ağırlıklarla paket ilettiği varsayılırsa D düğümünün enerjisinin A'dan en az 4 kat daha önce tükenebileceği söylenebilir. Ayrıca D düğümünün enerjisinin tükenmesi A, B ve C düğümlerinin HD'ye olan bağlantısını da kopartacaktır. Bu durumda A, B ve C düğümlerinin dinamik bir biçimde yavaşlaması veya paket birleştirme ve iyileştirmelere gidilmesi ve topolojinin hedeflenen çalışma süresi boyunca ayakta tutulması gerekecektir. Bu durumun tespiti ve müdahale yöntemleri yine yönlendirme algoritmasına düşmekte ve araştırmaya açık bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.2.3. Çarpışma

TDA'lar da bir duyarga düğümü Şekil 4.4'de görüldüğü gibi ağ topolojisine ve yönlendirme mimarisine göre birden fazla komşu ile iletişimi sağlamak durumunda kalabilir. Bu tarz iletişimin söz konusu olduğu durumlarda ağ yapısı büyüdükçe gönderilen paketlerin çarpışma olasılığı artmaktadır. Çarpışma olasılığının artması paketlerin tekrar gönderilmesine sebep olmakta ve buna paralel olarak da enerji sarfiyatını arttırmaktadır. Literatürde veri trafiğini yönetmek için ağ katmanı üzerinde yapılan çalışmalar ve

modülasyon teknikleri kullanımı gibi çözümler bulunmaya çalışılsa [6], [33], [114] de yönlendirme katmanında da geliştirilecek algoritmalar ile çarpışmaların önlenmesi sağlanabilir. Örneğin [33] 'de çarpışma ve hata sayıları gözetlenerek kimin ne zaman veri göndereceği veya susacağı bilinmiş paket kayıpları önlenmeye çalışılmış veya paket kayıplarının artması durumunda bazı düğümlerin bazı yolları kullanmamaları dinamik olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.4. Çarpışma

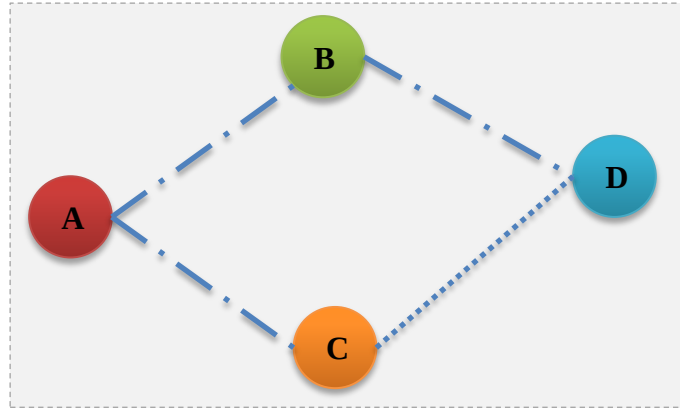
4.2.4. Dinleme

Duyarga düğümlerinin iletim, dinleme ve uyuma olmak üzere 3 farklı durumu vardır. Duyarga düğümleri iletim yapmadıkları zaman ortamı dinleme veya enerji sarfiyatını önlemek için uyuma konumuna geçebilir. Uyuma esnasında neredeyse hiç enerji harcamayan düğümler dinleme esnasında ise neredeyse iletimde ki kadar enerji harcamaktadırlar. Yapılan ölçümler bir algılayıcı ağında dinleme esnasında harcanan enerji miktarının iletimde harcanan enerjinin %70'ine kadar çıkabileceği göstermiştir [33]. Bu TDA'lar için çok büyük bir problemdir. Duyarga düğümleri kendisine gelecek olan paketin ne zaman geleceğini bilmediği sürece sürekli ortamı dinlemek zorunda kalacaktır. Sürekli dinleme yapan duyarga düğümü gereksiz enerji sarfiyatının yanında kendisine gelen birçok gereksiz paket yüzünden de fazla işlem yapacak ve dolayısı ile enerji harcayacaktır. Öte yandan duyarga düğümlerinin enerji tasarrufu için sürekli uyuma durumunda beklemesi paket iletmek isteyen bir düğümün veriyi yönlendirecek bir duyarga düğümü bulamaması sonucunu doğurabilir. Gerçekleştirilecek bir yönlendirme algoritması ile duyarga

düğümünün hangi süreçlerde ağı dinlemesi gerektiğini belirlemek büyük miktarda enerji tasarrufu sağlayabilecektir [31], [128].

4.2.5. Hata Oranı

TDA üzerinde veri iletişimi esnasında çarpışma, duyarga düğümün meşgul olması, uyuması veya yaşam ömrünü tamamlamış olması gibi çeşitli nedenlerden dolayı paket kayıpları meydana gelmektedir. Meydana gelen bu hatalar paketlerin tekrarlanmasına sebep olmaktadır. Ağ yapısı büyüdükçe kaybolan paket sayısı artmakta, hata oranı artmakta buna paralel olarak da paketlerin tekrar gönderilmesi yüzünden enerji harcanımı artmaktadır. Bu durum Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



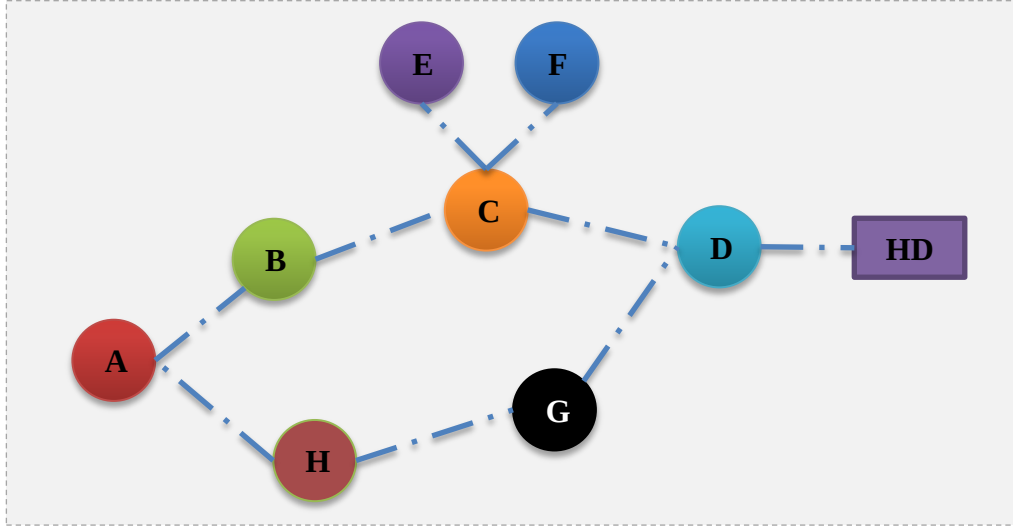
Şekil 4.5. Hata oranı

Şekil 4.5’de gösterildiği gibi C ve D düğümü arasında ki bağlantının o yoldaki aşırı trafik, düğümlerin birbirlerine uzaklığı gibi nedenler dikkate alınarak hata oranı çok yüksek olduğu kabul edilirse, A düğümünden D düğümüne gönderilmek istenen paketlerin C üzerinden yönlendirilmesi birçok paketin gereksiz yere tekrarına sebep olacaktır. Bunun yerine geliştirilecek olan bir algoritma ile A düğümünden D düğümüne gönderilecek olan paketleri B üzerinden yönlendirilmesi ile yol üzerindeki trafik alternatif yollara dağıtılarak bir yük dengelemesi yapılabilecek, aynı zamanda ağın daha az enerji harcanması sağlanabilecektir [119], [129].

4.2.6. Zayıf Düğüm

TDA’larda enerji sarfiyatını azaltmak için ağın toplam yaşam ömrünü arttırmaya yönelik çalışmalara yoğunlaşılmıştır. Zaman içerisinde duyarga ağlarında enerji bakımından diğer düğümlere göre daha zayıf düğümler oluşabilir. Bu düğümlerin

belirlenerek yönlendirme için kullanılması topolojinin toplam yaşam süresini arttıracaktır [19-20],[119]. Bu durum Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



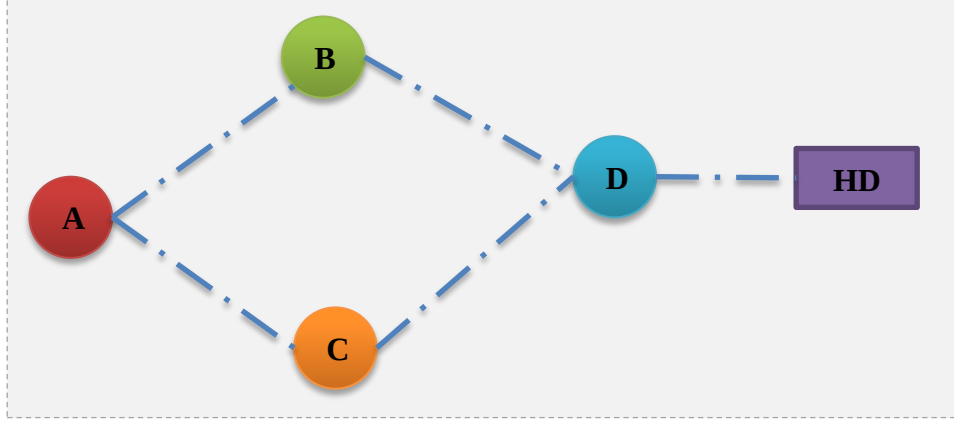
Şekil 4.6. Zayıf düğüm

Şekil 4.6'da ki gösterildiği gibi C düğümünün enerjisinin azalması diğerlerine göre daha fazla olacaktır. A ve B düğümünün paketlerinin alternatif yollardan gönderilmesi C düğümünün hayatta kalma süresini arttıracaktır.

4.2.7. Yük Paylaşımı

TDA'larda ağın toplam yaşam ömrünün arttırılmasına yönelik yönlendirme çalışmalarından biride düğümler arası yük paylaşımının gerçekleştirilmesidir [110].

Şekil 4.7'de gösterildiği gibi A düğümünden HD'ye alternatif iki yol bulunmaktadır. Bu iki yolunda yönlendirme algoritması tarafından tespit edilerek kullanılması topolojik enerji sarfiyatını ve toplam yaşam süresini arttıracaktır. Aksi durumda sadece her seferinde bir yol kullanılırsa o yol üzerindeki düğümlerin enerji sarfiyatı daha fazla olacaktır ve zamanla o yol yaşam ömrünü tamamlayacaktır [110].



Şekil 4.7. Yük paylaşımı

4.3. Etkili Yönlendirme

TDA'lar da etkili bir yönlendirme algoritması geliştirirken aşağıda açıklanan kriterlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlar [129]'da ayrıntıları ile verilmiştir. Burada konunun önemi açısından özetlenecektir;

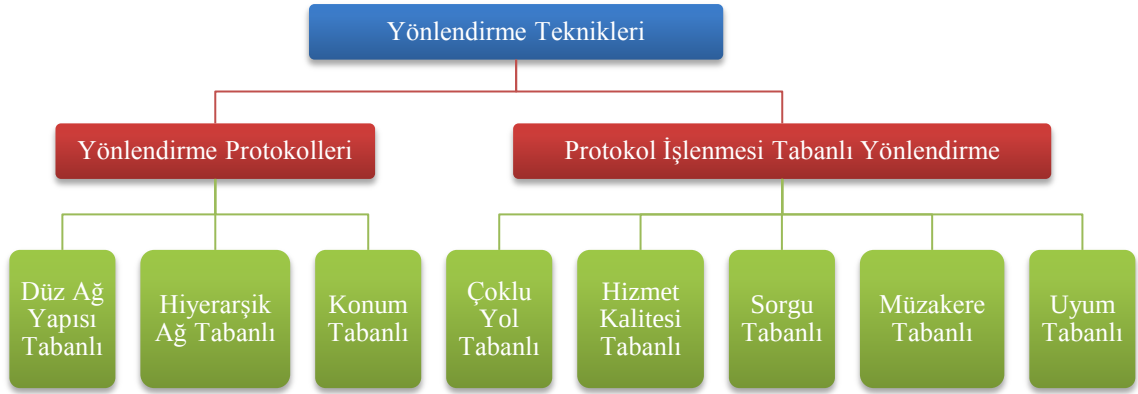
- **Minimum Kontrol Mesajı:** Yönlendirme bilgilerinin yayılması için kullanılan kontrol mesajlarının minimum seviyeye çekilmesi gerekmektedir. Özellikle çoklu yayım paketleri ağda gerekli gereksiz yere yayılarak enerji ve band genişliği tüketmektedir.
- **Az İşlem Yüğü:** İşlem kapasitesi oldukça düşük olan duyurga düğümlerinin çok karmaşık algoritmaları yürütmesi mümkün olamamaktadır. Bu sebepten ötürü yönlendirme algoritmalarının mümkün olduğu kadar basit, az bellek ve az işlem zamanı gerektirmesi gerekmektedir.
- **Dinamik Yapı:** Değişen topoloji ve hatalar sonucunda oluşan yeni şartlara kısa zamanda uyum sağlaması ve gereksiz paket gönderimlerini önleyecek bir yapıya sahip olması gerekmektedir.
- **Minimum Enerji Tüketimi:** Yönlendirme esnasında protokolün etkin yük dağılımı yaparak topolojik yaşam süresini maksimum değerlere çıkarması beklenmektedir. Düğümler arasında adil bir biçimde enerji harcanımının ayarlanması da gerçekleşmesi gereken başka bir özelliktir.

4.4. TDA'lar için Gerçekleştirilen Yönlendirme Çalışmaları

TDA'larda duyurga düğümler ağ içerisinde yerleştirilirken çalışmanın yapısına göre rastgele ya da belli alanlara konumlandırılabilirler. Enerji verimliliği göz önünde

bulundurulduğunda kaynaktan hedefe veri paketlerinin iletilmesi aşamasında yapılacak işlem veya yöntemler büyük önem taşımaktadır. Kaynak düğümden hedef düğüme veri paketinin hangi yöntemle taşınacağı yönlendirme teknikleri ile belirlenmektedir.

TDA'lar üzerinde yapılan çalışmaların başında kullanılacak yönlendirme teknikleri ile ilgili sorunlar gelmektedir. Bu sorunların çözümüne yönelik çalışmalar yönlendirme katmanını için yeni protokoller geliştirilmesi [1], [22], [24] veya yönlendirme katmanındaki işlemleri iyileştirmeye yönelik algoritma çalışmaları [18], [21] ve [83] üzerine yoğunlaşmıştır. TDA'lar için yapılan yönlendirme çalışmaları Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. TDA yönlendirme teknikleri

4.4.1. Düz Ağ Tabanlı Yönlendirme Protokolleri

Düz ağ tabanlı yönlendirme protokollerinde (Flat Networks Routing Protocols - FNR) ağ içerisindeki tüm duyarga düğümleri eşit statüye sahiptir. Her bir düğüm aynı görevleri yapmak ile yükümlüdür. Düz ağ yapısında amaç KD'den (kaynak düğüm) HD'ye (Hedef Düğüm) verinin DD'lerin (Duyarga Düğüm) yardımıyla iletilmesini sağlamaktır. Düz ağ tabanlı yönlendirme protokolleri veri merkezli yönlendirme mimarisini kullanırlar. Bu da KD'lerin etkin olarak ağ üzerinde yönlendirme aşamalarını kontrol etmesi anlamına gelir [23], [34], [130].

4.4.1.1. Görüşme Tabanlı Yönlendirme Protokolü

Görüşme Tabanlı Yönlendirme Protokolünün (Sensor Protocols for Information via Negotiation - SPIN) [103], [121] çalışması ağ topolojisinin içerisindeki her DD'nin HD gibi çalışması prensibine dayanmaktadır. Bu protokolde bir DD veriyi tüm komşularına

iletir. Komşu DD'ler verinin geleceği an aktif olarak veriyi alır ve aynı şekilde kendi komşularına iletir. Bu sayede KD'den HD'ye kadar veri iletilmiş olur. Bu protokol DD'lerin kendisine gelen veriyi ileterek daha verimli bir ağ yapısı oluşturulacağı kabulüne dayanmaktadır. Kulaktan kulağa olarak adlandırılan bu yöntemde veri belirli bir DD'ye değil de tüm komşulara iletildiği için büyük ağ yapılarında aşırı trafik oluşmasına neden olur. Oluşan trafik enerji sarfıyatı açısından önemlidir. SPIN'in bir sakıncası da birden fazla DD'nin ortak komşulara aynı veriyi göndermesi durumunda ağ içerisinde tekrarlı verilerin dolaşmasına sebep olur. Bu da enerjinin gereksiz yere kullanılması anlamına gelmektedir. SPIN'de bu problem veri paketlerine bir ID değeri verilerek kısmen çözülmüştür. SPIN'de DD'lerin anlık enerji seviyelerine erişmek mümkündür. Bu sayede ağın enerji sarfıyatını inceleyerek ağın yaşam ömrünü analiz etmek mümkündür. SPIN'in en önemli sorunlarından birisi ise bilgi iletiminin garanti edilememesidir. SPIN'de DD'lerin belirli bir yöne değil de tüm komşulara veriyi yönlendirmesi verinin HD'ye ulaşacağı anlamına gelmemektedir. Özellikle büyük ağ yapılarında HD'ye çok uzak DD'ler yönlendirdikleri veriler HD'ye komşuluk ilişkilerinde belirli bir yön bilgisi olmadığı için gönderilemeyebilir. Bu da ağın gereksiz yere kullanılmasını ve enerji sarfıyatını önemli derecede artırır [103].

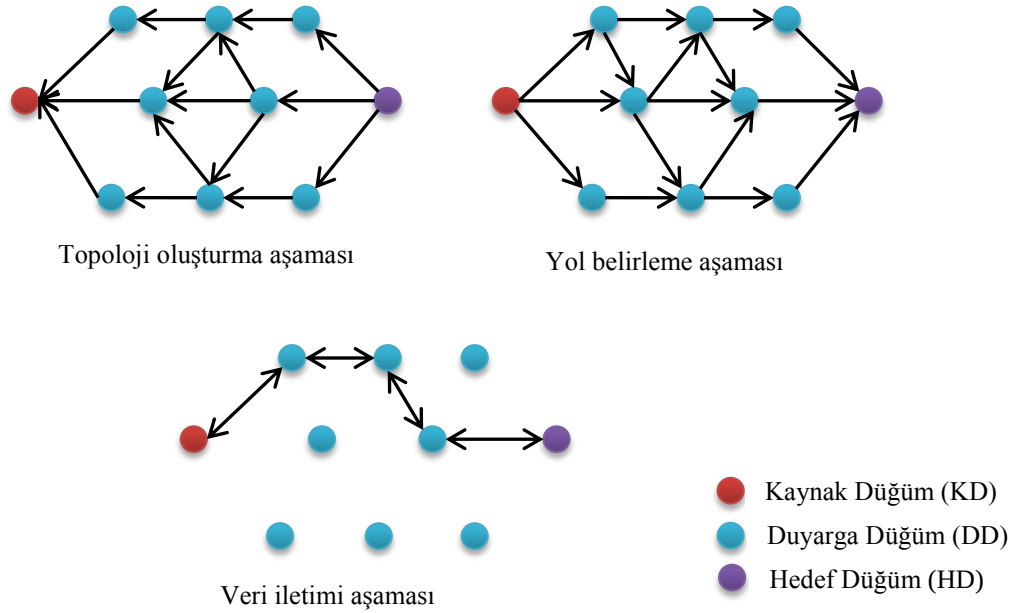
4.4.1.2. Doğrudan Yayılma Protokolü

Doğrudan yayılma protokolü (Directed Diffusion - DY) [130], veri merkezli ve uygulama tabanlı bir protokoldür. Veri merkezli protokolün temel amacı farklı kaynaklardan gelen bilgileri birleştirmektir. Bu sayede gereksiz veriler elenerek ağın enerji sarfıyatının önüne geçmek mümkün olmaktadır. Protokol enerjinin etkin kullanımını baz almaktadır. Bu protokolde KD'lerden HD'ye gönderilecek veri için bulunan alternatif yollar bulunarak veri gönderilmektedir. Protokolün yapısında birden çok KD olabilir fakat HD tektir.

DY protokolünde iletişim 3 aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşama ağın topolojisinin oluşması aşaması, ikinci aşama açılı bilgilerine göre yolların belirlenmesi aşaması, son aşama ise veri iletiminin gerçekleşmesi aşamasıdır. DY protokolünün veri iletimi ile ilgili model Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

DY protokolünün başarımı için KD ile HD arasındaki DD'lerin açılma pozisyonların doğru tespiti, KD'lerin sayısı, ağ topolojisinin doğru oluşturulması önemli kriterlerdir. DY protokolünün enerji sarfıyatını etkileyen en önemli sorun ağ topolojisinde sürekli algılama

yapılıyor olmasıdır. Sürekli algılama yapılması ağın yaşam ömrünü doğrudan etkilemektedir [130].



Şekil 4.9. Doğrudan yayılma protokolü yönlendirme yapısı

4.4.1.3. Söylenti Yönlendirme Protokolü

Söylenti yönlendirme protokolü (Rumor Routing - RR) [131], coğrafi yönlendirmenin uygun olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. DY protokolünün bir versiyonu olarak kabul edilebilir. RR enerji açısından DY protokolüne göre daha etkindir. Yapılan uygulamada coğrafi bir kriter olmadığı zaman ortama yayılan yayım mesajları ile yollar tespit edilmektedir. RR protokolü, TDA uygulamasında olayların sayısı az ise performanslı sonuçlar vermektedir. RR protokolünde her DD kendisine ait bir yönlendirme tablosu tutar. Bu tablodaki bilgileri komşularından aldığı bilgiler ile günceller. HD'den herhangi bir yönlendirme bilgisi gelmez ise kendi tablosundaki bilgilere göre yönlendirme gerçekleştirilir. Bu da enerji tüketimini arttırmaktadır. RR protokolü, büyük TDA uygulamalarında komşuluk ilişkileri ile ilgili DD'e çok fazla yük bindirdiği için enerji tüketimini arttırmakta bu da ağın toplam yaşam ömrünü olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden RR protokolü büyük ağ yapılarında tercih edilmemektedir.

4.4.1.4. Eğim Tabanlı Yönlendirme Protokolü

Eğim tabanlı yönlendirme protokolü (Gradient Based Routing - GBR) [34], bütün ağa yayılan yayım mesajı ile HD ile KD arasındaki yolların atlama sayısının tespitine göre

yönlendirme işlemini gerçekleştirmektedir. KD ile HD arasındaki en az atlama sayısı o yolun eğimi olarak düşünülmektedir. Eğimi en düşük olan yoldan iletişim gerçekleşmektedir. GBR, ağıın yaşam ömrünü arttırmak için 3 teknik kullanmıştır. Bunlar;

- Yol seçiminde eğim bilgisi eşit olan yollardan birisi rastgele seçilerek yönlendirme gerçekleştirilir.
- Düğümlerin enerji seviyesi düştüğünde enerji tabanlı plana geçilerek alternatif en uygun yoldan iletişimin gerçekleşmesi sağlanır.
- TDA'ya yeni katılan DD'leri tespit etmek için belirli peryotlar ile yol bilgilerinin yenilenmesi sağlanır.

Bu tekniklerin temel amacı TDA üzerinde trafiğin dengeli bir şekilde dağıtılarak ağıın yaşam ömrünü uzatmaktır. Yapılan araştırmalar GBR'nin DY'e göre enerji verimliliği açısından üstün olduğunu göstermiştir [34].

4.4.1.5. Kısıtlı Eş Yönsüz Yayılma Yönlendirme Protokolü

Kısıtlı eş yönsüz yayılma yönlendirme protokolü (Constrained Anisotropic Diffusion Routing - CADR) [132] gecikme ve band genişliğini düşürmeyi amaçlamaktadır. Bu yüzden CADR protokolü DY protokolünü iyileştirmiştir. CADR, iletişim maliyetini ve bilginin kazanımını temel almıştır. Bunun için dinamik yönlendirme tahmin teorisi ile bilginin kullanılabilirlik ölçümünü modellemiştir. Enerji maliyetleri incelendiğinde CADR, DY protokolüne göre daha etkilidir.

4.4.1.6. Enerji Etkin Yönlendirme Protokolü

Enerji etkin yönlendirme protokolü (Energy Aware Routing - EAR) [33], ağıın toplam yaşam ömrünü uzatmayı amaçlamaktadır. EAR, DY protokolüne benzemektedir. EAR'ın DY'den en önemli farkı, DY tek bir en iyi yol bulurken EAR yol takımları oluşturmaktadır.

EAR protokolü yönlendirme işlemini DY protokolünde olduğu gibi üç aşamada gerçekleştirmektedir. Birinci aşama topolojinin oluşturulması aşamasıdır. Bu aşamada EAR enerji tüketimini azaltmak için kesin bir olasılık hesabı ile KD ile HD arasındaki alternatif yolları hesaplar ve yol bilgilerini veritabanında tutar. Hesaplanan yollardan enerji verimliliği açısından etkin olmayan yollar bulunarak silinir ve yönlendirme tablosunda sadece etkin yollar kalır. İkinci aşama veri iletimi aşamasıdır. Bu aşamada KD ile HD arasındaki iletişim KD üzerinde tutulan yönlendirme tablosundaki yollardan birisinin rastgele seçimi ile gerçekleşmektedir. Üçüncü aşama ise KD ile HD arasındaki yolların

güncellenmesi için kullanılan bakım aşamasıdır. Bu aşamada yollar enerji verimliliğine göre güncellenerek tekrar ikinci aşamada olduğu gibi iletim gerçekleştirilir.

EAR protokolünde yönlendirme tabloları ve maliyet ilişkileri KD üzerinde tutulmaktadır. Dolayısı ile yönlendirme işleminde asıl sorumlu KD'lerdir. Bu protokolde ağ içerisindeki alternatif yollar üzerinden rastgele yönlendirme yapıldığı için ağın toplam yaşam ömrü DY protokolüne göre çok daha etkindir. Yapılan araştırmalar EAR protokolünün DY protokolüne göre % 21,5 enerji fazlası ve % 44 daha fazla ağ ömrü sağladığını ortaya koymuştur [23], [33].

4.4.1.7. Minimum Maliyetli Yönlendirme Algoritması

Minimum maliyetli yönlendirme algoritması (Minimum Cost Forwarding Algorithm - MCFA) [133], KD'den HD'e yapılacak olan yönlendirmede yönlendirmenin yolunun her zaman bilindiği kabulünü yapmaktadır. Bu yüzden iletişim esnasında gönderilen paketlere herhangi bir ID verilmez. Aynı zamanda yol önceden belli olduğu için yönlendirmeyi yönetmek için bir yönlendirme tablosuna ihtiyaç duyulmaz. Bunun yerine her DD kendisine ait en maliyetli yolu bularak HD'ye en uygun DD üzerinden veriyi yönlendirir. DD tarafından iletilen her mesaj komşularına iletilmekte ve bu sayede en düşük tüketim yolu hesaplanmaktadır. Ancak TDA'larda topoloji dinamik olarak değiştiğinden önceden belirlenen yolda zaman içerisinde değişiklik olacağı kesindir. Bu yüzden bu yöntem tek başına kullanılamaz.

4.4.1.8. COUGAR Yönlendirme Protokolü

COUGAR [134], bir TDA yapısında veri kümelemesini kullanarak enerji tasarrufu elde etmeyi amaçlar. Bu protokolde veri iletimi doğrudan HD'ye yönlendirilmez. Bunun yerine DD'ler arası liderlik mekanizması oluşturulmuştur. Veri iletimi DD'lerden lider düğüme (LD) doğru olmaktadır LD'ler kendi içlerinde bir veri tabanı tutmaktadır. Bu veri tabanında ki veriler LD'ler tarafından işlenerek işlenen veri HD'ye yönlendirilir. Böylece ağ içerisinde gereksiz veya tekrarlı veri iletiminin önüne geçilmiş olur. Bu da ağın toplam yaşam ömrünü olumlu etkilemektedir. COUGAR büyük ağ yapılarında başarılı sonuçlar vermektedir.

COUGAR protokolünde, DD'lerin sorgu mekanizması, LD'ler üzerinde gerçekleşen sorgu miktarının çok fazla olmasından dolayı aşırı hafıza kullanımı enerji tüketimi için ek maliyetlerdir. Ayrıca iletilecek olan veri LD'e gönderilmeden önce ağ üzerinde veri başarısı elde etmek için bir eşleme yapılması gerekmekte bu da ek enerji maliyeti

oluşturmaktadır. Ayrıca bu protokolde ki önemli sorunlardan birisi de ağ içerisinde önemli görevleri olan LD'lerin hata yapma olasılığıdır. LD'lerin hata oranlarını düşürebilmek için dinamik olarak ağ topolojisinin güncellenmesi gerekmektedir. Bu işlem ağı doğrudan bir yük getirdiği için ağ yaşam ömrünü doğrudan etkilemektedir [22].

4.4.1.9. Aktif Sorgu Yönlendirme Protokolü

Aktif sorgu yönlendirme protokolü (Active Query Forwarding in Sensor Networks - ACQUIRE) [135], COUGAR yönlendirme protokolüne benzer olarak dağıtılmış veri tabanı mimarisini kullanmaktadır. Bu protokolde ağ topolojisinin belirlenmesi için sorgu tabanlı yöntem kullanılmaktadır. Sorgu işleminden sonra KD ile HD arasında ki en kısa yol belirlenerek yönlendirme gerçekleştirilir. Ağ yapısı büyüdükçe ağ üzerinde yolların belirlenmesi ve iletimin gerçekleşmesi için yapılan sorgu sayısı artmakta bu da enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. ACQUIRE, büyük ağ yapılarında etkili bir yönlendirme protokolü değildir [6].

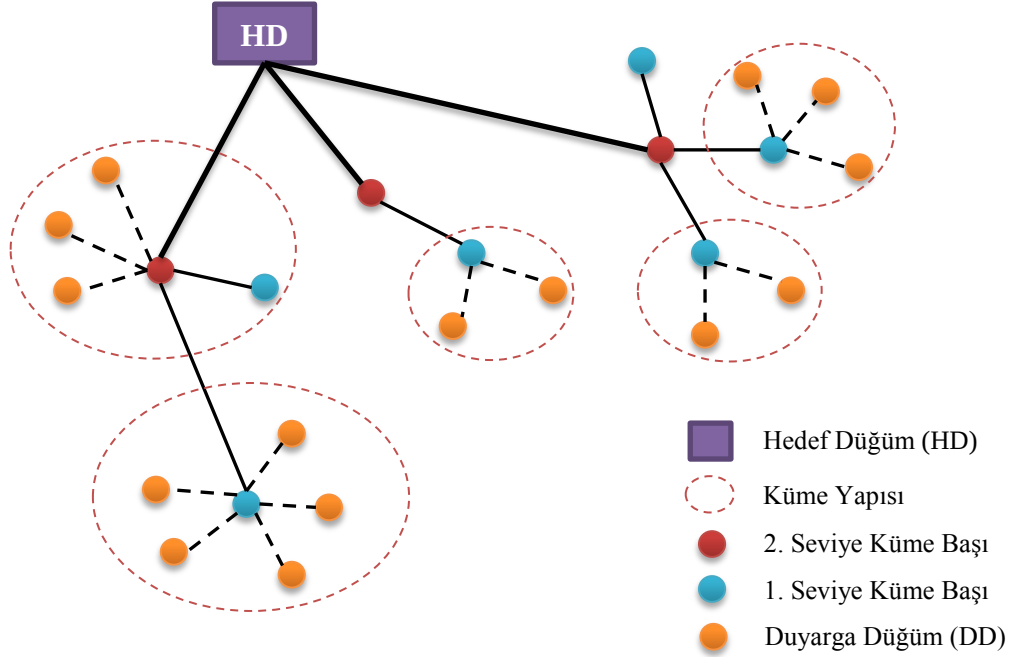
4.4.1.10. Rastgele Dolaşımli Yönlendirme Protokolü

Rastgele dolaşımli yönlendirme protokolü (Routing Protocols with Random Walks) [136], istatistiksel öngörülere dayanarak yönlendirme yapmayı amaçlamaktadır. Bu protokolde çoklu yönlendirme yaparak yük dengelemesi hedeflenir. Ağ içerisindeki DD'lerin rastgele zamanlarda algılama yapmak için uyandığı kabul edilmiştir. Rastgele bir anda uyanan DD algılama veya yönlendirme işlemini gerçekleştirdikten sonra tekrar uyur. Böylece belirli bir enerji verimliliği sağlamış olur. Bu protokolde KD ile HD arasındaki DD'ler düzenli olarak bir ızgara yapısının içerisine yerleştirilmiştir. Dolayısı ile tüm DD'lerin yeri önceden bellidir. Bu yüzden ağ topolojisinin oluşturulmasına veya yönlendirme için bir konum bilgisine ihtiyaç duyulmaz. Ağ içerisinde tüm DD'lerin konumunun belli olması TDA uygulamaları için önemli bir kısıttır. DD'ler rastgele noktalara konumlandırılmaz. Bu da ağ topolojisinin her zaman gerçekçi olmasını engeller.

4.4.2. Hiyerarşik Ağ Tabanlı Yönlendirme Protokolleri

Hiyerarşik yönlendirme (Hierarchical Networks Routing - HNR) veya küme tabanlı yönlendirme olarak adlandırılan bu gruba giren protokollerin temel amacı enerjinin etkin kullanılmasının sağlanmasıdır. HNR yapısında ağ içerisinde bulunan DD'lerin düşük enerji miktarına sahip olanlar sadece algılama yaparken, enerjisi yüksek olan DD'ler ise algılama, bilginin işlenmesi ve yönlendirme amaçlı kullanılmaktadır. HNR'de DD'ler

kümelere bölünmüştür. Bu kümeler içerisinde DD'ler kümenin yaşam ömrünü uzatabilmek için enerji seviyelerine göre ya sadece algılama yaparlar ya da tüm fonksiyonları icra ederler. HNR'lerin bir avantajı da küme içerisinde verilerin işlenip gerekli olanların HD'ye iletilmesinin sağlanmasıdır. Bu da ağ içerisinde oluşacak gereksiz trafiğin önüne geçmek açısından önemlidir. Şekil 4.10'da HNR'lerin genel yapısı görülmektedir [22], [86].



Şekil 4.10. Hiyerarşik yönlendirme

4.4.2.1. LEACH Yönlendirme Protokolü

Kümeleme tabanlı düşük enerjili yönlendirme protokolü (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy -LEACH) [20], küme tabanlı bir protokoldür. LEACH protokolünde TDA içerisindeki DD'lerden rastgele birkaç DD küme başı olarak seçilmektedir. Yapılan araştırmalar ağ içerisindeki DD'lerin %5'inin küme başı olmasının yeterli olduğunu göstermiştir [23]. Küme başı olan DD'lerin asıl görevi küme içerisindeki DD'lerin enerjisinin eşit olarak kullanılabilmesini sağlamaktır. Küme başı olan DD'lerin diğer bir görevi ise kendisine gelen bilgileri işleyip sıkıştırarak HD'ye iletilmesini sağlamaktır.

Bu protokolde ağ içerisindeki veri trafiğinden dolayı gerçekleşecek çarpışmaları en aza indirebilmek için TDMA / CDMA ve MAC protokolleri kullanılmıştır [22]. Trafiğin azaltılmasında ki etkin yöntemlerden biriside küme başlarına gelen verilerin hemen HD'ye göndermek yerine belli bir süre verilerin toplanıp periyodik olarak HD'ye iletilmesinin sağlanmasıdır.

LEACH protokolü iki aşamada çalışmaktadır. Bunlardan birincisi ağ topolojisinin oluşturulması aşaması, ikincisi ise kalıcı durum olarak ta adlandırılan veri iletiminin sağlandığı aşamadır. Ağ topolojisinin oluşturulması aşamasında ağ içerisinde bulunan DD'lerden küme başı olacak DD'lerin belirlenmesi ve kümelerin oluşturulması işlemleri gerçekleştirilir. Kalıcı durum aşaması ise HD'ye veri iletiminin başlaması ve sürekliliğinin sağlanması işlemleri gerçekleştirilmektedir.

LEACH protokolü, tüm DD'lerin her aşamada eşit enerjiye sahip olduğunu ve DD'lerin tümünün eşit enerji harcadığını varsaymaktadır. Bu protokolün yapısı gereği birçok dezavantajı vardır. Bunlar

- LEACH tüm DD'lerin HD'ye ulaşabilmek için yeterli güçte iletim yapabileceğini varsayar. Rastgele dağıtılmış DD'ler kimi zaman birbirinden çok uzak noktalarda olabilir ve veri iletimi yapamayabilirler.
- DD'lerin hep gönderilecek bir veriye sahip olduğu ve yakın komşularında da benzer verilerin olduğu varsayılır. Bu da küme başlarının gereksiz analizler yapmasına ve fazla işlem yükü yüzünden gereksiz enerji tüketimi yapmasına neden olur.
- Ağ topoloji oluşturulurken ağ içerisinde rastgele bir şekilde belirlenmiş küme başı DD'lerin ağ içerisinde homojen olarak dağılacığı kesin değildir. Hatta küme başları belirlendikten sonra bazı DD'ler ağ içerisinde kendine bir küme başı bulamayabilir.
- Ağ yapısında kullanılan dinamik kümeleme yapısı fazladan işlem yükü getirmektedir.

LEACH protokolünün bu sorunlarından dolayı özellikle ağ yapısı büyüdükçe kullanılabilir olmadığı görülmektedir [20].

4.4.2.2. PEGASIS Yönlendirme Protokolü

Duyarga bilgi sistemlerinde güç-verimli veri toplama protokolü (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems - PEGASIS) [137], zincir tabanlı protokol yapısını benimsemiştir. Bu protokol ağın yaşam ömrünü arttırmak için;

- DD'ler en yakın komşuları ile iletişime geçmelidir. Her DD için en yakın komşusu HD olarak kabul edilmektedir.
- DD'ler en yakın komşusuna ulaşamadığı yani HD'ye ulaşamadığı anda DD kendine yeni bir çerçeve belirleyerek en yakın diğer komşuya veri iletmeye başlar.

PEGASIS protokolünün temel olarak iki amacı vardır. Bunlardan birincisi her bir DD'nin ömrünü ağ içerisinde yapılan işbirlikleri ile arttırmak ve böylece ağın toplam yaşam ömrünü arttırmaktır. İkincisi ise birbirine yakın olan DD'ler arasında yapılacak olan koordinasyonla gereksiz trafiğin önüne geçmek, dolayısı ile band genişliğini etkin kullanmaktır.

PEGASIS protokolünün LEACH protokolüne göre en büyük farkı kümeleme yöntemleri yerine zincir mekanizmasını kullanmasıdır [22]. PEGASIS'te en yakın komşular sinyal gücüne belirlenmektedir. Oluşan bu komşuluk ilişkileri ile tek bir yol zincir şeklinde oluşturulmaktadır. Dolayısı ile birbirine en yakın DD'lerin oluşturmuş olduğu KD'den HD'ye kadar zincir şeklinde bir yol ortaya çıkmaktadır. Yapılan araştırmalar PEGASIS protokolünün LEACH protokolüne göre enerji açısından iki kat daha verimli olduğunu ortaya koymuştur [137]. PEGASIS, bunu özellikle kümeleme giderlerini yok ederek ve iletim sayısını azaltarak başarmıştır. PEGASIS protokolünün en büyük dezavantajı HD'ye uzak DD'lerden gelecek verilerin gecikmeye neden olmasıdır [23].

4.4.2.3. Minimum Enerji İletişim Ağ Protokolü

Minimum enerjili iletişim ağ protokolü (Minimum Energy Communication Network - MECN) [138], TDA'lar da belirli bir ağ yapısı içerisinde düşük güçlü GPS kullanarak enerji etkin alt ağ oluşturma protokolüdür. MECN protokolünün ana amacı KD ile HD arasındaki yönlendirme için en az DD'nin kullanılacağı alt ağlar oluşturmaktır.

4.4.2.4. Eşik Duyarlı Enerji Verimli Yönlendirme Protokolü

Eşik duyarlı enerji verimli yönlendirme protokolü (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network Protocol - TEEN) [139], TDA uygulamalarında zamanın kritik olduğu verinin anlık olarak öneminin olduğu durumlar için önerilmiştir. TEEN protokolü daha sonra adaptif periyodik eşik duyarlı enerji verimli yönlendirme protokolü (Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network Protocol - APTEEN) [140], olarak iyileştirilmiştir.

TEEN protokolünün en önemli özelliği DD'lerin enerji seviyelerine göre yapması gereken işleri planlayabilmesidir. Buna göre yüksek enerji seviyesine sahip bir DD algılama ve yönlendirme yaparken, daha düşük enerji seviyesine sahip olan düğümler sadece algılama yaparak komşularının kendisi üzerinden veri iletimine izin vermez. TEEN

protokolünün en büyük dezavantajı ise belirlenen enerji eşik seviyesi DD'lere bildirilemez ise DD'ler iletme geçemez ve ağ üzerinde veri iletimi başlayamaz [23].

TEEN protokolünün zayıf yönleri APTEEN protokolü ile geliştirilmiştir. APTEEN protokolü ile ayrıca enerji eşik seviyesi dinamik hale getirilmiştir. Böylelikle TDA uygulamasının şekline ve gereksinimlerine göre enerji eşik seviyesi belirlemek mümkün hale gelmiştir. Bu da ağ üzerinde enerji etkinliği ve veri doğruluğu arasında seçim yapılmasına imkan tanımaktadır. Yapılan araştırmalar TEEN ve APTEEN protokollerinin LEACH protokolüne göre daha etkin olduklarını ortaya koymuştur [23].

4.4.2.5. Sanal Izgara Mimarili Yönlendirme Protokolü

Sanal ızgara mimarili yönlendirme protokolü (Virtual Grid Architecture Routing - VGA) [30], kare şeklinde gruplar oluşturarak her grup içerisinde sabit bir DD'ü küme başı düğüm olarak belirlenir. Böylece ızgara yapısına benzer bir ağ topolojisi oluşmuş olur. VGA protokolünde küme başları kendi kümesindeki verileri toplamak ve toplanılan verileri HD'e iletmek ile görevlidir. Bu yüzden küme başlarına yerel veri toplayıcı düğüm de denilmektedir. VGA protokolünde küme başı düğümleri belirleme işlemi oldukça karışık ve işlem yükü gerektiren bir işlem olduğu için enerji etkin yönlendirmenin söz konusu olduğu TDA uygulamalarında tercih edilmez [22].

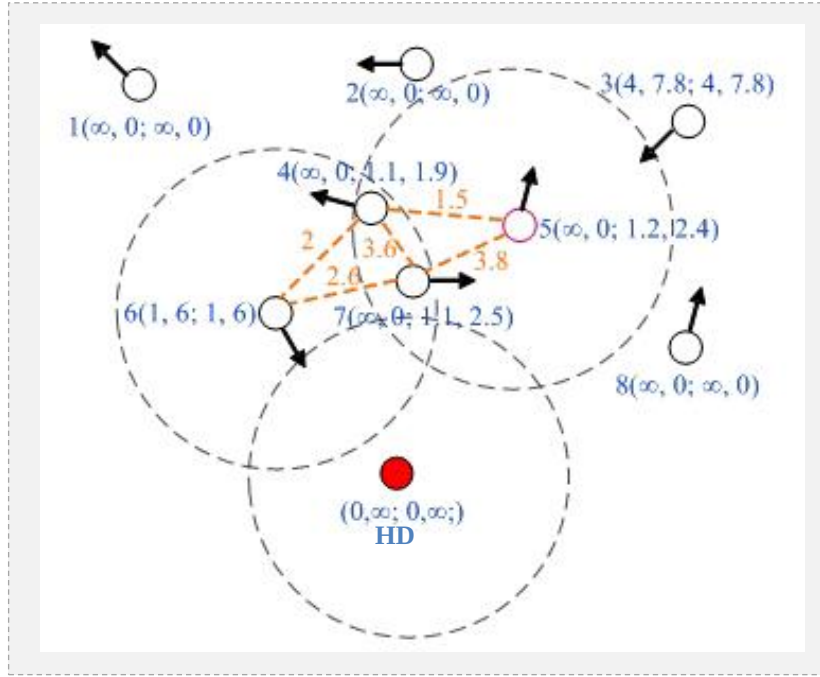
4.4.3. Konum Tabanlı Yönlendirme Protokolleri

Konum tabanlı yönlendirme protokolleri (Location Based Routing - LBR) TDA içerisinde yol belirleme ve verinin yönlendirmesi konularında DD'lerin konumlarının tespit edilerek komşuluk ilişkilerinin ortaya çıkmasını sağlayan protokollerdir. Bu protokollerde komşu DD'lerden gelen sinyal gücü incelenerek düğümlerin mesafesi hesaplanmaktadır [120], [141]. LBR'ler yapılan çalışmalarda sinyal gücünün yanı sıra DD ile ilgili yön tayini üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Konum tabanlı yönlendirme yapılırken;

- Komşu DD'lerin birbirleri ile yaptıkları veri iletişimi esnasında göreceli olarak koordinatları belirleme,
- DD'lerin konumunu uydular aracılığı ile belirleme,
- Düğümler üzerinde bulunan küçük güçlü GPS alıcıları yolu ile konum belirleme,

yöntemlerinden biri kullanılarak yön tayini yapılmaktadır. Konum tabanlı yönlendirme protokolleri incelendiğinde yön tayini için kullanılan GPS veya uydu bağlantısı gibi yöntemlerden dolayı enerji tüketimlerinin düz ağ tabanlı yönlendirme veya hiyerarşik ağ

tabanlı yönlendirme yöntemlerine göre fazla olduğu görülmüştür [142-143]. Şekil 4.11’de LBR protokollerinin genel yapısı görülmektedir.



Şekil 4.11. LBR protokollerinin yapısı

LBR protokolleri incelendiğinde literatürde 5 protokol öne çıkmaktadır. Bunlar;

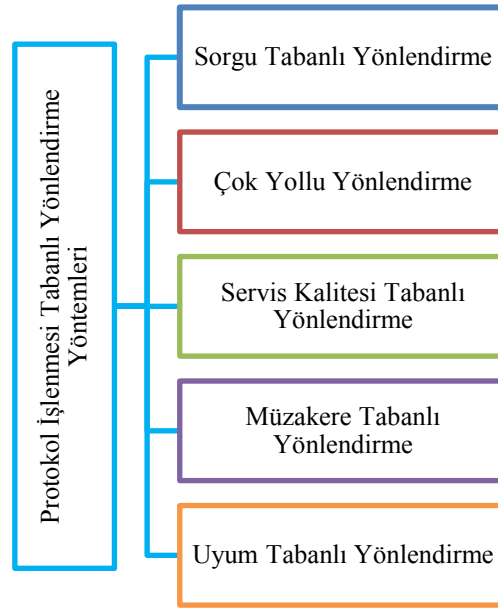
- Coğrafik ve enerji etkin yönlendirme protokolü (Geographical and Energy Aware Routing - GEAR) [144]
- Coğrafik Uygunluk Yayılımı (Geographic Adaptive Fidelity - GAF) [142]
- En ileriye kapsayan yönlendirme (Most Forward within Radius - MFR), Coğrafi mesafe yönlendirme (The Geographic Distance Routing - GEDIR), Pusula yönlendirme yöntemi (Compass Routing Method - DIR) [145]
- Yüz uyarlamalı diğer açgözlü yönlendirme (The Greedy Other Adaptive Face Routing - GOAFR) [146]
- SPAN Yönlendirme protokolü [28]

olarak ortaya çıkmaktadır.

4.4.4. Protokol İşlenmesi Tabanlı Yönlendirme

Protokol işlenmesi tabanlı yönlendirme (Protocol Operation Based Routing - PO) TDA'lar da yapılan çalışmalar incelendiğinde geliştirilen yönlendirme protokollerinin yanı sıra ağ yapısındaki birden çok katman ile iletişimi sağlamaya yönelik yöntemler veya algoritma tabanlı çalışmalar konusunda da yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Bu

alışmalar genellikle mevcut protokollerin geliştirilmesi veya birden çok protokol yapısının birlikte kullanıldığı çalışmalar veya yönlendirme ile ilgili tüm iletişim süreçlerinin yapılandırıldığı yazılım tabanlı çalışmalardır. Bu tarz yönlendirme yöntemleri genellikle yönlendirme protokollerinin tek başlarına yeterli olmadığı ve ağı ortamına göre özel düzenlemelerin yapılması gerektiği yapılarda tercih edilmektedir. PO yönlendirme işlemini yöntemlerine göre 5 ayrı başlık altında toplamak mümkündür. Şekil 4.12’de bu yöntemler gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Protokol işlenmesi tabanlı yönlendirme yöntemleri

4.4.4.1. Sorgu Tabanlı Yönlendirme

Sorgu tabanlı yönlendirmede (Query Based Routing - QBR) ‘deki amaç bir TDA yapısında koşullara göre iletişimin başlamasıdır. Bu yönlendirme tekniğinde genellikle HD ağı içerisine bir sorgu gönderir. Bu sorguyu alan DD’ler sorguda ki istenileni karşılayabiliyor ise iletişimi başlatabilir. Örneğin belli bir alandaki ortam sıcaklığı değişiminin gözlemlendiği bir ağda bir HD tüm ağda ki DD’lere sıcaklık ölçümü yapın ve ölçülen değer önceden belirlenmiş bir eşik değerini aştığında değeri gönderin şeklinde bir sorguyu gönderebilir. Sıcaklık değişiminin olduğu bölgelerde ki DD’ler ilettime geçerek sıcaklık bilgisinin gönderebilir. Bu sayede ağı içerisinde sürekli değer göndermek yerine belli değişimleri göndererek büyük ölçüde tasarruf sağlanmış olur [147].

QBR yapısında veri iletişimi 2 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama ağı topolojisinin oluşması aşamasıdır. Bu aşamada HD koşul ile ilgili mesajı tüm DD’lere yayar. Mesajı alan DD’ler eğer koşul sağlanmışsa ikinci aşamada HD’ye aynı yol üzerinden veriyi

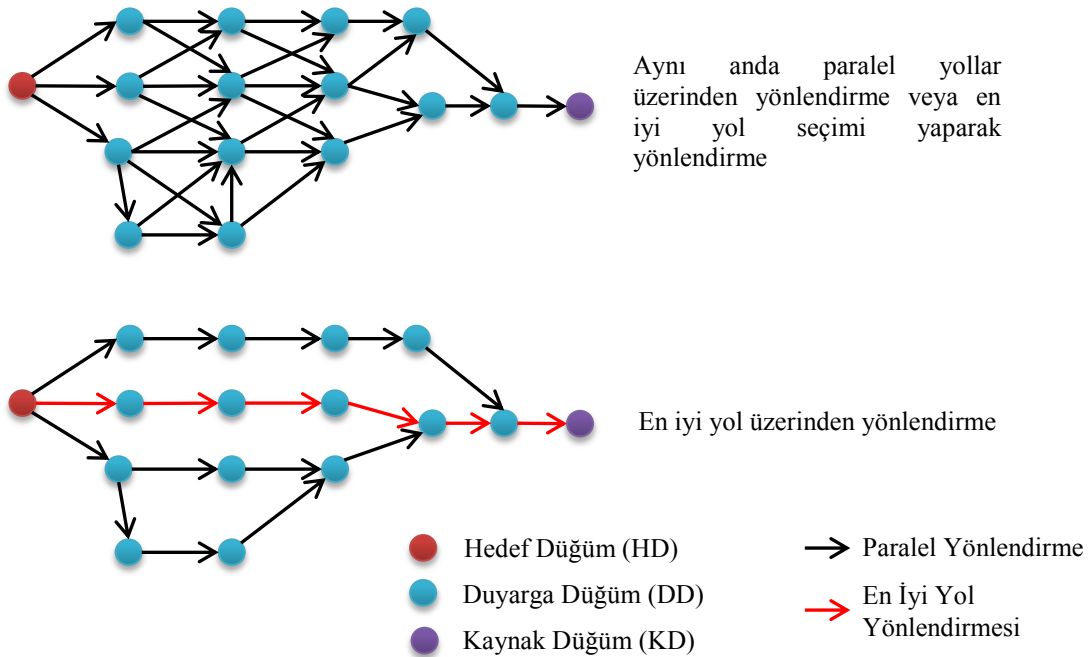
gönderir. QBR’de her sorgu işlemi başlangıcında uygun olan yol bilgisi en düşük enerji tüketimi dikkate alınarak belirlenmektedir. QBR tipi yönlendirme yapılarında ki en büyük sorun her sorgu işlemi için tekrar yolların belirlenmesi yüzünden yaşanan enerji harcamalarıdır. Bu soruna karşın ağ içerisinde ki tüm DD’lerin istenilen zamanlarda ağı dinlemesi sağlanarak diğer zamanlarda uyuması sağlanmakta ve enerji açısından tasarruf sağlanmaktadır [5].

4.4.4.2. Çok Yollu Yönlendirme

Çok yollu yönlendirme (Multi-Path Based Routing - MPR) üzerine yapılan çalışmalar bir TDA yapısında HD ile KD arasında ki veri iletişimi için bir yol yerine birden çok yolun belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu tür yönlendirme de belirlenen yollar ağ veya uygulamanın yapısına göre iki ayrı şekilde kullanılabilir.

- Belirlenen yolların birkaçı aynı anda paralel olarak verinin iletilmesi için hep birlikte kullanılabilirler [148].
- Enerji tüketimi, servis kalitesi veya hata toleransı, ağ güvenliği gibi kriterler göz önüne alınarak belirlenen yollar bir birlerine alternatif olacak şekilde sıra ile kullanılabilirler [24], [148].

MPR’nin genel yapısı Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. MPR yapısı

MPR teknikleri uygulamanın şekline göre ağ performansı üzerinde birçok fayda sağlamaktadır. Bunlar;

- Yönlendirme yapılırken ağ üzerinde homojen bir yük dağılımı yapılarak toplam ağ yaşam ömrünü uzatmak
- Ağ üzerindeki yük ve enerji tüketimini dengelemek
- Ağ üzerinde oluşacak trafiği dengeleyerek tıkanıklıkların önüne geçmek
- Servis kalitesini arttırmak ve ağ boyunca gecikmeyi azaltmak
- Hata toleransı sağlamak
- Ağ güvenliğini ve veri gizliliğini sağlamak

şeklinde sıralanabilir [115].

4.4.4.3. Servis Kalitesi Tabanlı Yönlendirme

Servis kalitesi tabanlı yönlendirme (QoS Based Routing - QoSBR), de amaç ağ içerisinde ki veri iletişiminin kalitesini arttırmaktır. QoS, verinin doğru iletimi, hızlı iletimi, ağın toplam enerji tüketimi gibi birçok kritere bağlıdır. Yapılan çalışmalar genellikle TDA uygulamasının amacına göre bu kriterlerden birkaçını iyileştirmek diğer kriterleri de göz ardı etmek durumunda kalmıştır. Örneğin bir TDA uygulamasında algılanan verinin anlık ve doğru bir şekilde HD'ye iletilmesi isteniyor ise ağın yaşam ömrü göz ardı edilebilir [90]. TDA'larda ki QoSBR tabanlı çalışmalar incelendiğinde özellikle 2 çalışma ön plana çıkmaktadır.

- **Sıralı Atama Yönlendirme:** Sıralı atama yönlendirme (Sequential Assignment Routing - SAR) [32], enerji kaynakları, iletilecek paketin öncelik seviyesi ve KD ile HD arasındaki yolların QoS değerlerine göre yönlendirme yapmaktadır. Bu yönlendirme tekniğinde oluşabilecek yön hatalarını önlemek için çok yollu yönlendirme yapısından da yararlanılmıştır. Bu sayede SAR yönlendirme tekniği hem QoSBR tabanlı hem de MPR tabanlı yönlendirme yapan bir yapı kurmuştur. SAR yönlendirme tekniği özellikle küçük ağ yapılarında başarılı sonuçlar vermiştir. Yapılan çalışmalar SAR'ın hata toleransının iyi olmasına karşın ağ yapısı büyüdükçe ve düğüm sayısı arttıkça yönlendirme tablolarındaki maliyetlerden dolayı performans kaybına uğradığını ortaya koymuştur [7].
- **SPEED:** Bu yönlendirme tekniği de SAR gibi QoSBR tabanlı bir yönlendirme tekniğidir. Bu yönlendirme tekniği DD'ler arasındaki komşuluk ilişkilerini keşfetmek ve yeni yollar oluşturmak için konum yönlendirme yapısını

kullanılmaktadır. SPEED'in ana amacı veri paketini iletim hızını arttırmaktır. Yapılan çalışmalar bu yönlendirme tekniğinin toplam iletim enerjisi açısından SAR yönlendirme tekniğine göre daha etkin olduğunu ortaya koymuştur [149].

4.4.4.4. Müzakere Tabanlı Yönlendirme

Müzakere tabanlı yönlendirme (Negotiation Based Routing - NBR) tekniklerinin temel amacı TDA ağında gereksiz verinin gönderilmesinin önüne geçmektir. İletişim KD tabanlıdır. Gereksiz veriyi ayırt etmek için bu yönlendirme tekniklerinde genel olarak yüksek seviyeli veri tanımlayıcı sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler ağ içerisinde çift olan mesaj paketlerini tespit ederek tekilleştirmektedir. Bu sayede ağ içerisindeki gereksiz trafiğin önüne geçilmekte ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır [103].

4.4.4.5. Uyum Tabanlı Yönlendirme

Uyum tabanlı yönlendirme (Coherent Based Routing - CBR) tekniklerinde verinin işlenmesi konusu ön plana çıkmıştır. Bu tür yönlendirme teknikleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde iki ayrı görüş ortaya çıkmıştır.

Birinci görüş uyumlu olmayan veri işleme yöntemidir [150]. Bu yöntemde ham veri iletilmeden önce DD'ler içerisinde işlenmektedir. Bu sayede iletilecek olan paket miktarının azaltılması planlanmaktadır.

İkinci görüş ise uyumlu veri işleme yöntemidir [121]. Bu yöntemde ise ham veri DD'lerde çok küçük bir işleme sürecinden geçirildikten sonra HD'ye gönderilmektedir. Buradaki veri işleme sadece veri paketine zaman damgası gibi küçük bilgilerin eklenmesi şeklindedir.

Uyum tabanlı yönlendirme tekniklerinden hangisinin kullanılacağı TDA uygulamasının yapısına göre değişmektedir. Eğer veri iletiminin hızlı olması veya ağ trafiğinin azaltılması isteniyor ise uyumlu olmayan veri işleme [23], [121] enerji tasarrufu yapılarak ağın yaşam ömrünün uzatılması isteniyor ise DD'lerde işleme maliyetleri olmayan uyumlu veri işleme [1], [150] yöntemleri tercih edilmektedir [32].

4.5. TDA'lar için Gerçekleştirilen Yönlendirme Çalışmalarının Enerji Açısından Karşılaştırılması

Literatürde yer alan yönlendirme çalışmalar bu bölümde sunulmuştur. TDA'lar üzerindeki yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaları bir kısmının tamamen protokol geliştirmeye yönelik bir kısmının da uygulamaya yönelik ihtiyaçları karşılamak için

geliştirilen mimariler olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda temel hedef düğümler arasında iletişimi sağlamak için yönlendirme yapısını oluşturmaktır. Uygulamanın yapısına göre bazı çalışmaların ağın yaşam ömrü ve güç kullanımı açısından öne çıktığı görülmüştür. Tablo 4.1’de farklı kategoriler altında ki yönlendirme tekniklerinin enerji verimliliği açısından karşılaştırılması sunulmaktadır.

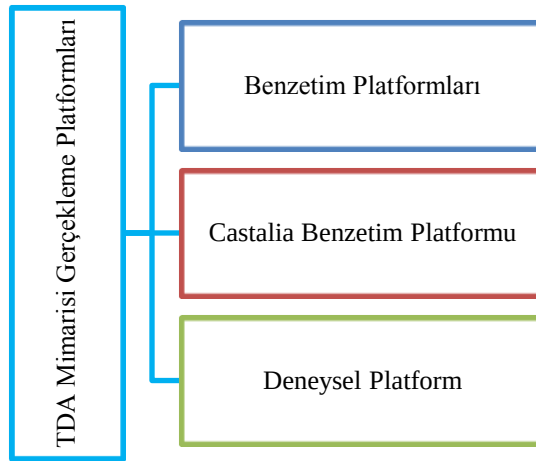
Tablo 4.1. Yönlendirme tekniklerinin sınıflandırılması ve karşılaştırılması

Yönlendirme Tekniği	Yönlendirme Sınıfı	Kaynak Kullanımı	Enerji Verimliliği	Veri Toplama	Ölçeklenebilirlik
SPIN	Düz	Düşük	Düşük	Var	Sınırlı
DY	Düz	Düşük	Düşük	Var	Sınırlı
MCFA	Düz	-	Düşük	Yok	Sınırlı
RR	Düz	-	Düşük	Var	Sınırlı
GBR	Düz	-	Düşük	Var	Sınırlı
CADR	Düz	Düşük	Düşük	Var	Sınırlı
COUGAR	Düz	Düşük	Düşük	Var	Sınırlı
ACQUIRE	Düz	-	Düşük	Var	Sınırlı
EAR	Düz	İyi	İyi	Yok	Sınırlı
LEACH	Hiyerarşik	İyi	İyi	Var	İyi
PEGASIS	Hiyerarşik	İyi	İyi	Yok	İyi
MECN	Hiyerarşik	İyi	Düşük	Yok	Kötü
TEEN/APTEEN	Hiyerarşik	İyi	İyi	Var	İyi
VGA	Hiyerarşik	-	Düşük	Var	İyi
GAF	Konum	Düşük	İyi	Yok	Sınırlı
GEAR	Konum	Düşük	Düşük	Yok	İyi
SPAN	Konum	-	Düşük	Yok	Sınırlı
MFR/GEDIR	Konum	-	Düşük	Yok	Sınırlı
GOAFR	Konum	-	Düşük	Yok	İyi
SAR	QoS	-	İyi	Var	Sınırlı
SPEED	QoS	-	İyi	Yok	Sınırlı

5. TELSİZ DUYARGA AĞ MİMARİSİ İÇİN UYGULAMA ORTAMLARI

5.1. Giriş

Bu doktora çalışmasında önerilen yönlendirme mimarisinin uygulanması için benzetim programı ve deneysel set olmak üzere iki ortam kullanılmıştır. TDA’larda uygulama geliştirmek için öncelikle yapılan çalışmaların bir benzetim programı üzerinde uygulanarak sonuçların elde edilmesi gerekmektedir. Benzetim programı üzerinde yapılan çalışmalardan başarılı sonuçlar elde edildiğinde ise bu sonuçların geçerliliğinin kontrol edilmesi amacı ile sistemin deney seti üzerinde test edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu bölümde literatürde TDA için kullanılabilecek benzetim programları belirtilerek, çalışmamızda kullandığımız Castalia benzetim programının temel kullanım sistemi seçimi nedenleri açıklanacaktır. Sonrasında Trakya Üniversitesi, Bilgisayar mühendisliği Bölümü Kablosuz Duyarga Laboratuvarı’nda bulunan deney düzenekleri tanıtılacaktır. Önerdiğimiz yönlendirme mimarisi ile ilgili tasarıma ait sonuçların doğruluğu iki aşamada sınanacaktır. Birinci aşamada Kablosuz Duyarga Laboratuvarı’nda bulunan duyarga sistemi kadar düğüm üzerinden sonuçlar elde edilecektir. İkinci aşamada ise aynı düğüm sayısına ait benzetim programı sonuçları elde edildikten sonra her iki sonuç kıyaslanacaktır. Okuyucuların sonraki bölümde açıklanacak konuları daha iyi anlayabilmeleri için bu bölüm hazırlanmıştır. Bu bölümde açıklanan konular Şekil 5.1’de gösterilmiştir



Şekil 5.1. TDA mimarisi gerçekleştirme platformları

5.2. Benzetim Platformları

Sistem tasarımı ve iyileştirme çalışmaları yapılırken bu işlemlerin hızlı ve düşük maliyetler ile gerçekleştirilip sonuçların gerçeğe yakın gözlemlenmesi önemlidir. Sistemin verimliliğini ölçmek ve yapılan iyileştirmeleri değerlendirmek için çeşitli performans ölçütleri kullanmak gerekmektedir. Bu işlemler ve değerlendirme süreçlerini maliyet ve zaman parametreleri dikkate alındığında, fiziksel ortamda gerçekleştirilmeden önce bilgisayar ortamında modellenmesi ve modelin çeşitli benzetim platformları ile sonuçlarının analiz edilmesi gerekmektedir. Benzetim platformları ile sistemin neden – sonuç ilişkilerini değişik koşullar altında denenebilmektedir. Bu sayede tasarlanacak olan sistemin her türlü davranışını gözlemlemek mümkün olmaktadır. Bu gözlemlerin ışığında tasarlanan sistem üzerinde denemeler yapmak, denemelerin sonuçlarına göre iyileştirmeler yapmak mümkün hale gelmektedir.

Benzetim platformlarının temel amacı sistem gerçeğe yakın modellenmesi ile değişiklik yapılması ve iyileştirilmesi aşamalarında ortaya çıkan maliyetleri en aza indirmek için yapılan bu işlemlerin bilgisayar ortamında modellenmesinin sağlanmasıdır. Bu yüzden tüm analizler ve iyileştirme çalışmaları benzetim ortamı üzerinde tamamlandıktan sonra tasarlanan sistemi fiziksel ortama taşımak zaman ve maliyet açısından araştırmacılara büyük avantaj sağlamaktadır [107], [151].

Benzetim platformlarının kullanılmasını bir başka avantajı oldukça maliyetli olan arazi ve donanım sağlanmasında yaşanılacak sıkıntıları ortadan kaldırmasıdır.

TDA’lar üzerinde yapılan çalışmalarda kabul gören benzetim platformları Castalia [152], GlomoSim [153], Ns-2 [154], Ns-3 [155], TosSim [156], UwSim [157], Avrora [158], Sens [159], Cooja [160], Shawn [161], EmStar [162], J-Sim [163], Sense [164], VisualSense [165], (J) Prowler [166] olduğu görülmektedir. Bu benzetim platformlarının TDA uygulamasının yapısına, sistemin karmaşıklığına, sistemin hangi birimler üzerinde geliştirme yapacağına veya kullanılacak olan programlama diline göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır [31], [128]. Tablo 5.1’de TDA uygulamalarında kullanılan benzetim platformlarının karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 5.1. TDA uygulamalarında kullanılan benzetim platformlarının karşılaştırması [26]

Benzetim Programı	Dil	Faydaları	Sınırlamaları
Ns-2, Ns-3	C++	Kolay yeni protokol ekleme Çok sayıda yayınlanmış protokol Görselleştirme araçlarına sahip	Sadece 2 kablosuz MAC protokolü, 802.11 ve TDMA kullanır.
TOSSIM	NesC	Uygulama kaynak kodu değişmeden, yüksek doğruluk derecesi elde etme	Derleme adımları zamanlama ve kod kesme özellikleri kayıpları
GlomoSim	Parsec	Paralel benzetim yeteneği KAA'lar için özel olarak tasarlanması Görselleştirme araçlarına sahip	Etkili düşük seviyede tasarım varsayımları nedeniyle IP ağları ile sınırlı Yeni protokol tasarımına izin vermez
UWSim	C++	Su altı kablosuz algılayıcı ağları için tasarlanmıştır.	Sınırlı sayıda işlev desteği Sadece su altı kablosuz algılayıcı ağlar için kullanılabilirliği
Avrora	Java	10.000'e kadar düğümü destekler Büyük ölçekli ağlarda zamana bağlı doğru sonuçlar verir.	Model zaman sürüklenmeleri başarısızdır. TOSSIM'den %50 daha yavaş Hareketsiz model
SENS	C++	Platform bağımsız Kullanıcılar uygulamaları biraraya getirebilir. Değiştirilebilir ortamlar tanımlanabilir.	MAC protokolün doğru modelleyemez Sadece fiziksel olaylar için ses'e destek verir.
COOJA	Java	Hem donanım hemde yazılımsal benzetim Büyük ölçekli davranış protokolleri ve algoritmalar tanımlanabilir	Son derece verimli değil Sınırlı düğüm tipini destekler Geniş ve zamana bağlı benzetim zor
Shawn	Java	Dağıtık protokollerin uygulanmasıyla sınırlı değil Büyük ağların benzetimin yapabilir	Radio yayılım özelliklerini veya düşük katman sorunları gibi konularda detaylı benzetim yapılmasına izin vermez
EmStar	Linux	Farklı yürütme platformlarında çalışabilir Simülatör ve emülatör desteği sunar EmStar bileşen tabanlı model kullanım başarılı bir ölçeklenebilirlik sağlar	Sadece düğüm türleri için kod çalışır Paralel benzetim desteklemez Diğer programlar kadar hızlı ve verimli değildir.

Tablo 5.1. Devamı

Benzetim Programı	Dil	Faydaları	Sınırlamaları
J-Sim	Java	Radyo enerji tüketim dışında enerji modeli sunar Mobil kablosuz ve algılayıcı ağları destekler Bileşen odaklı mimari sunar	Düşük verimli benzetim Tek MAC protokolü 802.11 i kullanır. Gereksiz çalışma süresi yükü
SENSE	C++	Dengeli modelleme, metodoloji ve benzetim ortamı Verimli bellek kullanımı, hız, genişleme ve yenide kullanılabilme	Yeterli KAA uygulaması yok Kapsamlı model kümesi sunamamak Görselleştirme aracı olmaması
VisualSense	Ptolemy II	Doğru ve genişleyebilir bir radyo modeli Lokalizasyon için kullanılabilen bir ses modeli	Kablosuz ortam üzerinde ses dışında herhangi bir fiziksel olayı sağlayamaz.
(J) Prowler	Matlab/Java	Olasılıksal KAA benzetimi Doğru bir radyo modeli sunar	Sadece TinyOS daki varsayılan tek MAC protokolü kullanır
Castalia	C++	Fiziksel Süreç Modelleme Cihaz gürültülerini algılama Düğüm saat sürüklenmeleri Birden fazla MAC protokolü Katmanlı yapı Farklı yönlendirme protokolü desteği	Algılayıcı özel değildir. Yapılmış kodları test etmede verimsiz

Bu doktora çalışmasında TDA'lar için yönlendirme mimarisi tasarlanacaktır. Tasarlanacak olan sistemin en önemli başarımlar ölçütü ise enerji verimliliği sağlaması olarak ortaya konmuştur. Yapılacak olan çalışmada ağı yaşam ömrünü tüketmesi uzun zamanlar alabilmektedir. Bunun yerine benzetim platformları ile ağ üzerindeki süreçleri hızlandırmak mümkündür. Bu yapılacak olan analiz çalışmaları açısından son derece önemlidir.

Benzetim platformlarının avantajları incelendiğinde bu doktora çalışmasında bir benzetim programından yararlanılmasının uygun olacağı görülmüştür. Burada geliştirilen çalışmada katmanlı bir yapı kullanılması, sürecin tümü üzerinde analiz yapılması gerekliliği, DD'lerin ve tüm ağın enerji tüketimlerinin analizinin gerekliliği, ağ yaşam ömrü üzerine analizlerin yapılması, ayırık olayların incelebilmesi, analizlerin üzerinden raporlar oluşturulabilmesi gibi ihtiyaçlar göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmalar için OMNET++ altyapısını kullanan Castalia benzetim platformunun seçilmesi uygun görülmüştür.

5.2.1. Castalia Benzetim Platformu

5.2.1.1. Castalia'nın Yapısı ve Özellikleri

OMNET++ (Objective Modular Network Tested in C++) [167], nesne yönelik modüler bir ağ benzetim ortamıdır. OMNET++ üzerinde uygulamanın çeşidine göre uygun olan platformlardan biri ile benzetim çalışmaları yapmak mümkündür. Castalia ise OMNET++ altyapısını kullanan TDA'lar için özel olarak geliştirilmiş benzetim platformudur. Castalia benzetim platformu ile TDA'lar üzerinde;

- Haberleşme trafiğinin modellenmesi [168]
- İletişim protokollerinin modellenmesi [169]
- DD'lerin enerji tüketimlerinin analiz edilmesi [167]
- Ağ yaşam ömrü üzerine çalışmalar yapılması [170]
- Karmaşık sistemlerin başarma ve analiz sonuçlarının değerlendirilmesi [171]
- Dağıtık mimariye sahip modellerin oluşturulması [171]
- Ayrık olayların incelenmesi [167]

gibi konularda çalışmalar yapılması mümkündür.

Castalia platformu araştırmacılara kolay bir şekilde analiz yapabilmelerine imkan tanıyan modüler bir yapı ortaya koymaktadır. Bu modüler yapı sistem modellemesi için bir çok avantajı da beraberinde getirmektedir. Bunlar;

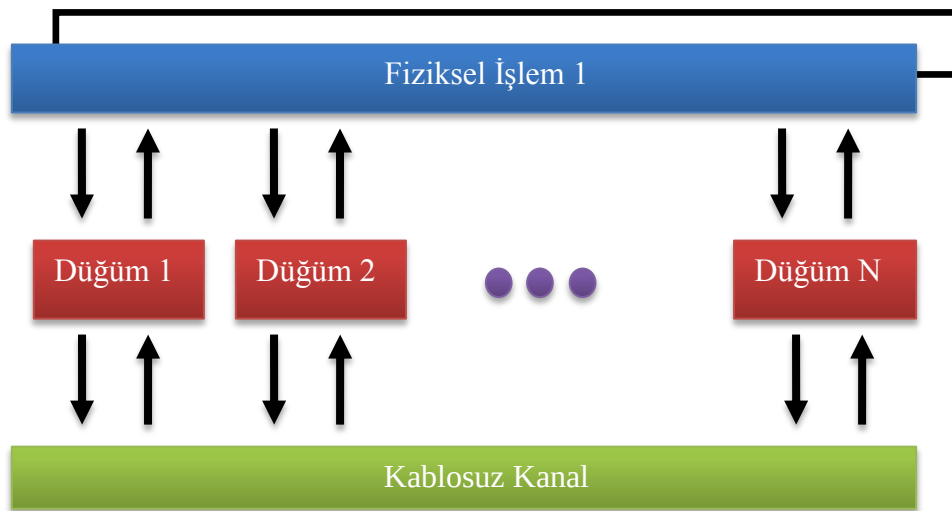
- DoS, Unix veya Linux platformları üzerinde çalışabilecek platform bağımsız yazılım gerçekleştirme imkanı,
- Gerçekleştirilen yazılımlar üzerinde kolayca hata ayıklama ve değişken denetimi yapabilme,
- Benzetim sonuçlarının vektörel veya sayısal olarak çizilebilmesine olanak sağlayan grafik arabirimi,
- Paralel işlem yapabilme ve çoklu işlemci ile çalışabilme desteği,
- Benzetimlerin başlangıç parametrelerini tanımlamak için “ini” uzantılı dosyaları kullanarak yapılandırma imkanı,
- Zengin benzetim kütüphanesi [169],

olarak sıralanabilir [171]. Ayrıca Castalia platformu araştırmacıların hızlı ve kolay bir şekilde çalışma sonuçlarını elde edebilmeleri için OMNET++'ın altyapısını kullandığı için oldukça esnek bir yapıya sahiptir [167]. Castalia platformunun temel özelliklerini şöyle listelemek mümkündür.

- Deneysel ölçümlere dayalı gelişmiş kanal modeli sunmak
 - Model düğümler arasında basit olmayan bağlantılar ve yol kayıplarıyla ilgili bir harita tanımlar
 - Yol kaybının zaman değişimi için karmaşık model sunar
 - Düğüm hareketliliğini destekler
 - Girişim ayrı bir özellik olarak değil, alınan sinyal gücü olarak ele alınır
- Düşük güçte iletişim için gerçek radyolara dayalı gelişmiş radyo modeli sunmak
 - Modülasyon tipine, paket boyutuna SINR tabanlı alım olasılığı
 - Çoklu güç seviyelerine izin verilen bireysel düğüm davranışları
 - Farklı güç tüketimi ve gecikme durumları aralarında geçiş
 - Gerçekçi modelleme
- Genişletilmiş algılama modelleme şartları sağlamak
 - Son derece esnek bir fiziksel süreç modeli
 - Cihaz gürültülerini, güç tüketimlerini, sapmaları algılama
- Düğüm zaman kaymalarına tanımlayabilme
- MAC ve yönlendirme protokolleri kullanabilmek
- Adaptasyon ve genişleme durumlarına göre tasarım yapabilmek

5.2.1.2. Castalia'nın Modül Yapısı

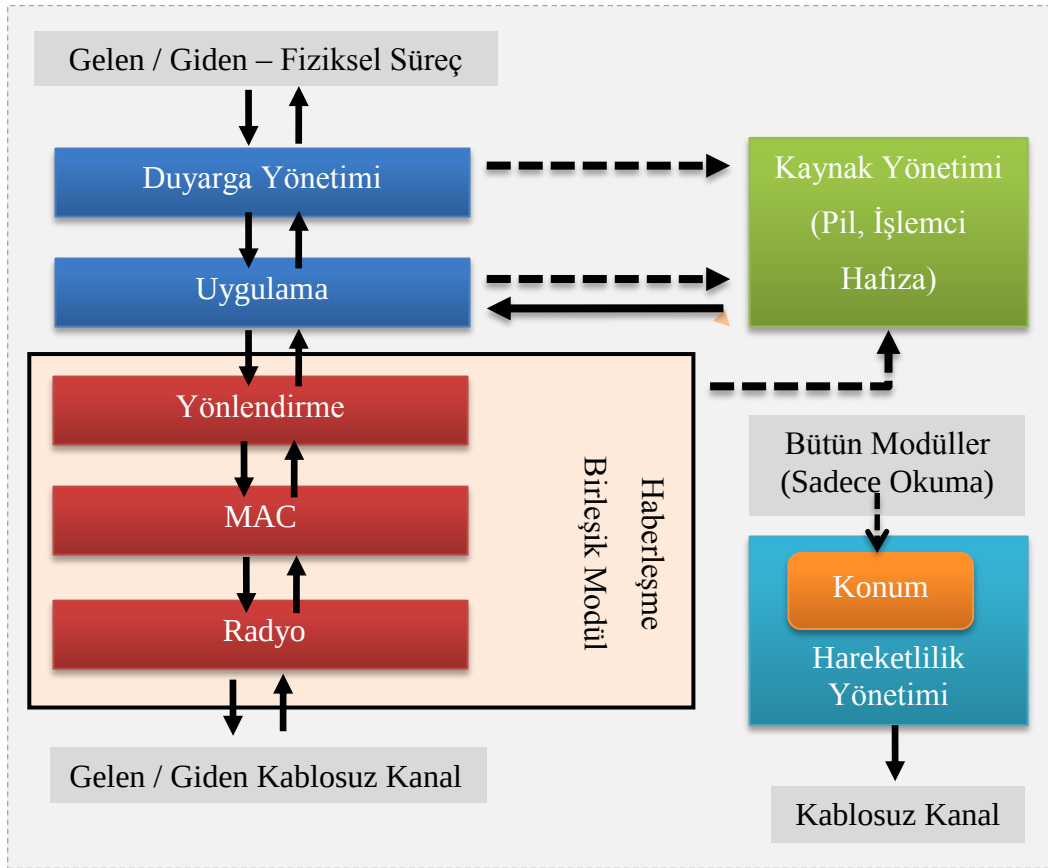
Castalia platformunun modül yapısı Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Castalia modül yapısı

Castalia altyapısında ağ topolojisinde kullanılacak olan düğümler birbirlerine bir kanal aracılığı ile bağlanmaktadır. Düğümlerin hiç biri birbiri ile doğrudan bağlı değildir. Bir düğüm diğer bir düğüm ile iletişime geçecek ise öncelikle veriyi kablosuz kanala iletir. Kablosuz kanalda verinin ulaşması gereken düğüme veriyi aktarır. Böylece iki düğüm arasında iletişim gerçekleşmiş olur. Modüler yapı içerisinde düğümlerin birbirleri ile haberleşmesi, algılama yapması, işlemler ile ilgili süre bilgilerinin tutulması gibi işlemler için fiziksel süreci tanımlayan fiziksel işlem modülü bulunmaktadır. Bu modül çoklu algılama aygıtlarına sahip ve bunları temsil eden birden çok fiziksel sürece sahip olma yeteneğine sahiptir [171].

Castalia platformunda kullanılan düğümlerin her biri alt birimlerden oluşmaktadır. Bu birimler birleşik bir yapıya sahiptir. Düğümlerin içyapısı Şekil 5.3'de gösterilmektedir. TDA uygulamasında ki amaca yönelik olarak birleşik düğüm modülü içerisindeki birimlerden biri veya birkaçı birlikte kullanılabilir.



Şekil 5.3. Castalia birleşik düğüm modülü iç yapısı

Şekil 5.3'de kesikli olarak belirtilen oklar bir işlevin çağırılmasını, düz oklar ise aktarım yapıldığını anlamına gelmektedir. Örneğin uygulama içerisinde enerji tüketim

bilgisini almak istiyor ise kaynak yönetimi fonksiyonu çağırılmaktadır. Birleşik düğüm modülü içerisindeki uygulama katmanı genellikle ağ üzerinde yapılacak temel uygulamalar için kullanılır. Yönlendirme modülü veri paketinin bir başka düğüme gönderilmesi için gerekli olan yönlendirme prosedürlerini uygular. MAC modülü ağ içerisinde verinin doğru bir şekilde yerine ulaşabilmesini kontrol eder. Radyo modülü ise veri paketinin radyo sinyalleri üzerinden fiziksel ortama yayar.

Castalia platformunda NED (Network Description Language) ve C++ olmak üzere iki dil kullanılmaktadır. Bir TDA uygulaması castalia benzetim platformunda geliştirilirken bu modüllerden hangileri ile ilgili çalışma yapılacaksa o modüller için gerekli yazılımlar gerçekleştirilir. Bu yazılımın gerçekleştiği dile NED dili denilmektedir. Oluşturulan NED dosyaları benzetim platformu aracılığı ile derlenerek C++ kodlarına dönüştürülür.

NED dili düğümler arasındaki bağlantıların tanımlanması, benzetilecek ağ modelinin tanımlanması için kullanılmaktadır. C++ dili ile de tanımlanan modüllerin nasıl davranacağı uygulamanın yapısına göre oluşacak yapı ile ilgili süreçler tanımlanmaktadır [172].

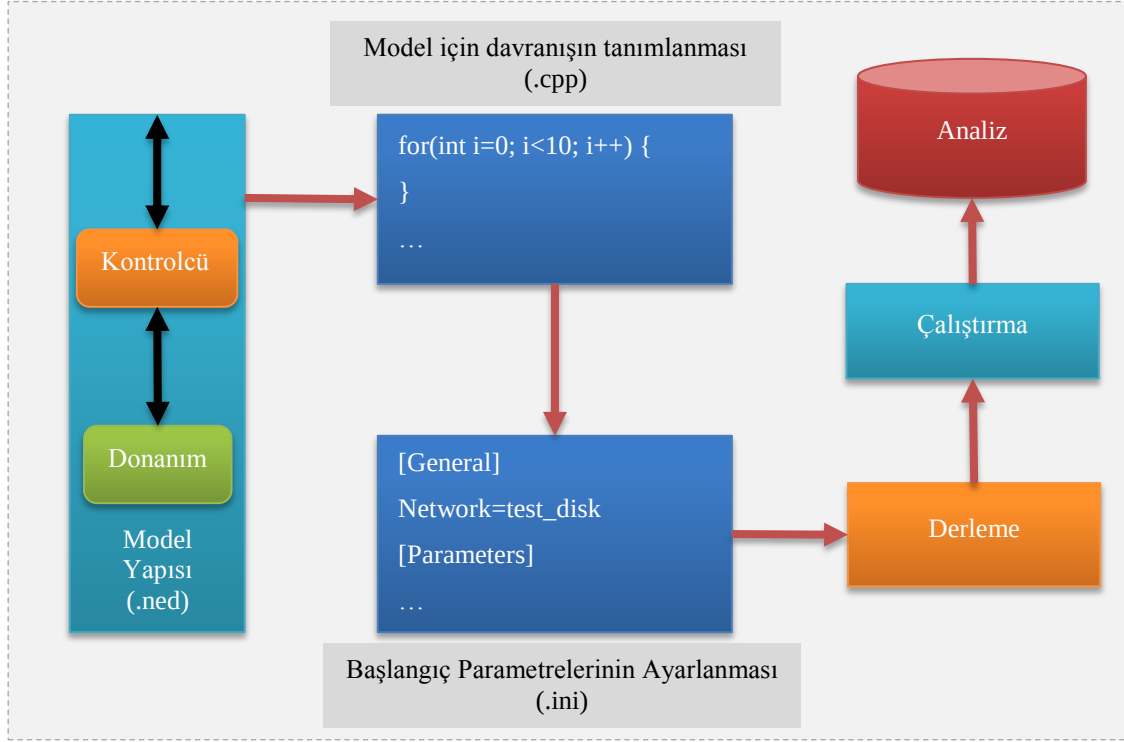
5.2.1.3. Benzetim Modelinin Derlenmesi

Castalia benzetim platformu Linux işletim sistemi üzerinde OMNET++ platformunu altında çalışmaktadır. Castalia, Linux tabanlı bir platform ve aynı zamanda açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Bu yüzden castalia üzerindeki yapılandırmalar, tanımlamalar komut satırı ile gerçekleştirilmekte, bu işlemler için herhangi bir grafik arayüz bulunmamaktadır.

Castalia platformunda bir çalışmanın derlenme aşamaları Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Öncelikle bağlantıların tanımlandığı ve sistem modelinin ortaya konduğu *Ned* dosyası oluşturulur. Bir sonraki aşamada sistemin modeli için gerekli olan başlangıç parametrelerinin olduğu *ini* dosyası oluşturulur. Son olarak ta uygulamanın yapısına bağlı olarak ağ topolojisi ile ilgili tanımlamalar, geliştirilen algoritmalar için C++ kodları oluşturulur. Oluşturulan dosyalar derlenerek çalıştırılır. Çalışan sistem istenilen çıkış parametrelerini dosyalar şeklinde oluşturur. Oluşturulan dosyalar istenilirse Castalia içerisinde bulunan fonksiyonlar ile grafikler halinde gösterilebilir.

Castalia içerisinde işlemler ve klasör yapıları hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Platformun kendine ait, konfigürasyon, modül oluşturma, sonuç çıktılarını toplama, çalıştırma, zamanlayıcı tanımlama, uygulama modülü tanımlama komutları bulunmaktadır. Bu komutlar kullanılarak komut satırından istenilen bilgilere ulaşılabilir. Platform

kurulumu gerçekleştirildiğinde 4 ana klasör ve alt klasörleri oluşmaktadır. Bu klasörler bin, out, simulations ve src klasörleridir.



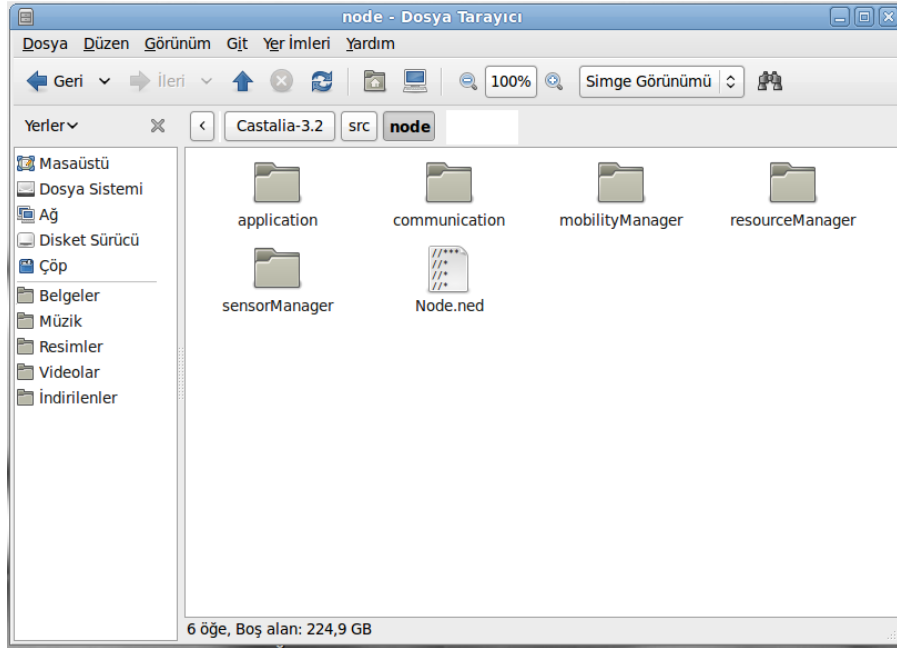
Şekil 5.4. Castalia'da benzetim modelinin derlenmesi

Bin klasörü model ile ilgili yapılacak çizimlerde ve sonuçlarda kullanılan fonksiyon kütüphanelerini barındırmaktadır. Out klasörü sistemin çalışması için gerekli olan dosyaları içerir. Simulations klasörü gerçekleştirilmek istenen testler için kullanılır. Hazırlanmış olan sistemin benzetim ortamında çalıştırılması için bu klasör gereklidir. Yine ağ için gerekli başlangıç parametrelerinin olduğu ini dosyası bu klasör altında bulunmaktadır. Platform içerisinde benzetim çalışmalarının yapıldığı klasör src klasörüdür. Src klasöründe fiziksel ve radyo yayınlarını kontrol eden işlemler için iki klasör ve katmanlı yapı üzerinde çalışmak için node adı verilen bir klasör bulunmaktadır. Node klasörün içeriği Şekil 5.5'de gösterilmiştir.

Castalia platformunda hangi katman üzerinde çalışılacak ise o platform için önceden tanımlanmış klasör altında çalışılması gerekmektedir. Eğer birden fazla katman üzerinde çalışılacak ise aynı şekilde ilgili klasörler altında çalışmalar yapılarak ağ topolojisini belirleyen ini dosyasında belirtilmesi gerekmektedir.

Buna göre eğer uygulama katmanı ile ilgili bir çalışma yapılacaksa *application*, iletim ile ilgili ise *communication*, hareketlilik yönetimi ile ilgili ise *mobility manager* ve kaynak

yönetimi ile ilgili ise *resource manager* ve algılayıcı yönetimi ile ilgili ise *sensor manager* klasörleri içerisinde gerekli işlemlerin yapılması gerekmektedir.



Şekil 5.5. Node klasörü içeriği

Communication klasörü altında radyo, yönlendirme ve mac klasörleri bulunmaktadır. Uygulama hangisini ilgilendiriyorsa o bölüm içerisinde gerekli kodların yazılıp derlenmesi gerekmektedir.

Bu doktora çalışmasında, yönlendirme mimarisi tasarımı yapılacağından ağırlıklı olarak node klasörü altındaki *communication* klasörü altında çalışılmıştır. Diğer katmanlar gerektiğinde fonksiyon olarak çağırılarak çalışması sağlanmıştır.

5.3. Deneysel Platform

Bu doktora çalışmasında önerilen yönlendirme mimarisi için kullanılan ikinci ortam uygulamanın çalışıp çalışmadığının test edildiği deneysel ortamdır. TDA'larla ilgili uygulama geliştirilirken uygulamanın deneysel ortam maliyetlerinin yüksek olması ve gerçekleştirme zorluğundan dolayı benzetim ortamında çalıştırılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Geliştirilen uygulamaların büyük ölçekli ağ ortamları üzerindeki sonuçları benzetim programı üzerinden elde edilirken, sistemin çalışma sürecinin gerçek ortamda kontrolünde yapılması çalışmanın doğruluğu açısından önemli bir kavramdır. Bu nedenle büyük ölçekli bir ağın aynı özelliklerini taşıyan makul sayıda donanım ile oluşturulacak küçük bir örnek ağ üzerinden sistemin çalışması kontrol edilir. Böylece

benzetimden elde edilecek sonuçların gerçek ortam üzerinde de benzer sonuçları vereceği gösterilmiş olur.

5.3.1. Deney Donanımlarının Tanıtılması

Bu doktora çalışmasında deneysel ortam için 2 adet Jennic marka JN5148-EK10 Evaluation Kit deney seti kullanılmıştır. Set içerisinde bulunan donanımlar Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Deney seti içeriği

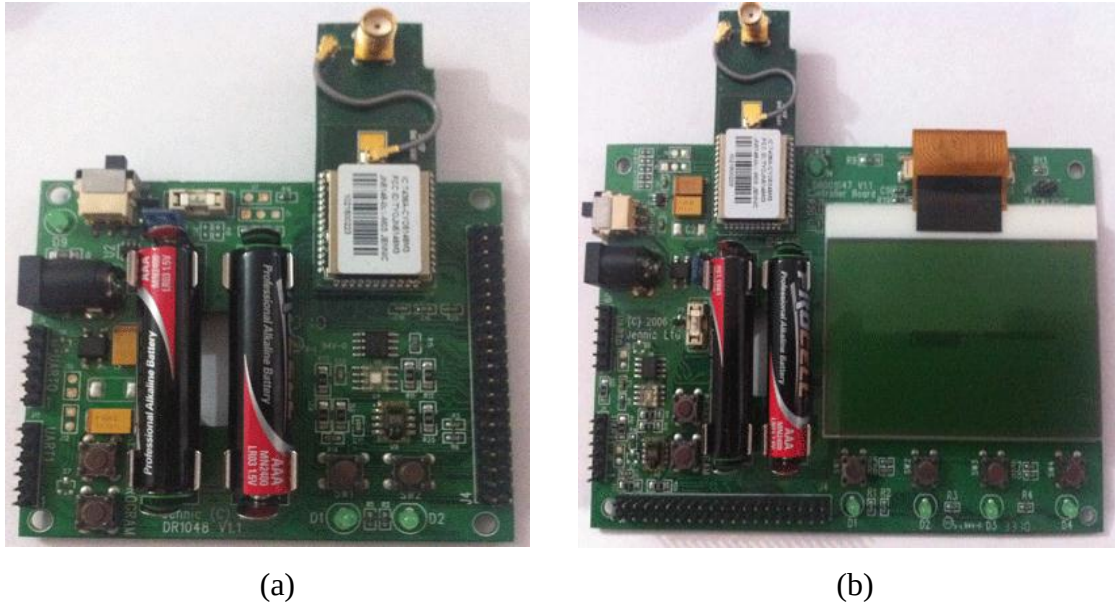
Şekil 5.6'da gösterilen 1 numaralı şekil hedef ya da kaynak düğüm olarak kullanılabilen düğümü, 2 numaralı şekil duyurga ya da yönlendirici olarak kullanılabilen düğümleri, 3 numaralı şekil alıcı / verici modüllerini, 4 numaralı şekil antenleri, 5 numaralı şekil bilgisayar bağlantı kablolarını, 6 numaralı şekil ise piller göstermektedir.

Çalışmada kullandığımız her bir set içerisinde 4 adet yönlendirme amacı ile kullanılacak duyurga düğüm, 1 adet hedef yada kaynak düğüm özellikli düğüm elemanı bulunmaktadır. Kullanılan deney setleri, OMNET++ altyapısını kullanan Castalia benzetim programında gerçekleştirilen çalışmaların hedef, kaynak ve yönlendirme amacı ile kullanılan duyurga düğümler üzerinde çalıştırılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu

doktora çalışmasında 2 set kullanılarak 8 duyarga düğüm, 1 kaynak düğüm, 1 hedef düğümünden oluşan 10 düğümlü bir ağ modeli test ortamı olarak elde edilmiştir. Düğümlerin özellikleri şu şekildedir;

- Kullanılan tüm duyargalar, sıcaklık, nem ve ışık algılama özelliğine sahiptir.
- Kaynak ve hedef düğümler üzerinde adaptör bağlantısı yapılabilir.
- Duyarga düğümler yönlendirici düğüm olarak kullanılabilir.
- Düğümlere anten bağlanarak RF üzerinden haberleşmeleri sağlanabilir.
- Bilgisayar bağlantı kabloları ile düğümler bilgisayara bağlanarak geliştirilen yazılım ve algoritmalar yüklenebilir. Böylece donanımlar üzerinden tasarlanan algoritmaların çalıştırılabilmesine olanak sağlanmış olur.

Kullanılan duyarga düğüm, hedef ve kaynak düğüm yapısı Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



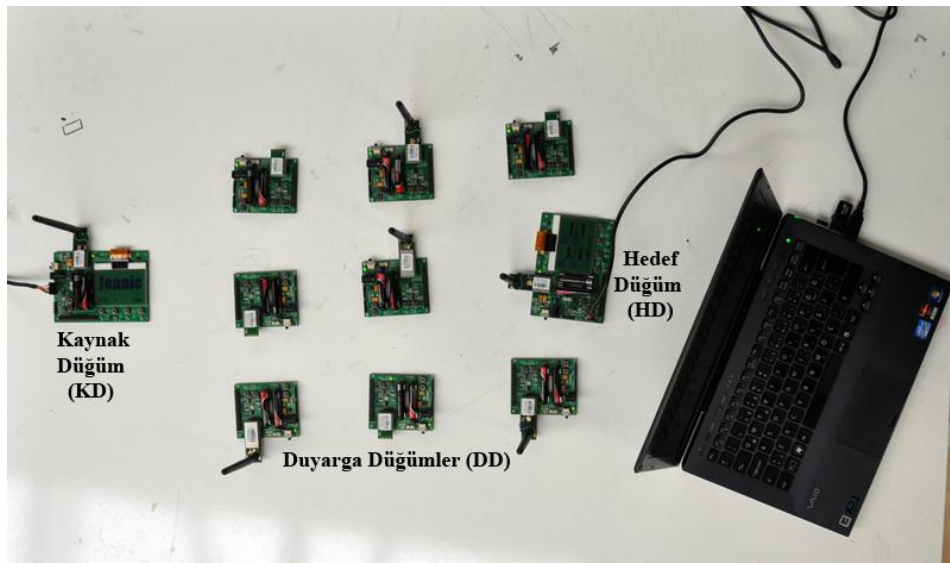
Şekil 5.7. Kullanılan düğümler a) Duyarga düğüm b) Hedef ve kaynak düğüm

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi düğümler 2 adet AA pil ile ya da üzerlerinde bulunan adaptör bağlantı yuvaları ile adaptörle beslenebilir. Uygulamanın yapıldığı yöntemle göre enerji beslenme yöntemleri değişiklik göstermektedir.

5.3.2. Kullanılan Deney Düzenegi

Bölüm 5.3.1’de gösterilen donanımlar kullanılarak tez çalışması için gerekli olan deney düzenegi oluşturulacaktır. Düzenek içerisinde 8 adet yönlendirme için kullanılan duyarga düğüm 1 adet hedef düğüm ve 1 adet kaynak düğüm bulunmaktadır. Böylece 10 düğüme

sahip bir ağ modeli oluşturulacaktır. Önerilen model gereği kaynak düğüm ve toplayıcı düğüm adaptör bağlantısı ile enerji beslenmesi sağlanmıştır. Diğer düğümler 2 AA pil ile enerjilerini sağlamaktadır. Bu doktora çalışmada önerilen ve bölüm 6’da ayrıntılı olarak açıklanan TDA’larda enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi tasarımı ve gerçekleştirilmesi ile ilgili yapının deney setleri kullanılarak gerçek ortam testlerinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Yükleme işlemi için düğümler bağlantı kablosu ile bilgisayara bağlanarak bilgisayarda bulunan dosyalar donanımlara yükleme yazılımı ile yüklenmiştir. Önerilen modelin testinin yapıldığı deney düzeneği Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Kullanılan deney düzeneği

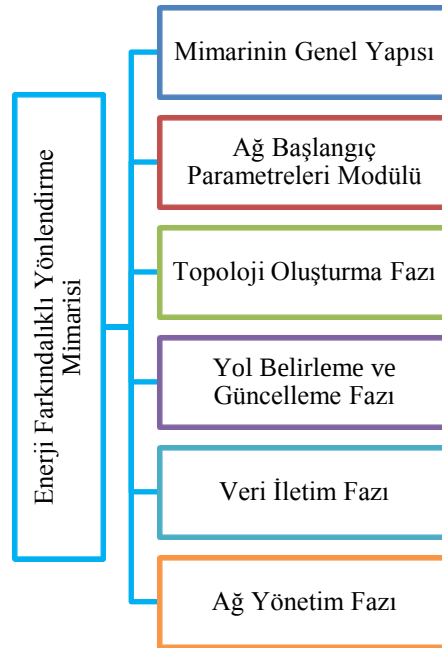
Şekil 5.8’de açıkça görüldüğü gibi kullanılan deney düzeneğinin 1 adet verilerin toplandığı hedef düğüm, 1 adet algılama işleminin gerçekleştiği kaynak düğüm ve 8 adette kaynaktan algılanan verilerin hedefe aktarılması için kullanılan duyarga düğümü bulunmaktadır. HD ve KD’nin enerji beslemeleri adaptör ile DD’lerin beslemeleri ise 2 adet AA pil ile yapılmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan yolda KD’den HD’ye ulaşım için kullanılan atlama sayısı 10 olmaktadır. Böylece doktora çalışmasında önerilen yönlendirme mimarisinin belirlediği yollar içerisinde 10 atlama noktasına sahip bir yol örnek alınarak sistemin çalışması ve performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Hazırlanan deneysel ortamda tüm DD’lerin yol tablolarına sadece bir önceki düğümden veri alabileceği ve bir sonraki düğüme veri gönderebileceği bilgisi yüklenmiştir.

6. TELSİZ DUYARGA AĞLARDA ENERJİ FARKINDALIKLI YÖNLENDİRME MİMARİSİ TASARIMI ve GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

6.1. Giriş

Bu bölümde Telsiz duyurga ağlar için doktora çalışmasında önerilen enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisinin yapısı ayrıntıları ile tanıtılacaktır. Yapılan çalışma protokol işlenmesi tabanlı bir yönlendirme mimarisi çalışmasıdır. Tasarımda çok yollu yönlendirme teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada düz ağ tabanlı yönlendirme yöntemleri benimsenmiştir.

Bu bölümde öncelikle mimarinin genel yapısı anlatılacak, daha sonra mimari içerisinde kullanılan tüm fazlar aşama aşama anlatılacaktır. Bu bölümde ele alınan konular Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

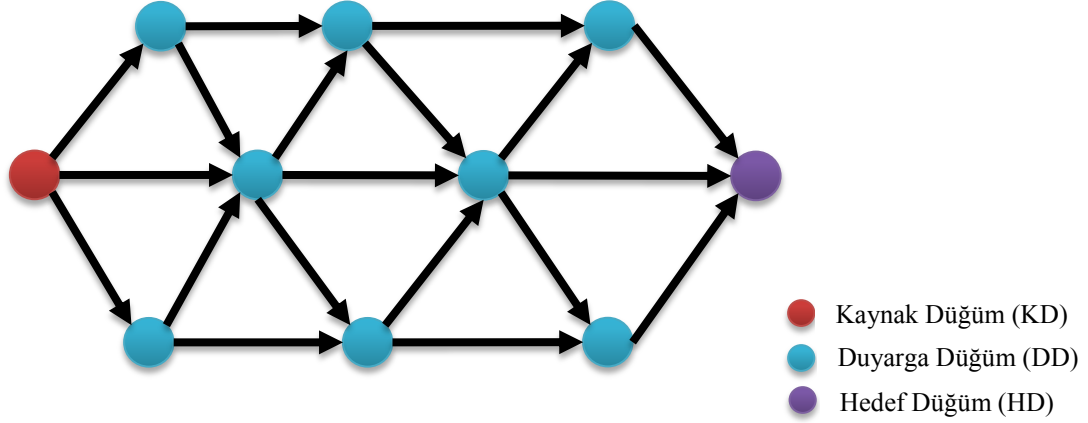


Şekil 6.1. Enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi süreçleri

6.2. Tasarlanan Mimarinin Genel Yapısı

Bu doktora çalışmasında ağın toplam yaşam ömrünü verimli şekilde kullanmaya yönelik bir yönlendirme mimarisi ortaya konulmuştur. Mimari yapının ve dolayısı ile tez çalışmasının amacı bir kaynak düğümden bir hedef düğüme gönderilecek olan verinin enerji açısından en etkin yol üzerinden gönderilmesini sağlamaktır. Şekil 6.2’de bir TDA

ağının yapısı gösterilmektedir. Bu ağ yapısı bir alan içerisinde yerleştirilmiş duyarga düğümleri (DD), bilgiyi algılayıp ileten kaynak düğüm (KD) ve ölçülen verilerin toplandığı hedef düğüm (HD) den oluşmaktadır.

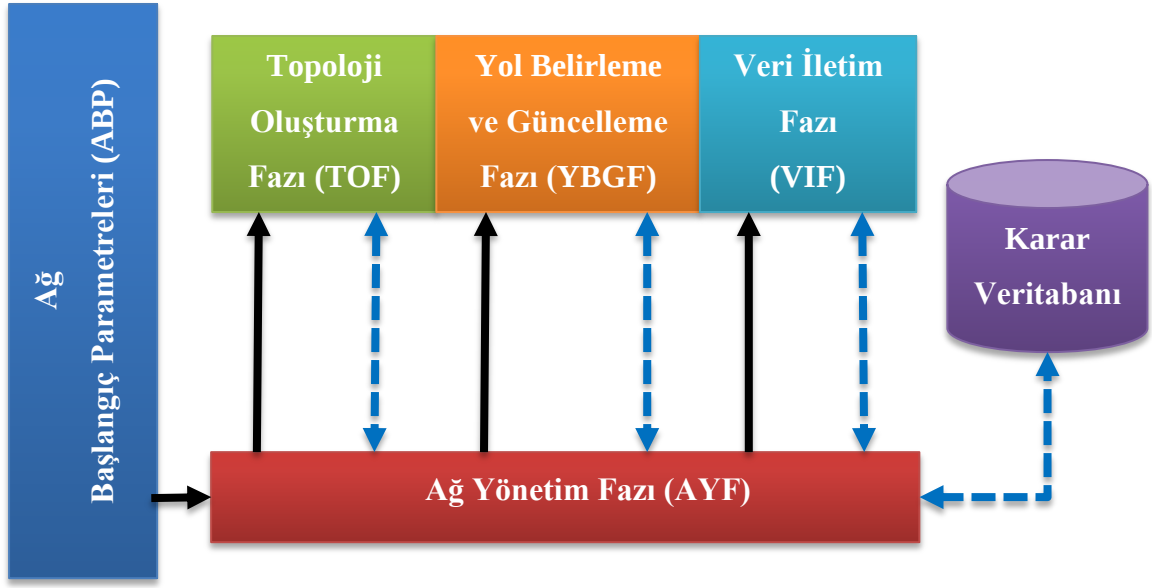


Şekil 6.2. TDA yapısı

Bu doktora çalışmasında KD ortam ile ilgili algılama işlemlerini yapmak ve algıladığı bilgiyi HD'ye ileterek yaymak ile görevlidir. HD'ler ise KD'den gelen verileri depolamak, işlemek ve ağ üzerinde yapılan tüm iletişim süreçlerini yönetmek ile yükümlüdür. Bu doktora çalışmasında HD ağ içerisindeki tüm işleyiş ile ilgili karar mekanizmasıdır. DD'lerin görevi KD'nin bilgisini HD'ye iletmesi köprü vazifesi görmektir. Çalışmada enerji verimliliği ile ilgili değerlerin ortaya çıkabilmesi için DD'lere algılama işlemi yaptırılmamıştır.

Bu doktora çalışmasında tasarlanan yönlendirme mimarisi;

- Ağ topolojisinin oluşturulması
 - Muhtemel yolların belirlenmesi
 - Veri iletiminin yapılması
 - Oluşacak olan sorunların giderilmesi ve fazlar arasındaki ilişkilerin tanımlanması
- fazlarından oluşmaktadır. Bu çalışmaya ait yönlendirme mimarisinin genel yapısı Şekil 6.3'de gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Sistemin genel mimari yapısı

Sistem mimari yapısında ağ topolojisine göre gerekli olan başlangıç parametreleri tanımlanabilmesi için gerekli olan ağ başlangıç parametreleri modülü (ABP), Sistem mimari yapısında ağ topolojinin oluşturulması için bir faz, yönlendirme yollarının bulunması için bir faz, KD'den HD'e verinin iletilmesi için bir faz ve ağ işleyişini yönetmek için bir faz kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu fazlar kısaca;

- **Topoloji Oluşturma Fazı (TOF):** KD ile HD arasındaki komşuluk ilişkilerinin ortaya çıkarılarak ağ içerisindeki yolların belirlendiği fazdır.
- **Yol Belirleme ve Güncelleme Fazı (YBGF):** TOF fazında elde edilen yol bilgilerine göre ağ yaşam ömrünü arttırmaya yönelik olarak bu doktora çalışmasında önerilen algoritma ışığında etkin yolların önceliklendirildiği fazdır.
- **Veri İletim Fazı (VIF):** YBGF'de belirlenen kriterlere göre öncelikli yoldan veri iletiminin gerçekleştirildiği, veri iletimi ile ilgili süreçlerin yönetildiği fazdır.
- **Ağ Yönetim Fazı (AYF):** AYF ağ içerisindeki tüm işleyişin yönetildiği fazdır. Mimari içerisindeki tüm fazların süreçleri AYF ile kontrol edilmektedir. İletişim için gerekli olan tüm aşamalar AYF tarafından yönetilmektedir. TOF topolojiyi belirlediğinde AYF'yi bilgilendirmekte, AYF yolların belirlenmesi için YBGF'yi başlatmaktadır. YBGF yol bilgilerini belirlediğinde de AYF, VIF ile veri iletişim sürecini başlatmaktadır. Yine AYF bu aşamalar da oluşacak problemlere karşı yapılacak işlemleri de yönetmektedir. AYF ağ üzerindeki işleyişi yönetirken karar

veritabanından yararlanmaktadır. Karar veritabanında yönlendirme tabloları, maliyet tabloları gibi AYT'nin karar vermesi için gerekli tablolar bulunmaktadır.

6.2.1. Tanımlamalar ve Kısaltmalar

Bu doktora çalışmasının anlaşılabilirliği için ağ yapısı ve mimarinin işleyişi ile ilgili gerekli kavramlar için yapılan tanımlamalar Tablo 6.1'de verilmektedir.

Tablo 6.1. Sistem mimari yapısı için tanımlamalar

Parametre	Tanım
Kaynak Düğüm (KD)	Ağ içerisinde algılama işlemini gerçekleştirerek ağ içinde yayacak düğüm
Hedef Düğüm (HD)	Ağ içerisindeki verilerin toplandığı merkez olarak kabul edilen düğüm
Duyarga Düğüm (DD)	Gelen veri paketlerinin yönlendirilmesi için kullanılan düğüm
Düğüm Numaraları	TDA içinde kullanılan 0 nolu düğüm KD'yi, ağ içinde kullanılan son düğümün numarası da HD'yi vermektedir. Her bir düğüm numarası tekil olup topolojide sadece bir tek düğümü ifade etmektedir.
Paket	HD ile KD arasındaki iletişim paketler aracılığı ile yapılmaktadır. KD'nin algıladığı bilgi küçük boyutta olduğu için KD'den HD'ye gönderilen veri bir paket içinde gönderilebilmektedir.
NxM	TDA uygulamasının çalıştığı bölge (N alanın eni, M boyu)
DD Enerjileri	Tüm düğümlerin başlangıç enerji seviyesi 2 AA pil enerjisindedir.
S	NxM alanı içerisindeki algılayıcı sayısı S dir. Algılayıcıların yayın yapabildiği iletim çapı R'dir.

6.2.2. Gerekli Kabuller

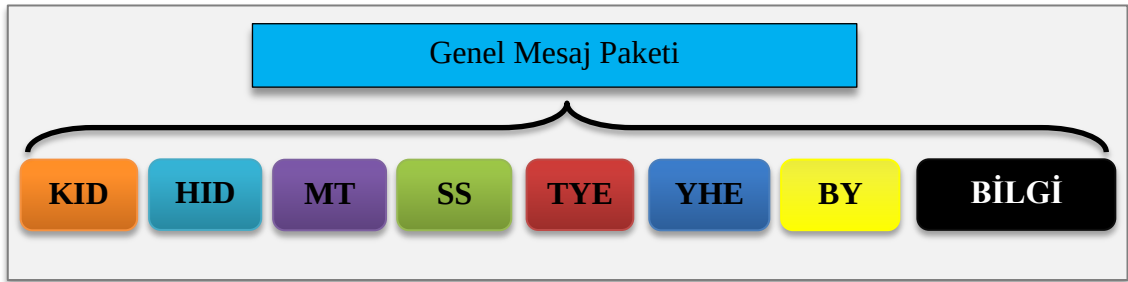
Yapılan doktora çalışmasında elde edilecek sonuçlarının gerçekle örtüşecek şekilde kararlı ve tutarlı olabilmesi için çeşitli kabuller yapılmıştır. Mimari yapıdaki kabuller şöyledir;

- TDA içerisindeki tüm duyargalar aynı donanımsal özelliklere sahiptir.
- TDA içerisinde herhangi bir hareketli düğüm bulunmamaktadır ve ağ içindeki tüm düğümlerin konumları bilinmektedir.
- TDA içerisindeki tüm düğümlerin sınırlı bir hafıza kapasitesine sahiptir.
- Her düğüm kendisine ait bir çift dahili AA pile sahiptir. Ağdaki düğümlere ekstra bir enerji desteği (güneş enerjisi, yedek pil gibi) verilmemektedir.

- TDA’da enerjisi tükenen düğüm ölmekte ve tekrar çalışmamaktadır.
- TDA’daki tüm duyurga iletişim için radyo vericisi taşımaktadır. Bu vericilerin çıkış güçleri duyurgaların konumlarına göre ışıma alanında en az 2 tane duyurgayı barındıracak şekilde önceden ayarlanmıştır.
- Tüm yönlendirme sürecinde iletişim kontrolü HD tarafından yapılmaktadır.

6.2.3. Genel Mesaj Paketi Yapısı

Önerilen enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisinde, HD ile KD arasında yapılacak tüm iletişim süreçlerinde düğümler arasında veriler mesaj paketleri ile taşınmaktadır. Bu doktora çalışmasında gereksiz verilerin taşınmasının önüne geçmek için minimum büyüklükte olacak bir mesaj paket yapısı oluşturulmuş, mesaj paketinin alanları mesajın tipine bağlı olarak farklı amaçlar için kullanılmıştır. Tasarımda HD ile KD arasında iletişimin sağlanması amacı için kullanılan genel mesaj paketi yapısı Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.4. Genel mesaj paketi yapısı

Genel mesaj paketi içerisinde kullanılan alanların anlamları şöyledir.

- **KID:** KID, gelen mesajın kaynak adresinin bilinmesi için kullanılmaktadır. KID, mesajı gönderen düğümün düğüm numarası olarak da adlandırılan ID (Identification) numarasını verir. Bu alan mimari içinde kullanılan tüm mesaj tiplerinde kullanılmaktadır.
- **HID:** HID, mesajın gönderileceği hedef düğümün adresini tanımlamak için kullanılmaktadır.
- **MT:** MT mimari yapı içinde HD ile KD arasındaki iletişim için kullanılan mesajın türünü bildirmektedir. Gelen mesajın hangi tür mesaj olduğu ve bu mesaj türüne göre DD’lerin hangi işlemleri uygulayacağı sistem mimari yapısı içinde

tanımlanmıştır. MT alanı ve MT'nin aldığı değerlerin kolaylıkla anlaşılabilmesi için Bölüm 6.2.3.1'de MT değerleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır.

- **SS:** SS alanı HD ile KD arasındaki yol içinde kullanılan DD sayısını yani HD ile KD arasındaki sıçrama sayısını vermektedir. SS alanı özellikle TOF modülünde enerji farkındalıklı yolların oluşturulması ve VIF modülünde iletimin başlamasından önceki yolun tanımlanması sürecinde sistem içinde aktif rol oynamaktadır. SS ayrıca bir paketin TDA içerisindeki ömrünü sınırlayan bir parametre olarak da kullanılacaktır. Bu sayede paketin gereğinden fazla TDA içinde iletimde kalarak enerji harcanımına sebep olmasının önüne geçilecektir.
- **BİLGİ:** BİLGİ alanı MT'de tanımlanan mesaj tipine bağlı olarak bazen KD'nin algıladığı sıcaklık, basınç vb. gibi değerleri olabileceği gibi HD ile KD arasındaki DD düğümlerinin numarası olabilir. Bu doktora çalışmasında makul sayıdaki yolun bir veri paketi içerisinde iletilebileceği kabul edilmiştir. Ayrıca KD'den HD'ye gönderilecek veriler küçük büyüklükler olduğu için tek bir veri paketinin içinde HD'ye ulaştırabilmektedir.

6.2.3.1. MT Tanımları

Bu bölümde Şekil 6.4'de gösterilen genel mesaj paketi içindeki MT alanının değerleri açıklanacaktır. MT, HD ile KD arasındaki iletişim için gerekli olan mesajlaşmada, gelen mesaj paketlerinin ayırt edilerek sistemin gelen mesajın tipine göre işlem yapması için oluşturulmuş bir alandır.

TDA içindeki bir DD, herhangi bir mesaj paketi aldığı anda öncelikli olarak MT alanını kontrol ederek mesajın ne mesajı olduğuna bakmakta ve MT değerine göre işlem yapmaktadır. MT alanı için tanımlı değerler ve anlamları Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

Tablo 6.2'de gösterilen MT değerleri Bölüm 6.3.2.2'de ağ topolojisinin oluşturulması aşamasında, Bölüm 6.3.2'de verinin iletilmesi için gerekli altyapının oluşturulması aşamasında, Bölüm 6.3.4.2'de verinin iletilmesi ve iletişimin sürekliliği aşamasında, Bölüm 6.3.4.3'de ve iletişim yolunun kapatılarak yeni bir yol üzerinden verinin iletmeye devam edilmesi aşamasında kullanılmaktadır.

Tablo 6.2. MT tanımları

MT Değeri	Anlamı	Görevi
0000	Mesaj Yok	Sistem içinde gerekli testleri yapabilmek için oluşturulmuş mesaj paketlerinin tipini vermektedir.
0001	ATYP Mesajı	TOF modülünde ağ içindeki yolların tespiti için kullanılan ağ tanıma yayın paketi (ATYP) için kullanılan mesaj tipidir.
0010	VYT İSTEK Mesajı	VIF modülünde iletişimin başlayabilmesi için gerekli olan veri yolu tanıma (VYT) sürecinde HD'nin KD'ye gönderdiği İSTEK Mesaj paketinin mesaj tipidir.
0011	VYT CEVAP Mesajı	VIF modülünde iletişimin başlayabilmesi için VYT sürecinde KD'nin HD'ye gönderdiği CEVAP Mesaj paketinin mesaj tipidir.
0100	VYT ONAY Mesajı	VIF modülünde iletişimin başlayabilmesi için gerekli olan veri yolu tanıma (VYT) sürecinde HD'nin KD'ye gönderdiği ONAY Mesaj paketinin mesaj tipidir.
0101	VERİ Mesajı	VIF modülünde KD'nin algıladığı bilginin HD'ye taşınması için gerekli veri paketinin mesaj tipidir.
0110	VIS KİSTEK Mesajı	VIF modülünde etkin yol üzerinden gerçekleşen iletişimin sonlandırılması için gerekli olan veri iletişimi sonlandırma (VIS) sürecinde HD'nin KD'ye gönderdiği KİSTEK Mesaj paketinin mesaj tipidir.
0111	VIS KCEVAP	VIF modülünde etkin yol üzerinden gerçekleşen iletişimin sonlandırılması için gerekli olan VIF sürecinde KD'nin HD'ye gönderdiği KCEVAP Mesaj paketinin mesaj tipidir.
1000	VIS KKAPAT	VIF modülünde etkin yol üzerinden gerçekleşen iletişimin sonlandırılması için gerekli olan VIS sürecinde HD'nin KD'ye gönderdiği KKAPAT Mesaj paketinin mesaj tipidir.
1001	VIS KONAY	VIF modülünde etkin yol üzerinden gerçekleşen iletişimin sonlandırılması için gerekli olan VIF sürecinde KD'nin HD'ye gönderdiği KONAY Mesaj paketinin mesaj tipidir.

6.3. Sistem Mimarisindeki Modüllerin Yapısı

Bu bölümde sistem mimari yapısı içerisindeki modüllerin işleyişleri açıklanacaktır. Öncelikle ABP ile ağ yapısının oluşturma süreçleri, sonra da sırası ile veri iletimi süreçlerinde kullanılan TOF, YBGF ve VIF modülleri açıklanacaktır. Son olarak da ağ içerisindeki modüllerin birbirleri ile haberleşmesini sağlayan, ağ içinde oluşabilecek sorunlara karşı çözüm üreten AYF modülünün işleyişi açıklanacaktır.

6.3.1. Ağ Başlangıç Parametreleri (ABP) Modülü

ABP modülü ağ yapısının oluşması için gerekli ön tanımlamaların yapıldığı modüldür. Çalışmamızda TDA yapısının değişkenliği dikkate alınarak mimari yapı içerisinde kullanılacak olan parametreler ABP modülünde tanımlanarak dinamik bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu sayede gerçekleştirilen sistemin farklı koşullar altında çalışabilmesi sağlanmıştır. Örneğin TDA'nın kaç adet düğüm kullanacağı, bu düğümlerin ne kadar boyuttaki bir alana yayılması gerektiği gibi değerler ABP modülünde tanımlanabilmektedir. Örnek ABP tanımlama yapısı Tablo 6.3'de gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Ağ başlangıç parametrelerinin tanımlanması

Parametre	Açıklama
SS _{max}	TDA içinde maksimum yol bilgisi için sıçrama sayısı
İletim Gücü	DD'nin veri paketini iletirken harcadığı güç
Alım Gücü	DD'nin veri paketini alırken harcadığı güç
Düğüm Başlangıç Gücü	Bir çift dahili AA pil
TOF Süreci	Ağ topolojisinin keşfi için gerekli süre
Aktif Yol Enerji Eşik Değeri	Aktif yolun ağ yaşam ömrü açısından diğer yollar ile kıyası için gerekli olan yüzdelik değer

ABP modülünde başlangıç parametreleri tanımlandıktan sonra ağ yapısı oluşmaktadır. ABP oluşan ağ yapısı ile ilgili verileri AYF'na aktararak ağ iletişim süreci başlatmaktadır. Bu aşamadan sonra AYF, ABP modülünden aldığı bilgiler doğrultusunda ağın toplam enerjisi gibi hesaplamaları yaparak TOF sürecini başlatmaktadır.

6.3.2. Topoloji Oluşturma Fazı (TOF) Modülü

TDA'larda HD ile KD arasında iletişimin kurulabilmesi için ağ içerisindeki DD'lerin komşuluk ilişkilerinin belirlenmesi ve belirlenen komşuluk ilişkilerine göre HD ile KD arasındaki alternatif yolların bulunması gerekmektedir. Yollar belirlenirken de ağ içerisinde ki enerji verimliliği açısından etkin yolların bulunması bu doktora çalışmasının ana amacıdır.

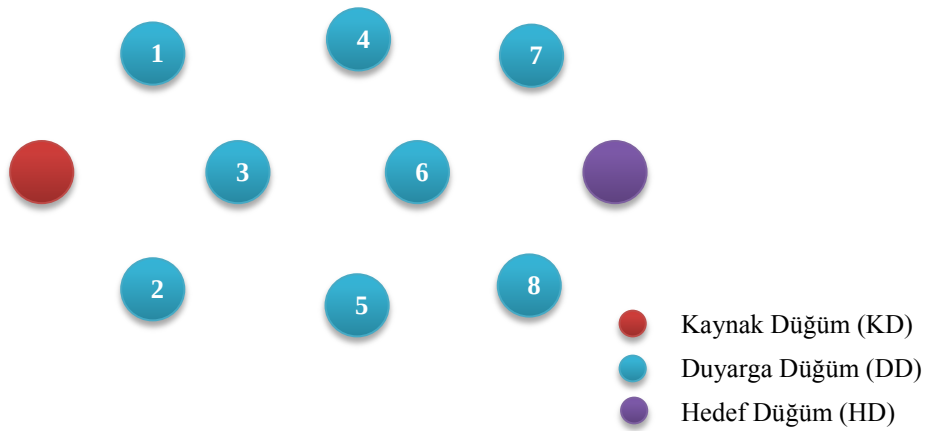
Sistem mimari yapısındaki TOF modülünün amacı TDA ağı içerisinde HD ile KD arasındaki oluşabilecek yolların hızlı ve enerji etkin bir şekilde bulunmasını sağlamaktır.

Önerilen TOF modülü oluşturulurken enerji verimliliği için şu kriterler göz önünde bulundurulmuştur.

- DD'lerin gereksiz işlem yaparak gereksiz enerji harcanımını önlemek için karar mekanizması olarak HD belirlenmiştir. Ağ içerisinde DD'ler KD'nin ABP modülü tarafından tesbit edilen aralıkta bir kez ürettiği ağ tanıma yayınlarını yaymak ile görevlidir.
- TOF ile ağdaki yollar tespit edilirken karmaşık matematiksel denklemlerden kaçınılmıştır. Bunun yerine HD üzerinde ağ içerisinde gelen yol bilgilerinin tutulduğu bir yol belirleme tablosu (YBT) oluşturulmuştur. Bu tablo HD'ye ABP modülü tarafından tesbit edilen aralıkta ulaşan yayın paketlerini tutmaktadır.
- HD üzerinde tutulan YBT kullanılarak enerji açısından yol maliyetlerinin gözlemlenebilmesi ve YBGF fazı için gerekli bilgilerin toplanması hedeflenmiştir.
- HD üzerinde toplanan verilerin analizi ile iletişim için gerekli olan veri miktarını azaltmak hedeflenmiştir.

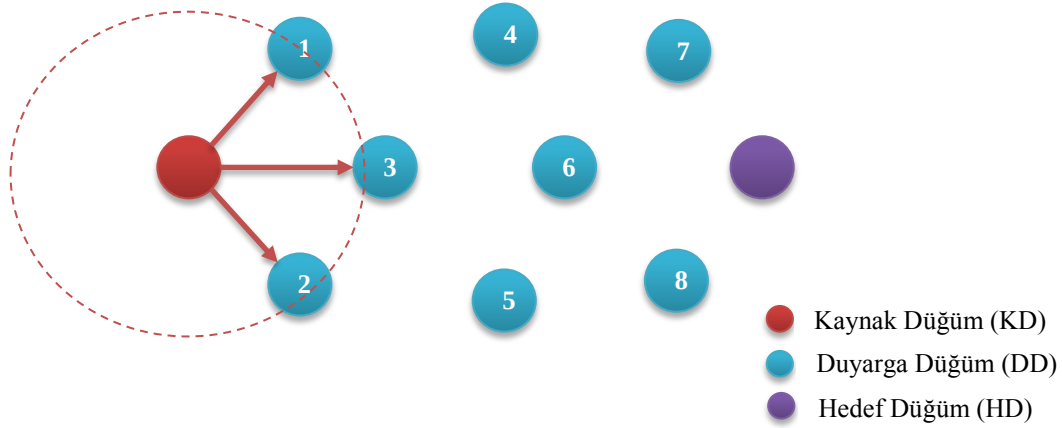
6.3.2.1. TOF Modülünün Yapısı

TOF modülünde ağ yapısının keşfi için ağ içinde KD'den HD'ye doğru yayılım gösteren ağ tanıma yayın paketleri (ATYP) kullanılmaktadır. ATYP'ler ile ağ topolojisi öğrenilerek HD üzerindeki YBT'ye yol bilgileri yazılmaktadır. Ağ topolojisinin keşfi ve ağ üzerindeki yolların HD üzerindeki YBT'ye eklenmesi süreci oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu yüzden TOF sürecinin kolaylıkla anlaşılabilmesi için basit bir ağ topolojisi seçilmiş ve Şekil 6.5'de verilen örnek topoloji üzerinden TOF süreci anlatılmıştır.



Şekil 6.5. ATYP mesajı örnek topoloji

Şekil 6.5’de gösterilen ağ yapısında TOF sürecinin kolaylıkla anlaşılması için HD ile KD arasında 8 adet DD kullanılmıştır. TOF modülünde ağ tanıma süreci, KD’nin yayın alanı içerisindeki tüm DD’lere ATYP göndermesi ile başlamaktadır. KD’nin ATYP mesajı ile ağ tanıma sürecini başlatması Şekil 6.6’da gösterilmektedir.

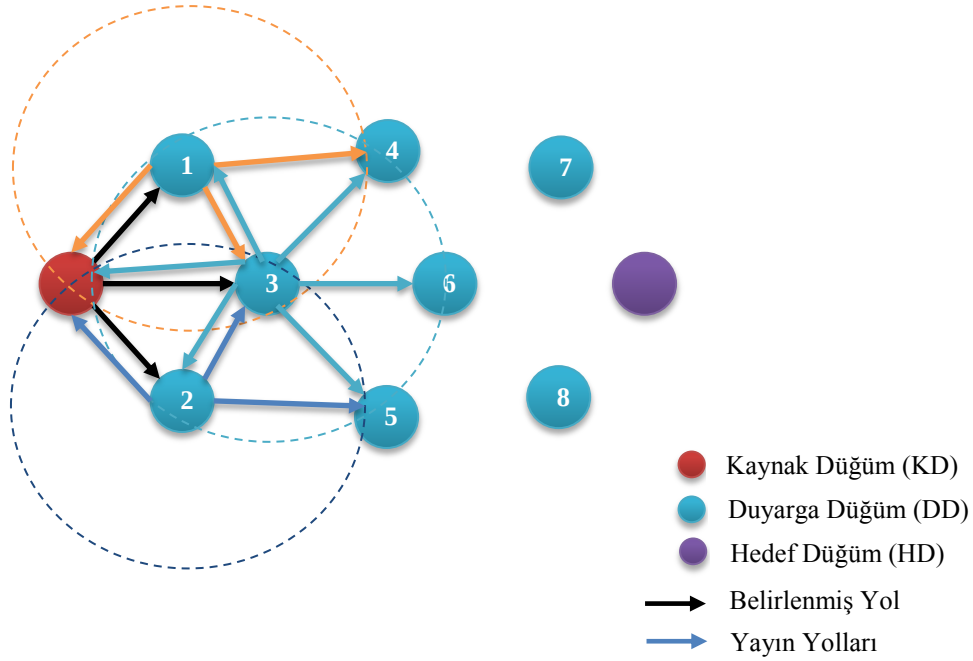


Şekil 6.6. Ağ tanıma yayın süreci – KD yayını

Şekil 6.6’da da görüldüğü gibi KD, TOF sürecini başlatarak ağ üzerindeki yolların keşfi için bir ATYP mesajını ağ içerisine yayar. KD’nin yayınlamış olduğu ATYP mesajında, bölüm 6.3.2.2’de ayrıntıları anlatılacak olan mesaj paketini gönderen kaynağın kimliğini tanımlayan KID, gelen mesaj paketinin tipini belirten mesaj tipi (MT), mesaj paketinin kaç DD üzerinden geldiğini belirten sıçrama sayısı (SS), HD ile KD arasındaki yol enerjisini hesaplamak için gerekli olan gerekli toplam yol enerjisi (TYE), yol üzerindeki tüketilen enerjiyi hesaplamak için gerekli yol harcanan enerjisi (YHE), HD ile KD arasındaki yolda kullanılan DD’leri tanımlamak için gerekli olan bulunan yol (BY) alanları kullanılmıştır. KD’nin yayınladığı ATYP mesaj paketindeki KID alanında KD’nin kendi ID numarası, MT alanında mesajın ATYP mesajı olduğunu belirten ‘0001’ değeri, SS alanı ise ağın büyüklüğüne göre değişiklik gösteren mesajın ağ içindeki maksimum sıçrama sayısını belirten değer bulunmaktadır.

KD’nin yayını, yayın alanı içindeki tüm DD’lere ulaşır. Şekil 6.6’da görüldüğü gibi KD’nin yayın yaptığı alan içinde bulunan 1, 2 ve 3 numaralı düğümler KD’nin yayını alır. 1, 2, 3 numaralı düğümler gelen ATYP mesajını okur. Mesajın bir yayın paketi olduğunu paket formatı içindeki MT alanından algılar ve paket içindeki yol bilgisinde önceden kendinin olup olmadığını kontrol eder. Eğer önceden bu paket kendine gelmiş ise yol bilgisi içinde düğüm tanımlı olduğundan paketi tekrar yaymaz. ATYP mesajındaki yol

bilgisinde düğüm kendini bulamaz ise yol bilgisi kısmına KD'nin numarasını, KID alanına da kendi numarasını yazarak mesajı tekrar yayar. 1, 2, ve 3 numaralı düğümlerin ATYP mesajını tekrar yayması Şekil 6.7'de görülmektedir.

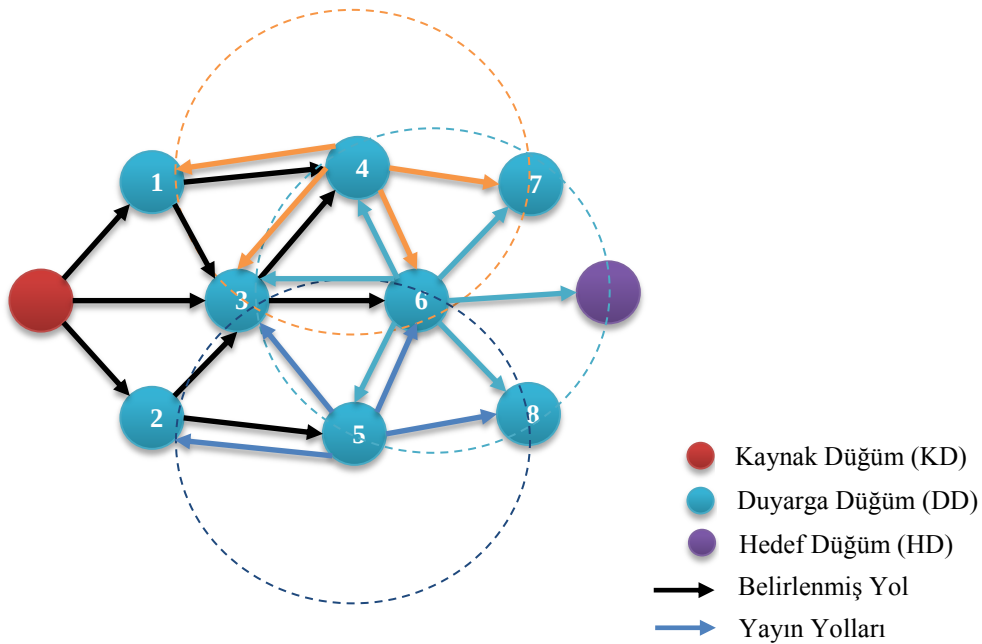


Şekil 6.7. Ağ tanıma yayın süreci – 1, 2, 3 numaralı düğümler

Şekil 6.7'de KD'nin yayın alanı içinde olan 1, 2 ve 3 numaralı DD'lerin ATYP mesajını tekrar yayınlaması görülmektedir. Şekil 6.7'de siyah ok ile belirtilmiş yollar KD'nin ATYP mesajını 1, 2 ve 3 numaralı DD'lerin alması ile belirlenmiş yollar olduğu görülmektedir. ATYP mesajını alan 1, 2 ve 3 numaralı DD'ler mesajdaki gerekli alanları güncelleyerek tekrar yayınlar. 1, 2 ve 3 numaralı DD'lerin yayın alanı içinde bulunan tüm DD'ler yayın mesajını alır. Bu aşamada yolların tekrarını engellemek için önceden tanımlı yolların ihmal edilmesi, tanımlanmamış yolların ise keşif sürecine dahil edilmesi gerekmektedir. Örneğin 3 numaralı düğüm yayın alanı içinde kalan düğümler için ATYP yayını yaptığında bu yayını 1, 2, 4, 5, 6 ve KD düğümleri almaktadır. Bu düğümlerden 4, 5, 6 numaralı düğümler ilk defa mesajı aldıkları için yayın paketinin içindeki yol bilgisine kendi numaralarını da dahil ettikten sonra tekrar yayacaktır. 1 ve 2 numaralı düğümlerde ise önceden 3 numaralı düğüm ile ilgili yol bilgisinin bulunma olasılığı vardır. 1, 2, 3 düğümlerden hangisi daha önce yayın yaptı ise yol bilgisi içinde o düğüm ile ilgili bilgi olacağından geri dönüş yolları TOF modülünde tekrarlı yol bilgisi olduğundan silinecektir.

3 numaralı düğümün yayın alanı içinde KD'de bulunmaktadır. Bu yüzden 3 numaralı düğümün yaptığı ATYP yayını KD'ye de ulaşacaktır. KD'de burada bir DD gibi davranarak mesaj paketinin içindeki yol bilgisine bakacak, kendi düğüm numarasını gördüğü için tekrar ATYP mesajını yayınlamayacaktır.

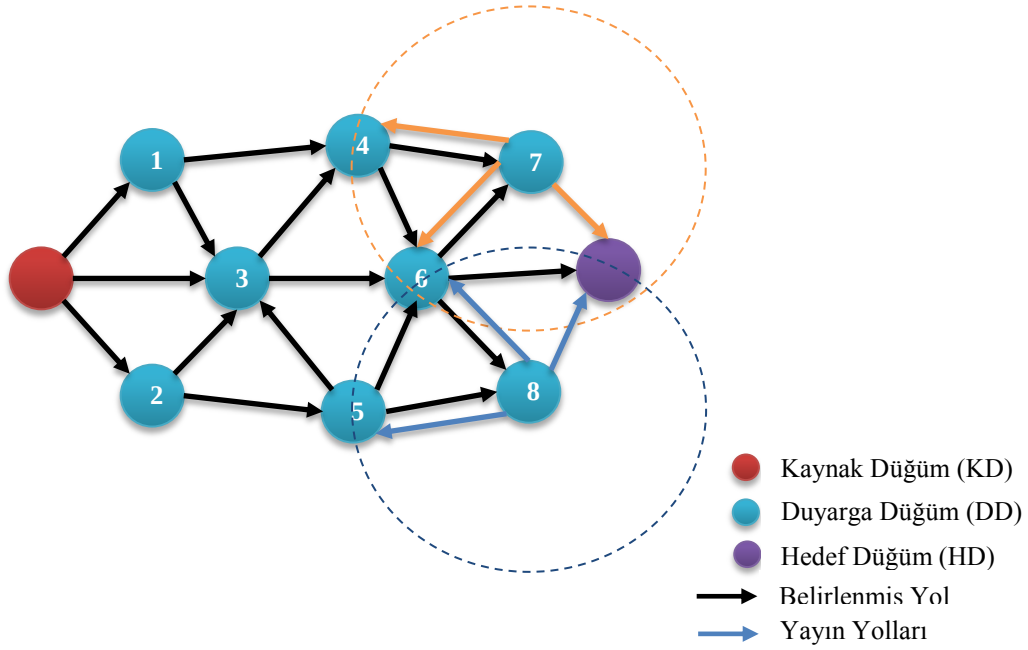
Şekil 6.7'deki açıkça görüldüğü gibi 1, 2 ve 3 numaralı DD'lerin yayın mesajları sonucunda KD, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı DD'ler arasındaki yollar tanımlanmıştır. Tanımlanmış yollar ve yeni ATYP mesajı yayınlayacak olan 4, 5 ve 6 numaralı DD'lerin yayın süreci Şekil 6.8'de gösterilmektedir.



Şekil 6.8. Ağ tanıma yayın süreci – 4, 5, 6 numaralı düğümler

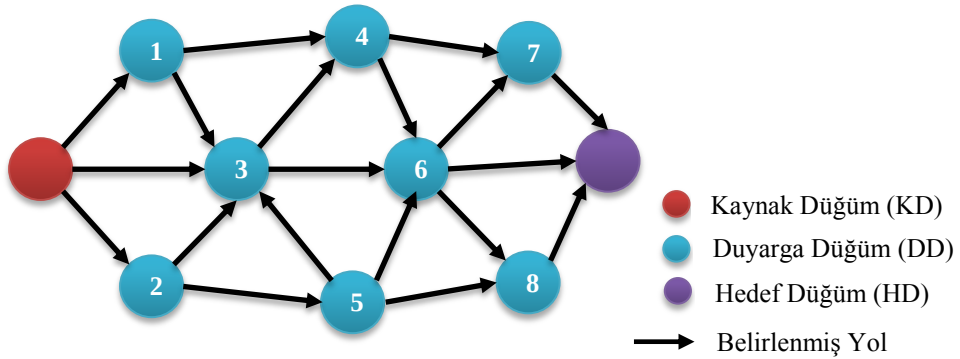
4, 5 ve 6 numaralı DD'lerin ATYP mesajlarını kendi yayın alanları içindeki DD'ler için yayınlaması Şekil 6.8'de görülmektedir. Burada 4, 5 ve 6 numaralı DD'ler kendilerine gelen ATYP mesajlarını kontrol ederek yol bilgisi içinde önceden kendi numarası olup olmadığını saptar. Eğer kendi numarası var ise o mesajı ihmal ederek bir işlem yapmaz. Eğer numarası yok ise mesaj paketinin KID değerini kendi adresi yaparak ve mesaj paketinin içindeki diğer alanları güncelleyerek mesajı tekrar yayınlar. Örneğin 6 numaralı DD, ATYP mesajını yayınladığında, yayın alanı içindeki 3, 4, 5, 7, 8 ve HD düğümleri yayın mesajını almaktadır. 3 ve 4 numaralı DD'ler bu mesajı önceden böyle bir yol bilgisi olduğu için ihmal etmekte, 5, 7 ve 8 numaralı DD'ler mesajı almakta ve yol bilgisi içinde kendi numaralarının olup olmadığını kontrol etmekte, HD ise aldığı mesajı YBT'ye

yazmaktadır. 4, 5 ve 6 numaralı DD'lerin ATYP mesajı yayını sonucunda tanınmış yollar ve 7, 8 numaralı DD'lerin ATYP mesajını tekrar yayınlaması Şekil 6.9'da gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Ağ tanıma yayın süreci – 7, 8 numaralı düğümler

7 ve 8 numaralı DD'lerde aynı şekilde gerekli kontrolleri yaparak kendilerine gelen ATYP mesajlarını alır. Önceden tanımlanmış bir yol bilgisi yok ise mesajı güncelleyerek tekrar yayınlar. 7 ve 8 numaralı DD'lerin yapmış olduğu ATYP yayını sonucunda KD'den HD'ye tüm yollar tanımlanmış olur. Ağ içindeki tanımlı yollar Şekil 6.10'da gösterilmektedir.



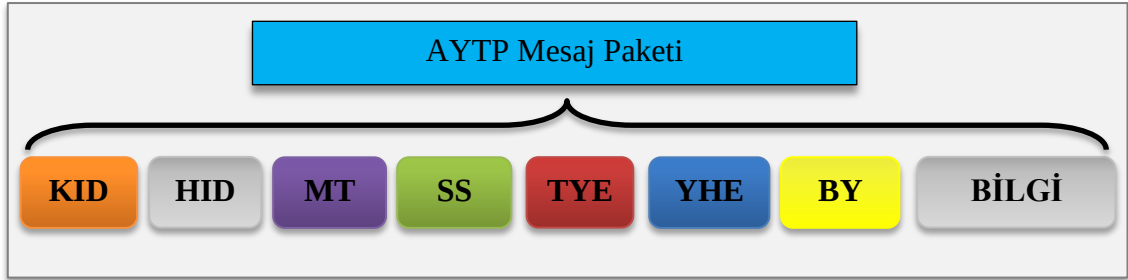
Şekil 6.10. Ağ tanıma yayın süreci – yol bilgilerinin HD'de tanımlanması

TOF modülünde ATYP'lerin ağ üzerinde KD'den çıkıp HD'ye ulaşması süreci sonunda ağ topolojisi Şekil 6.10'daki açıkça görüldüğü gibi oluşmaktadır. Bu aşamada HD'ye ulaşan ATYP mesajları HD tarafından açılarak yollar ile ilgili yol bilgileri, yol maliyetleri gibi mesaj içerikleri YBT'ye yazılmakta ve böylece yol bilgisinin HD tarafından öğrenilmesi sağlanmaktadır.

KD tarafından yayınlanan ATYP mesajının ağ içinde yayılması aşırı trafiğin ve gereksiz enerji maliyetlerinin önüne geçilmesi için önceden belirlenen sıçrama sayısının tamamlanması ile sınırlandırılmıştır. Böylece KD'den yayınlanan ATYP mesajı, sıçrama sayısı belli bir değere ulaştığında ağ ömrünü tamamlayacak ya da HD'ye ulaşarak YBT'ye kaydedilecektir.

6.3.2.2. ATYP Mesaj Formatı

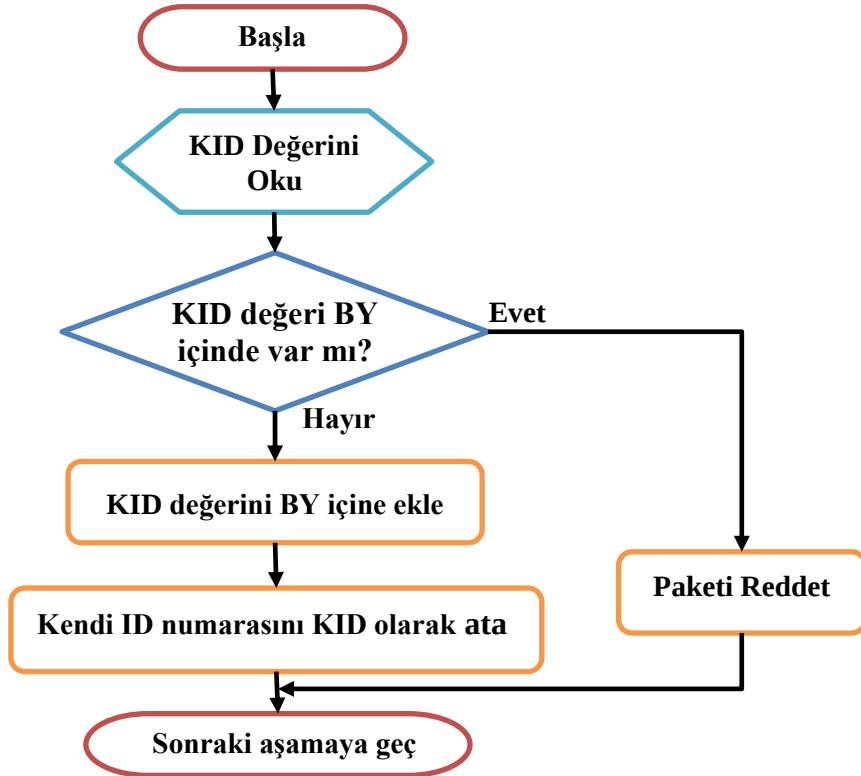
TOF modülünde ağın tanınması için kullanılan ATYP mesajı aynı zamanda ağ ile ilgili birçok bilginin öğrenilmesini de sağlamaktadır. ATYP mesajı HD ile KD arasındaki yollar belirlenirken enerji etkinliği açısından yolların maliyet bilgisi, HD ile KD arasındaki yol içinde kaç DD üzerinden verinin iletildiği gibi bilgiler alınmaktadır. Böylece HD üzerindeki YBT'de bir sonraki aşamada kullanılacak olan YBGF ile etkin yolların belirlenmesi mümkün olmaktadır. Şekil 6.11'de ATYP mesajının yapısı gösterilmektedir.



Şekil 6.11. ATYP mesaj yapısı

AYTP mesajı genel mesaj paketi yapısı içindeki KID, MT, SS, TYE, YHE, BY alanlarını kullanmaktadır. ATYP mesajı mesaj paketi olarak KD tarafından yayınlanır. Yayın alanı içerisindeki DD'ler mesajı olarak mesaj paketinde gerekli güncellemeleri yaparak yayınlama işlemini tekrarlarlar. Bu işlem DD'ler üzerinden ATYP mesajlarının HD'ye kadar ulaşmasına kadar devam eder. ATYP mesajı içerisinde kullanılan alanların anlamları şöyledir.

- **KID:** KID, yayınlanan ATYP paketinin en son hangi DD tarafından yayınlandığını tespit etmek amacı ile kullanılmaktadır. Yayını alan DD öncelikle ATYP mesajının içinden KID değerini okuyarak gelen paketin hangi DD tarafından geldiğini öğrenir. KID değerini okuyan DD alınan paketin tekrar yayınlanması karar verilmiş ise kendi numarasını KID olarak değeri olarak tanımladıktan sonra ATYP paketini tekrar yayınlayacaktır. Şekil 6.12’de KID değeri ile ilgili süreçler gösterilmektedir.
- **MT:** MT gelen mesajın ATYP mesajı olduğunu bildirmektedir.
- **SS:** Bu alan ATYP mesajının KD’den HD’ye ulaşabilmek kaç düğümden geçtiği bilgisini barındırmaktadır. Sıçrama sayısı olarak da ifade edebileceğimiz SS değeri KD ile HD arasındaki düğüm sayısını vermektedir. ATYP mesajını alan her DD bu alandaki değeri bir arttırarak mesajı yayar. Böylece ATYP mesajı HD’ye ulaştığında oluşan yolun kaç düğümlü bir yol olduğu belirlenmektedir. ATYP mesajının ağ içinde gereksiz trafik yaratmasını engellemek amacı ile SS değeri sistem mimari yapısı içinde tanımlanmış eşik değerinin üzerine çıktığında ATYP mesajı bir sonraki DD’ye iletimi kesilerek artık bu yol üzerinden HD’ye ulaşılamayacağı veya ulaşmanın maliyetli olduğu kabul edilir. Bu sayede ağ içinde sonsuz döngüye girecek mesaj paketleri yok edilmiş olmaktadır.



Şekil 6.12. KID süreçleri

- **TYE:** ATYP mesajı içinde enerji farkındalıklı yol bilgilerinin hesaplanabilmesi için eklenmiş en önemli alan TYE alanıdır. TYE alanı, bir ATYP mesajının KD'den çıkıp HD'ye ulaştığında o yol ile ilgili toplam yol enerjisinin hesaplandığı alandır. TOF modülü ile ağ üzerindeki yollar belirlenirken ağ içindeki tüm DD'lerin başlangıç enerjisi tablo da belirtildiği gibi 1 çift AA pil olarak kabul edilmiştir. Buna göre yol üzerindeki toplan başlangıç enerjisi yol üzerindeki düğümlerin enerjileri ile düğüm sayısının çarpımı şeklindedir. Denklem (6-1) bir yol üzerindeki toplam başlangıç enerjisini hesaplamakta kullanılacak değeri vermektedir.

$$TYE = E_{DD} \times DD_s \quad (6-1)$$

Burada E_{DD} bir DD'nin başlangıç enerjisini, DD_s ise yol üzerindeki toplam düğüm sayısını vermektedir.

- **YHE:** HD ile KD arasında iletişim yapılırken DD'ler gelen paketleri almak ve bir sonraki DD'ye iletmek ile görevlidir. Bu işlem esnasında DD'ler enerjilerinin bir kısmını paketi alma ve gönderme işlemi için kullanmaktadır. Ağ yaşam ömrü açısından enerjisi en etkin yolun bulunması ve sürekli yolların kalan enerjilerinin izlenmesi gerekmektedir. HD ile KD arasındaki iletişim esnasında DD'lerin harcadığı enerji şu şekilde hesaplanmaktadır [173].

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k,d) \quad (6-2)$$

$$E_{Tx}(k,d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^n \quad (6-3)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = E_{elec} \times k \quad (6-4)$$

$$YHE = E_{Tx} + E_{Rx} \quad (6-5)$$

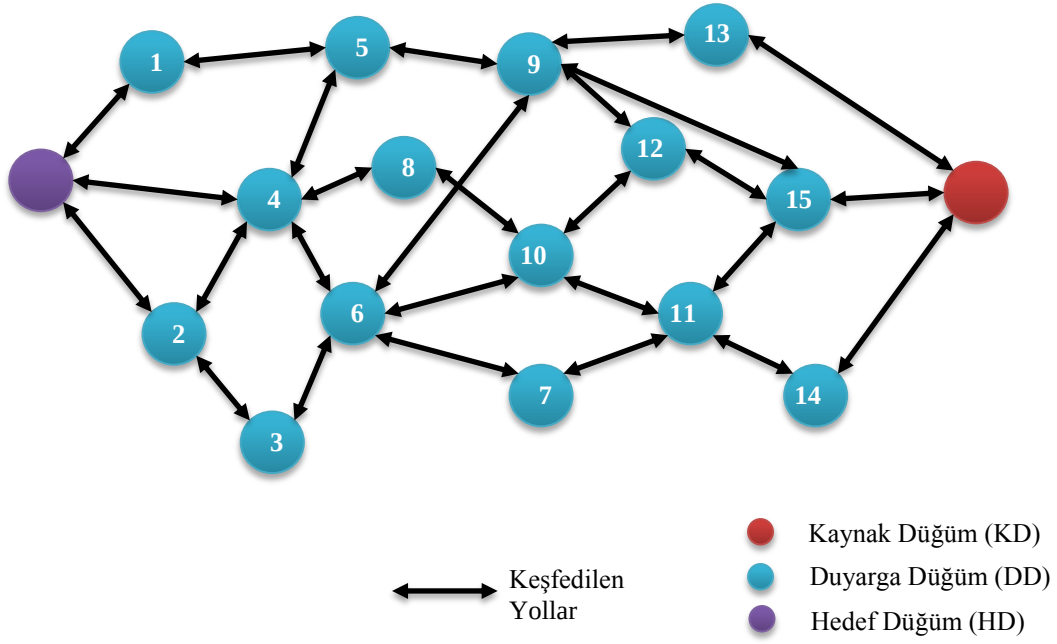
Burada E_{Tx} iletim esnasında DD'nin harcadığı enerji miktarı, E_{Rx} alım esnasında DD'nin harcadığı enerji miktarı, k bit cinsinden paket boyutu, d paketin gönderileceği DD ile olan mesafe, $E_{Tx-elec}$ vericinin harcadığı enerji miktarı, $E_{Rx-elec}$ alıcının harcadığı enerji maliyetidir.

Bu doktora çalışmasında ağ yaşam ömrünü en üst seviyeye çıkartabilmek için belirlenen yollar içindeki en kısa yolun çalışma süresinin en aza indirilmesi gerektiği kabul edilmiştir. Bunun için YBGF modülünde, TOF modülü ile bulunan TYE ve YHE değerlerine göre yol kullanım ömrü (YKO) denklem (6-6)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$YKO = TYE / \sum YHE \quad (6-6)$$

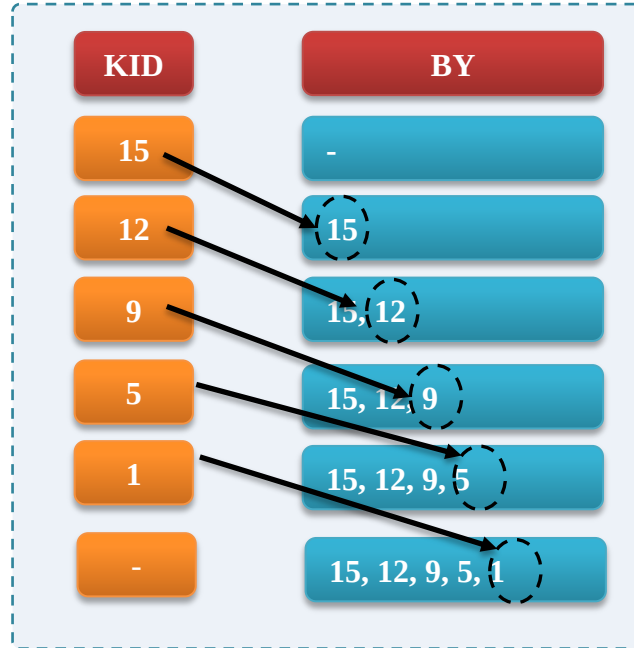
- **BY:** Bu alan HD ile KD arasındaki yol ve sırası ile yolda kullanılacak DD'lerin numaralarını vermektedir. ATYP mesajı DD'ler tarafından yayınlanırken kendi numaralarını KID yaparlar. Paketin gelmiş olduğu KID bilgisini de yol bilgisini kaybetmemek için BY alanına eklerler. Böylece ATYP mesajı yayıldıkça geçtiği tüm DD'lerin numaraları BY alanına eklenmiş olur. BY alanındaki bilginin bir diğer önemi ise DD gelen ATYP mesajını tekrar yayınlamadan önce bu alanı kontrol ederek kendisi ile ilgili bilginin olup olmadığını kontrol etmesidir. Bu kontrol sayesinde DD önceden yayınlamış olduğu ATYP mesajlarını tekrar yayınlamak zorunda kalmaz. Sistemde DD, BY bilgisini kontrol eder. Eğer kendi bilgisi yok ise KID numarasına kendi numarasını yazar ve ATYP mesajını tekrar yayınlar. BY alanında kendi numarası var ise önceden bu yol üzerinden geçildiği anlaşılarak gelen ATYP mesajını yayınlamaz.

TOF yapısını ve ATYP mesajının yayılımını anlatmak için Şekil 6.5'de de görülmekte olan basit ağ topoloji yapısı seçilmiştir. BY alanının oluşumunun kolaylıkla anlaşılabilmesi için daha karmaşık bir ağ topolojisine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 6.13'te verilen örnek topoloji hem BY alanının oluşması hem de sistem mimarisinin bundan sonraki modüllerinde kullanılmak üzere oluşturulmuş topoloji yapısını göstermektedir.



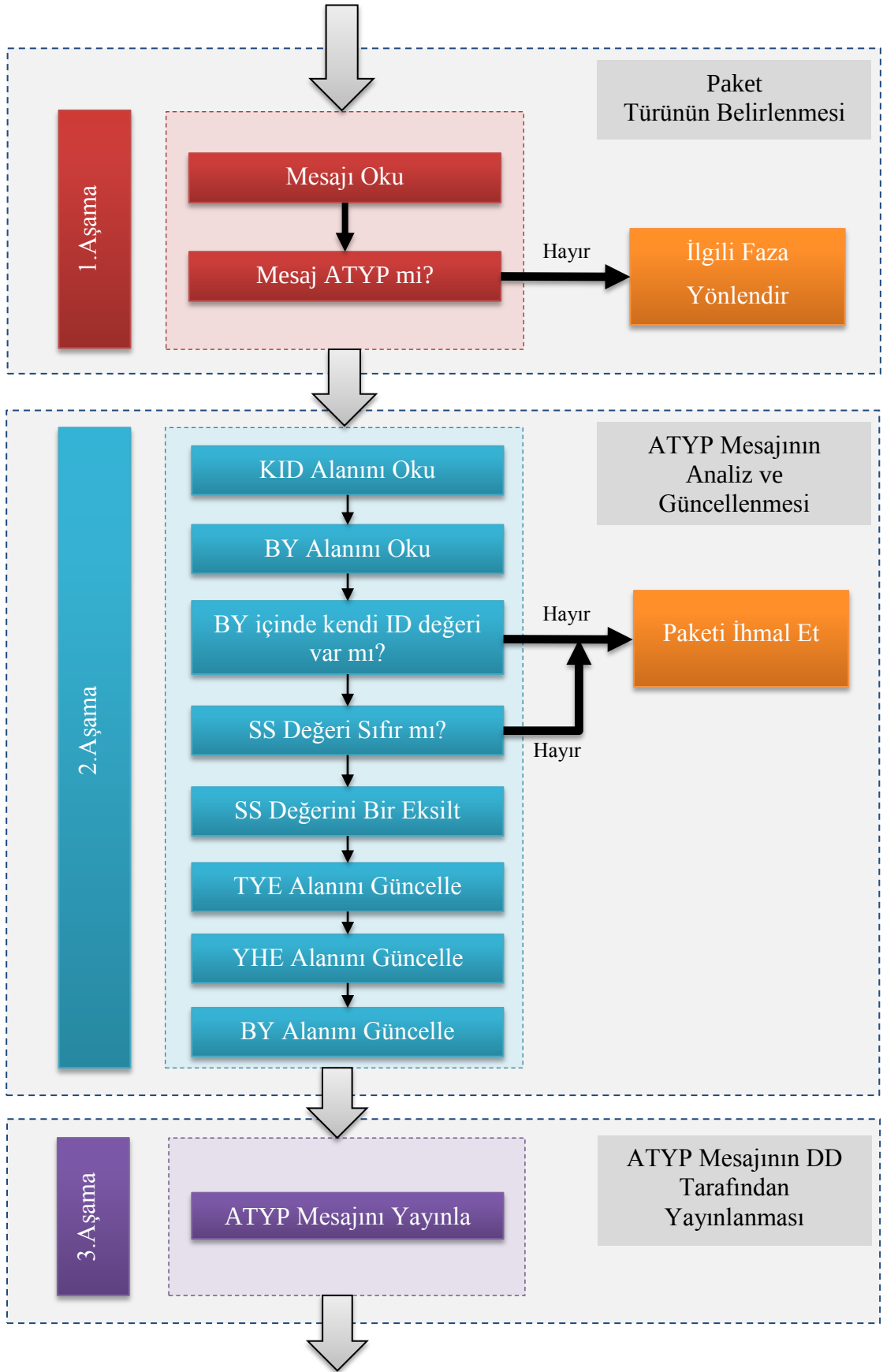
Şekil 6.13. Örnek ağ topolojisi

Şekil 6.13’de gösterilen örnek ağ topolojisine göre BY alanının güncellenmesi Şekil 6.14’de gösterilmektedir. TOF modülünde ağ yapısının öğrenilmesi süreci HD üzerinde yolların yol belirlenme tablosu (YBT)’ye eklenmesi ile tamamlanmaktadır. Örnek bir YBT tablosu Tablo 6.4’de verilmektedir.



Şekil 6.14. BY alanının güncellenmesi

Şekil 6.15’de bir DD’nın TOF süreci için davranışı gösterilmektedir.



Şekil 6.15. TOF modülü için DD'lerin davranışı

Bu doktora çalışmasında gerçekleştirilen mimaride bir DD gelen paketi 3 aşamada değerlendirmektedir.

- a) **Paket Türünün Belirlenmesi:** DD'ye gelen paket AYF tarafından açıldıktan sonra mesaj türüne bakılmaktadır. AYF modülü Mesaj ATYP mesajı ise ATYP mesajını işlemek üzere paketi TOF modülüne gönderir.
- b) **ATYP Mesajının Analizi ve Güncellenmesi:** DD gelen mesajın bir ATYP mesajı olduğunu anladığı zaman paketin alanlarını okur. KID alanına kendi DD ID numarasını ekler. Eski KID değerini yol bilgisi için BY alanına ekler. Yol maliyetini günceller. Atlama sayısı için belirlenen eşik değeri için SS değerini günceller.
- c) **ATYP Mesajının Yayını:** Yapılan analiz ve güncellemeler sonucunda DD'ye gelen ATYP mesajının tekrar yayınlanmasına karar verilmiş ise DD güncel ATYP mesajını yayın alanı içinde bulunan komşu DD'lere yayınlar ve yeni ATYP mesajlarını bekler.

6.3.3. Yol Belirleme ve Güncelleme Fazı (YBGF) Modülü

Önerilen YBGF modülünde bir önceki aşamada elde edilen yol bilgileri kullanılarak etkin yolların bulunması için tasarım yapılmıştır. HD ile KD arasında gerçekleşecek olan iletişim için en önemli aşaması etkin yol tayininin gerçekleştirilmesidir. Bu bağlamda YBGF modülü ile etkin yolun belirlenebilmesi için YBT'de bulunan yollar kullanılarak çok yollu yönlendirme yapısı tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada HD ile KD arasındaki tüm yollar Bölüm 6.3.2'de anlatıldığı gibi TOF modülü ile tespit edilmiş, bu yollar içinden en verimli yollar sıra ile kullanılarak TDA ağının toplam yaşam süresi uzatılmaya çalışılmıştır. Bu işlemler yapılırken ağ içinde oluşacak gereksiz trafiğin önlenmesi ve DD'lerin enerjisini yol belirleme süreçleri için kullanmamak adında tüm süreçler HD'nin kaynakları kullanılmıştır.

Bu doktora çalışmasında ağ yaşam ömrünü en üst seviyeye çıkartabilmek için belirlenen yollar içindeki en kısa yolun çalışma süresinin en aza indirilmesi gerektiği kabul edilmiştir. Bunun nedeni az kullanılabilecek bir yolun yaşam ömrü erken tükenirse çok kullanılması gereken bir yolun içinde kullanılan DD'lerin yaşam ömrünü etkileyebilecek olmasıdır. Bunun anlamı ömrü tükenen bir yol içinde kullanılan bir DD daha etkin bir yol içinde de tanımlı ise o yolunda işlerliğini yitirmesidir. Bu da doğrudan TDA'nın toplam yaşam ömrünü olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle çalışmada yönlendirme için en fazla

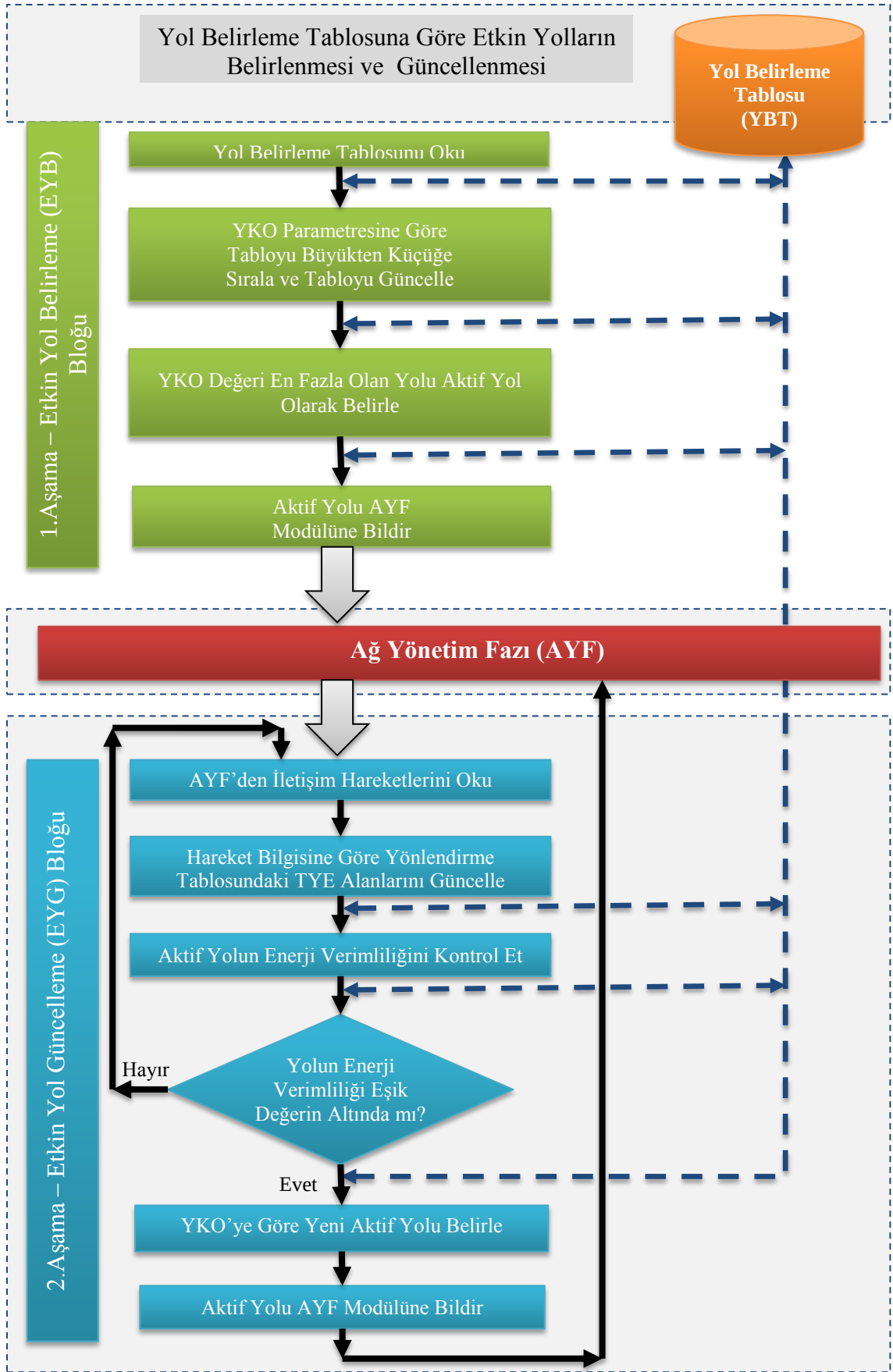
enerjiye sahip en az maliyetli yollar öncelikli olarak kullanarak ağ yaşam süresinin arttırılması hedeflenmiştir. Dolayısı ile bu çalışmada gerçekleştirilen YBGF modülünün 3 temel amacı bulunmaktadır. Bunlar;

- a) HD üzerindeki YBT’de bulunan verileri analiz ederek enerji açısından etkin yol dizilimi yapmak,
- b) İletişim süresince yol üzerinde harcanan enerjilerin hesaplanarak TYE alanının güncellenerek dinamik yönlendirme yapmak,
- c) Belirlenen yol üzerinden yapılacak iletimin şartlarını AYF ile birlikte belirleyerek, alternatif yollara geçişleri sağlamak

‘dır. YBGF’nin belirlenen amaçları ışığında modül yapısı oluşturulurken aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmuştur.

- Yüksek yönlendirme maliyetlerinin önüne geçmek için HD’ler üzerinde bir YBT oluşturulmuştur. Bu tablo içindeki bilgiler kullanılarak hesaplama ve yol bulma işlemleri yapılmaktadır. Böylece DD’ler üzerinde gerçekleşecek işlem maliyetlerinin önüne geçilebilecektir. Ayrıca YBT sayesinde yol bilgileri önceden bilindiği için DD’lerin yol bilgisi için keşif süreçleri ortadan kalkacak ve veri iletim harcamaları düşürülebilecektir.
- Enerji açısından verimli bir yönlendirme yapılabilmesi için YBT’de ki enerji seviyesi alanı sürekli güncellenecektir. Güncellenen enerji seviyesi bilgisi ile ağ üzerinde kullanılan enerji miktarı dinamik bir şekilde görüntülenebilecektir.
- Enerji seviyesinin anlık takip edilmesi ile istenildiği zaman yol bilgileri güncellenerek diğer etkin yollardan veri iletimi mümkün olacaktır.

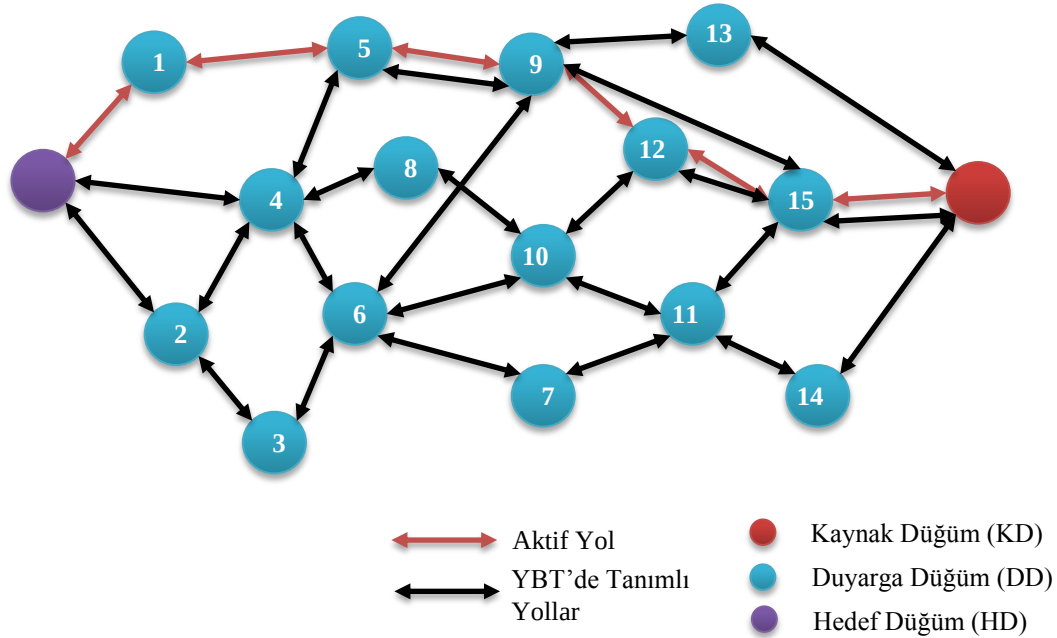
YBGF modülü Şekil 6.16’da görüldüğü gibi iki ana bloktan oluşmaktadır. Birinci blok etkin yol belirleme (EYB) bloğudur. Bu blok YBT’deki YKO değerine göre en verimli yolu belirleyerek AYF’ye bildirmek ile görevlidir. İkinci blok ise etkin yol güncelleme (EYG) bloğudur. Bu blok HD ile KD arasındaki iletişim süreçlerine göre YBT’deki TYE, YHE ve YKO değerlerinin güncellenmesi ve iletişimin verimli yol üzerinden gerçekleşmesi için AYF ile koordinasyonu sağlamak ile görevlidir.



Şekil 6.16. YBGF modülünün genel yapısı

6.3.3.1. Etkin Yol Belirleme (EYB) Bloğu

YBFG modülünde bulunan EYB bloğu, HD üzerindeki YBT'de ATYP süreci ile oluşmuş yol bilgilerini TDA ağının toplam yaşam ömrünün en verimli şekilde kullanılmasını amaçlamaktadır. Bu blok ile YBT'de bulunan veriler YKO değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanarak iletişimin gerçekleşeceği yol aktif hale getirilmektedir. Yine EYB bloğu enerji açısından verimli olarak belirleyip aktif hale getirdiği yolu, iletişimin süreçlerini yönetecek olan AYF modülüne bildirmektedir. Bu doktora çalışmasının anlaşılabilmesi için ATYP sürecinin sonunda oluşturulmuş ve şekil de verilen örnek ağ topolojisi içindeki enerji açısından en etkin 7 yol ve bu yollar için HD üzerinde oluşmuş örnek YBT Tablo 6.4'de gösterilmektedir.



Şekil 6.17. Örnek ağ yapısı

Tablo 6.4. Örnek yol belirleme tablosu (YBT)

YID	KID	MT	DT	SS	TYE	YHE	YKO	BY	AY
1	4	1	2	5	89,95	0,01;0,02;0,01...	1799,00	15, 12, 9, 5, 1	0
2	6	1	2	5	69,15	0,03;0,02;0,02...	81,35	15, 11, 10, 8, 4	0
3	2	1	2	5	139,90	0,01;0,02;0,02...	1399,00	15, 12, 10, 6, 4	0
4	5	1	2	6	58,15	0,03;0,02;0,03...	31,43	14, 11, 7, 6, 4, 2	0
5	1	1	2	5	69,55	0,01;0,02;0,01...	154,55	13, 9, 5, 4, 2	0
6	5	1	2	4	39,20	0,01;0,04;0,01...	49,00	15, 9, 6, 4	0
7	4	1	2	6	98,20	0,03;0,03;0,04...	54,55	14, 11, 7, 6, 3, 2	0

Tablo 6.4'te görüldüğü gibi HD üzerinde bulunan YBT'de ATYF sürecinden elde edilen KID, MT, DT, SS, TYE, YHE ve BY alanlarının haricinde YID, YKO ve AY alanları bulunmaktadır.

YID (Yol kimliği) alanı tabloda bulunan o satıra ait özel kimlik bilgisini vermektedir. Sıralama ve liste içinde arama yapılırken işlemin hızlı sonuçlar vermesi için bu alan YBT tablosuna eklenmiştir.

YKO (Yol Kullanım Ömrü) alanı TOF modülünde ATYP süreci ile öğrenilen bir yola ait toplam enerji miktarı ile o yola ait bir birimlik iletim sürecinde harcanan enerjinin oranı ile hesaplanmaktadır. Yani YKO alanı TYE alanının YHE alanındaki değerlerin toplamına oranı olarak hesaplanmaktadır. YKO alanı ATYP mesajı içerisinde yer almamaktadır. KD ile HD arasındaki yol bilgisi HD üzerinde ATYP mesajı ile oluştuğunda hesaplanarak tablo içine eklenmiştir. Böylece iletişim esnasında gereksiz veri iletiminin önüne geçilmiştir.

AY (Aktif Yol) alanı ise YBT bloğu süreçleri tamamlandığında enerji açısından en etkin yolun aktif yol olarak tanımlanması için oluşturulmuş bir alandır. Bu alan tablo oluşturulurken tüm satırlar için "0" olarak tanımlanmıştır. Aktif olan yol bilgisi AYF modülüne iletilirken enerji açısından en etkin yolun AY değeri "1" yapılarak yol aktif hale getirilecektir.

Bu doktora çalışmasında Tablo 6.4'de görüldüğü gibi TOF modülünde ATYP mesajları ile ağ üzerindeki yollar tespit edilerek YBT oluşturulmaktadır. Tabloda oluşan satırlar ağ tanıma süreci esnasında gelen yol bilgileridir ve bu bilgiler tabloda sıralı değildir. Yani ağ tanıma sürecinde KD'den yayınlanan ATYP mesajları DD'ler üzerinden HD'ye ulaşırken kısa veya uzun yollardan gelmiş olabilirler. TOF süreci tamamlandığında HD ile KD arasında birçok yol bilgisi oluşmuş olur. Bu yolların, ağ yaşam ömrünü en etkin olacak şekilde kullanılması gerekmektedir. Bunun içinde YBT, YKO alanına göre büyükten küçüğe sıralanmalıdır. YKO alanına göre sıralanmış yeni YBT, Tablo 6.5'de görülmektedir.

Tablo 6.5. YKO alanına göre sıralanmış YBT

YID	KID	MT	DT	SS	TYE	YHE	YKO	BY	AY
1	4	1	2	5	89,95	0,01;0,02;0,01...	1799,00	15, 12, 9, 5, 1	1
2	2	1	2	5	139,90	0,03;0,02;0,02...	1399,00	15, 11, 10, 8, 4	0
3	1	1	2	5	69,55	0,01;0,02;0,02...	154,55	15, 12, 10, 6, 4	0
4	6	1	2	6	69,15	0,03;0,02;0,03...	81,35	14, 11, 7, 6, 4, 2	0
5	4	1	2	5	98,20	0,01;0,02;0,01...	54,55	13, 9, 5, 4, 2	0
6	5	1	2	4	39,20	0,01;0,04;0,01...	49,00	15, 9, 6, 4	0
7	5	1	2	6	58,15	0,03;0,03;0,04...	31,43	14, 11, 7, 6, 3, 2	0

YBT, YKO alanına göre büyükten küçüğe sıralandığında tablonun en üst satırında bulunan yol, toplam enerji ve yol maliyetine göre ağ ömrü açısından en etkin yoldur. Bu yüzden EYB bloğu HD ile KD arasındaki iletişim bu yoldan başlayabilmesi için AY parametresini “1” yaparak yolu aktif hale getirmektedir. EYB bloğu aktif yol olarak belirlediği yolu AYF modülüne bildirerek iletişim süreçleri için kullanılacak yolu tanımlamış olur.

6.3.3.2. Etkin Yol Güncelleme (EYG) Bloğu

Bu doktora çalışmasında tasarlanan EYG bloğu, veri iletimi gerçekleşirken yol bilgisi içindeki DD’lerin tükettiği enerjilere göre yol maliyetlerini YBT’ye yansıtarak tablonun güncel kalmasını amaçlamaktadır. EYG bloğu YBT’yi güncellemesi ile sistem içinde ağın ömrünün analizi için birçok faydayı da beraberinde getirmektedir. Bu faydalar;

- HD ile KD arasındaki her veri alışverişinde kullanılan DD’lerin harcadıkları enerjiyi sadece aktif düğümde değil tüm YBT içinde güncelleyerek tüm yolların YKO değerlerini güncel tutmak,
- Ağ trafiğine göre YBT tablosu üzerinden ağ yaşam ömrünü görüntüleyebilmek,
- Aktif yol etkinliğini kaybedince yeni aktif yol tanımlayabilmek,
- Dinamik yönlendirme yapısı kurarak yol belirleme süreçlerinde harcanan enerjiyi azaltmak,

Şeklilde sıralanabilir.

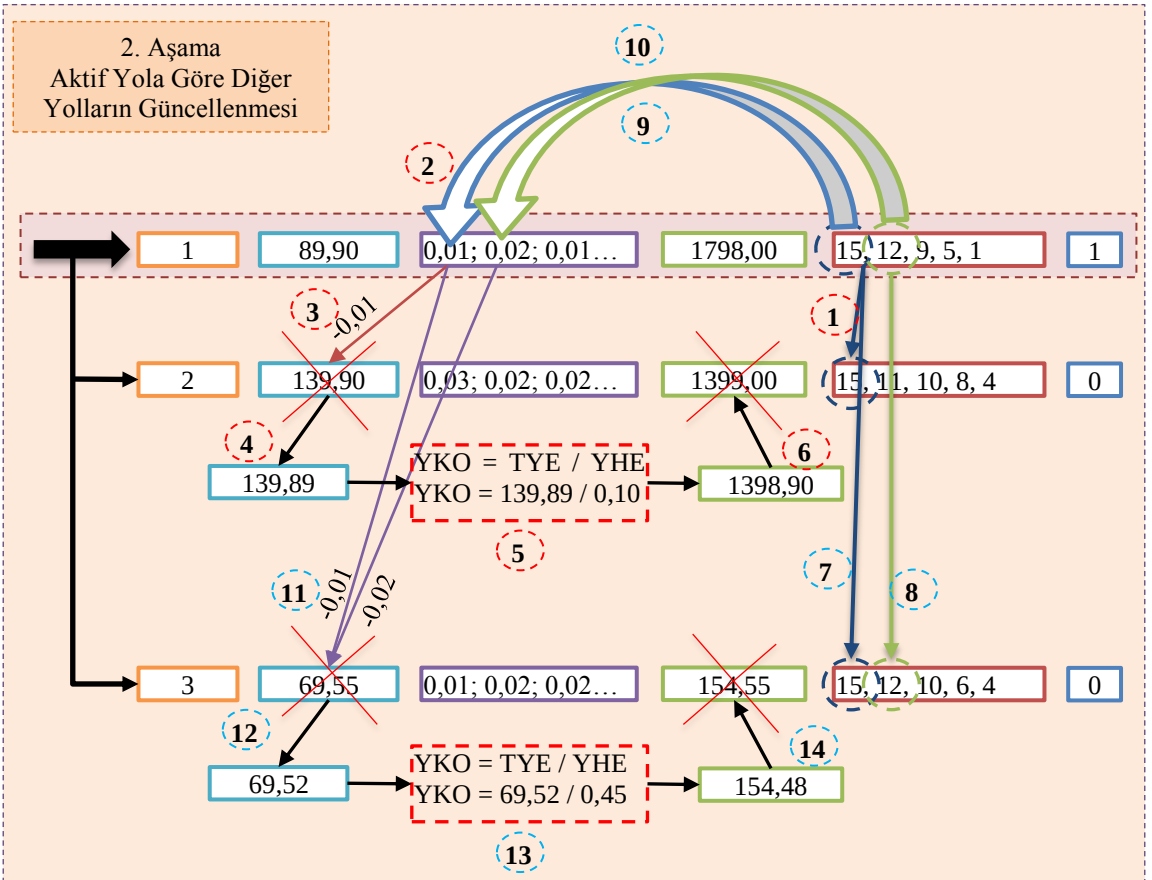
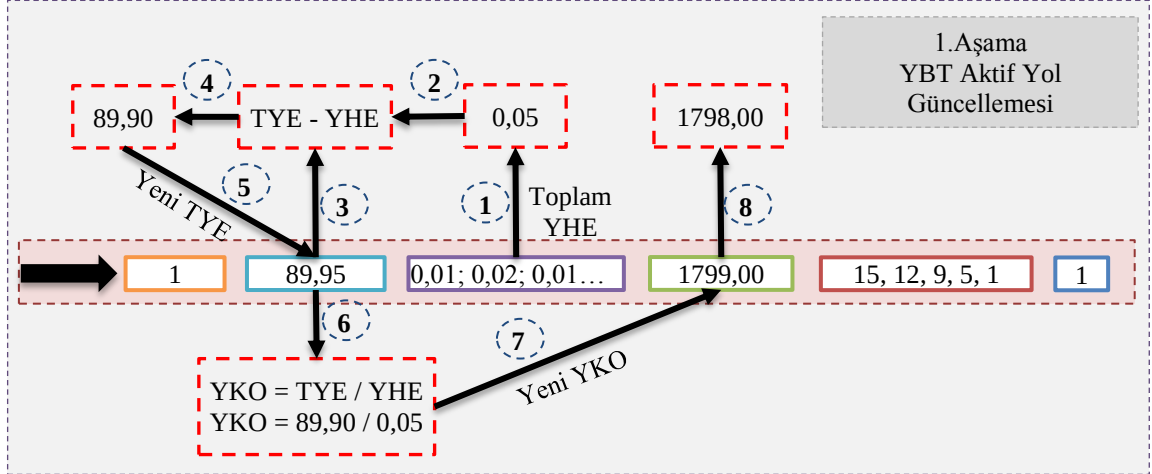
Bu doktora çalışmasında EYG bloğu AYF ile koordineli bir şekilde çalışmaktadır. AYF modülü HD’nin tüm iletişim hareketlerini YBFG modülü içindeki EYG bloğuna bildirir. Bu sayede EYG hangi yol üzerinden ne kadar veri alınmış veya gönderilmiş bilgisini öğrenir. Bu bilgiye göre öncelikle hareketin olduğu yol ile ilgili yol maliyetini YBT

tablosundaki TYE alanından çıkartarak aktif yolun kalan enerjisini tabloya yansıtır. YBT’de aktif yol içinde kullanılan DD’ler diğer yollar içinde de kullanılmış olabilir. Bu yüzden EYG bloğu bir sonraki aşamada ise aktif yol içinde kullanılan DD’ler için YBT’nin diğer satırlarındaki yol maliyetlerini hesaplayarak tüm satırların TYE alanlarını günceller. EYG bloğunun yaptığı güncellemeler ile aktif yol ve diğer yolların TYE bilgileri sürekli güncel kaldığı için anlık ağ yaşam ömrünü kontrol etmek mümkün hale gelmiştir. EYG’nin YBT tablosunu güncellemesi Şekil 6.18’de gösterilmektedir.

Bu doktora çalışmasında EYG bloğu YBT tablosunu iki aşamada güncellemektedir. Birinci aşama aktif olan yol ile ilgili güncellemeleri, ikinci aşama ise aktif yoldaki düğümlerin diğer yollar içinde aranarak ortak kullanılan düğümlere göre yol bilgilerinin güncellenmesini kapsamaktadır. EYG bloğunun veri güncelleme yapısı şu şekilde çalışmaktadır.

- **Birinci Blok – YBT Aktif Yol Bilgilerinin Güncellenmesi:** Şekil 6.18’de açıkça görüldüğü gibi AYF modülü HD ile KD arasındaki iletişim hareket bilgisini EYG bloğuna gönderir. EYG bloğu öncelikle aktif yola ait yol harcamasını hesaplamak için YBT’nin YHE alanında bulunan değerleri toplar. Bulunan değer o yola ait bir hareketin toplam enerji maliyetidir. Bu maliyet yolun toplam enerjisini gösteren TYE alanından çıkartılarak TYE alanı güncellenmiş olur. Böylece hareket esnasında harcanan enerji TYE alanına yansıtılarak yolun toplam enerjisinin ne kadar kaldığı hesaplanmış olur. Bir sonraki aşamada ise yolun ne kadar kullanılabileceği bilgisinin güncellenmesi aşamasıdır. Sistem bu aşamada TYE ve YHE değerlerini oranlayarak YKO değerini tekrar hesaplar ve eski YKO değerini günceller. Bu sayede EYG bloğu aktif yolun kullanımını anlık olarak güncellemiş olur.

YID	TYE	YHE	YKO	BY	AY
1	89,95	0,01; 0,02; 0,01...	1799,00	15, 12, 9, 5, 1	1
2	139,90	0,03; 0,02; 0,02...	1399,00	15, 11, 10, 8, 4	0
3	69,55	0,01; 0,02; 0,02...	154,55	15, 12, 10, 6, 4	0
4	69,15	0,03; 0,02; 0,03...	81,35	14, 11, 7, 6, 4, 2	0
5	98,20	0,01; 0,02; 0,01...	54,55	13, 9, 5, 4, 2	0



Şekil 6.18. EYG bloğu ile YBT'nin güncellenmesi

- **İkinci Aşama – Aktif Yola Göre Diğer Yolların Güncellenmesi:** Birinci aşamada EYG bloğu sadece aktif yolun enerji harcamalarını YBT'ye yansıtmaktadır. Bu doktora çalışmasında amaç verinin enerji açısından en etkin yoldan gönderilebilmesini sağlamaktır. Bu amaçla aktif yol bilgisinin güncellenmesinin yanında aktif yol içinde kullanılan DD'ler diğer yollar içinde de varsa o yollara ait yol maliyetlerinin de güncellenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda EYG bloğu ikinci aşamada öncelikle birinci aşamada aktif yola yansıttığı güncellemeyi YBT içindeki tüm yollara da yansıtmak durumundadır. Bu işlem için EYG öncelikle aktif yolda ki BY alanı içindeki DD'lerin diğer yollarda da olup olmadığını kontrol eder. Şekil 6.18'de de görüldüğü gibi sistem öncelikle birinci satırdaki aktif yol BY alanı ile ikinci satırdaki yolun BY alanını kıyaslar. İki yol arasındaki BY'ler tespit edilir. Ortak BY'lerin iletim esnasında harcadıklarını enerji miktarları YHE alanı kullanılarak hesaplanır. Böylece aktif yol ile ikinci yol arasında kesişen DD'lerin toplam harcadığı enerji hesaplanmış olur. Bulunan değer ikinci satırda bulunan yol bilgisi TYE alanından çıkartılır. Çünkü aktif yoldaki harcanan enerji, diğer yollarda kesişen DD'ler yüzünden etkilenmektedir. İkinci yolda TYE değerinin tekrar hesaplanması ile ikinci yolun kalan enerji miktarı güncellenmiş olur. Güncellenen TYE bilgisine göre ikinci yolun YKO değerinin tekrar hesaplanıp kalan yol ömrünü güncellemek gerekmektedir. Bu yüzden EYG bloğu TYE ile ikinci yolun YHE bilgisini tekrar oranlayarak yeni YKO değerini hesaplar ve YBT'yi günceller. İkinci satır için yapılmış olan bu işlem YBT tablosunda ki tüm satırlar için tekrarlanır. Böylece aktif yoldan yapılmış olan iletişimin diğer yollara etkisi YBT'ye yansıtılmış olur.

Bu doktora çalışmasında EYG bloğunun iki aşamada gerçekleştirmiş olduğu YBT'nin güncellenmesi ile aktif yolun ve diğer yolların yaşam ömrü sürekli izlenebilme imkanı sağlanmaktadır. Bu sayede AYF modülü YBT'yi kontrol ederek hangi yolun ağ yaşam ömrü açısından etkin olacağını belirleyebilmekte ve etkin olarak gördüğü yolu aktif yaparak iletişimin o yol üzerinden gerçekleşmesini sağlamaktadır.

6.3.4. Veri İletim Fazı (VIF) Modülü

Bu doktora çalışmasında, KD ile HD arasında ki veri iletişiminin gerçekleşebilmesi için gerekli olan süreçler VIF modülü ile tanımlanmıştır. Bu bağlamda çalışmada gerçekleştirilen VIF modülünün 3 temel amacı bulunmaktadır. Bunlar;

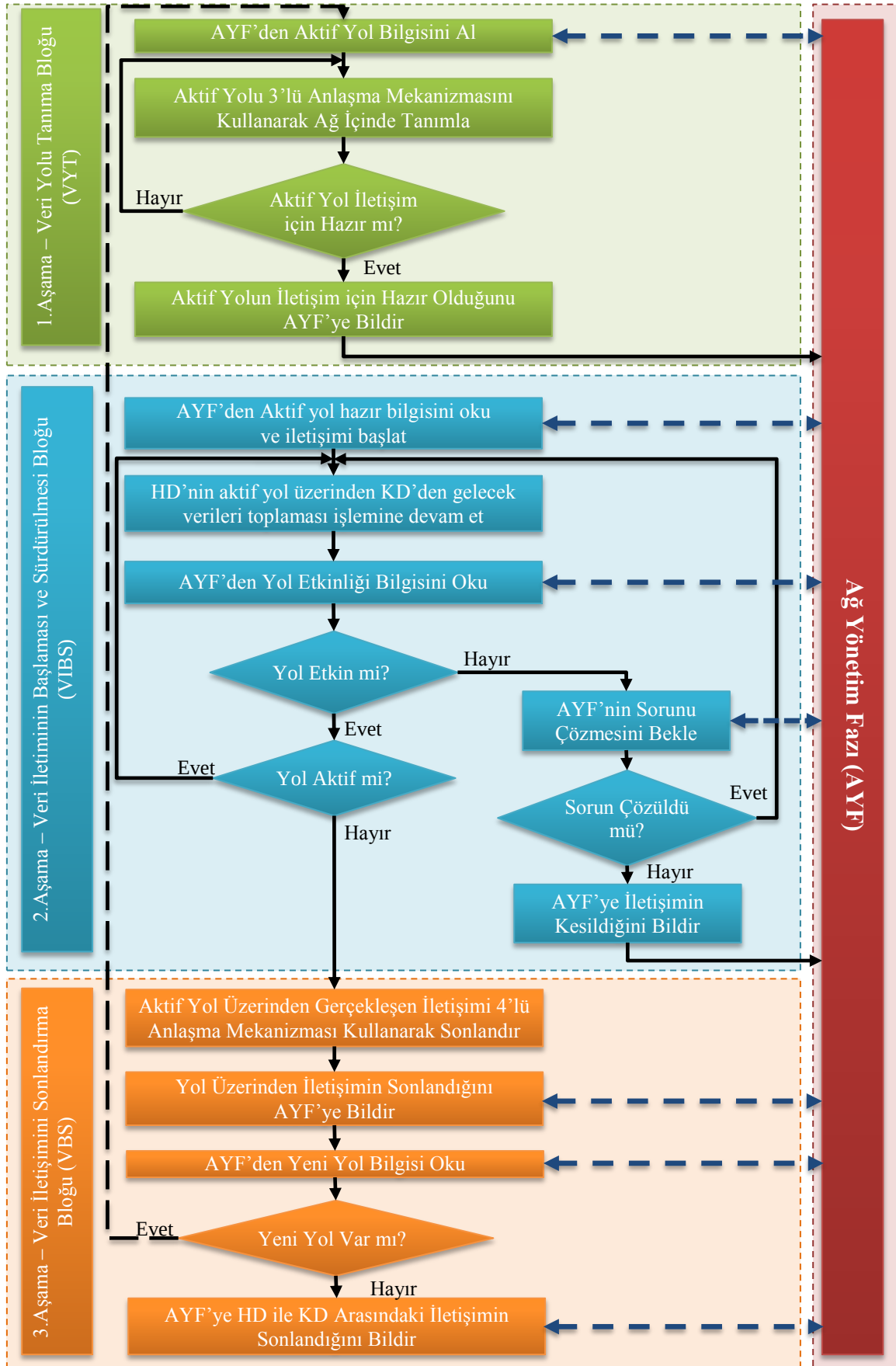
- YBGF modülü ile bulunan enerji açısından etkin yol üzerinden HD ile KD arasındaki iletişimi başlatmak için gerekli altyapıyı hazırlamak,
- HD ile KD arasındaki iletişimin başlatmak ve yol enerji açısından etkin olduğu sürece yolun kullanımını sağlamak,
- AYF modülü, iletişimin gerçekleştiği yol için enerji etkinliğini yitirdiğini bildirdiğinde HD ile KD arasındaki iletişimin bu yol üzerinden yapılmasını sonlandırarak süreçlerin yeni yol bilgisi için tekrarlamak.

Şeklinde sıralanabilir.

Bu doktora çalışmasında VIF modülü tasarlanırken belirlenen amaçların gerçekleşebilmesi için şu kriterleri göz önünde bulundurmıştır.

- YBGF modülünde belirlenen aktif yol üzerinden iletişimin başlayabilmesi için öncelikle HD ile KD arasındaki tüm DD'lerin iletişim için hazır hale gelmesi yani tüm yolun tanımlanması gerekmektedir. Bunun için tüm DD'lerin veri iletimi esnasında hangi komşu DD'ler ile iletişim kuracağını kendi yönlendirme tablolarına yazması gerekmektedir.
- İletişim sürecinde DD'lerin enerjilerini etkin kullanabilmek için DD'ler üzerinde çok işlem gücü oluşturacak işlerden kaçınılması gerekmektedir. Bunun için DD'lerin yönlendirme tablolarının çok fazla bilgi barındırmaması gerekmektedir.
- HD ile KD arasındaki iletişimin sürdürülebilir olması gerekmektedir. Yani ağ içinde karşılaşılan bir soruna karşı sistem AYF modülü ile birlikte bir çözüm üretebilmeli ve iletişimin ağ yaşam ömrü boyunca sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmalıdır.
- AYF modülü ile iletişimin gerçekleştiği yolun enerji açısından etkinliğinin sürekli kontrol edilmesi, etkinliğini yitirmiş bir yol için daha etkin yolun VIF modülüne bildirilmesi, VIF modülünün de iletişim süreçlerini tekrar başlatabilmesi gerekmektedir.

VIF modülünün genel yapısı Şekil 6.19'de görülmektedir.



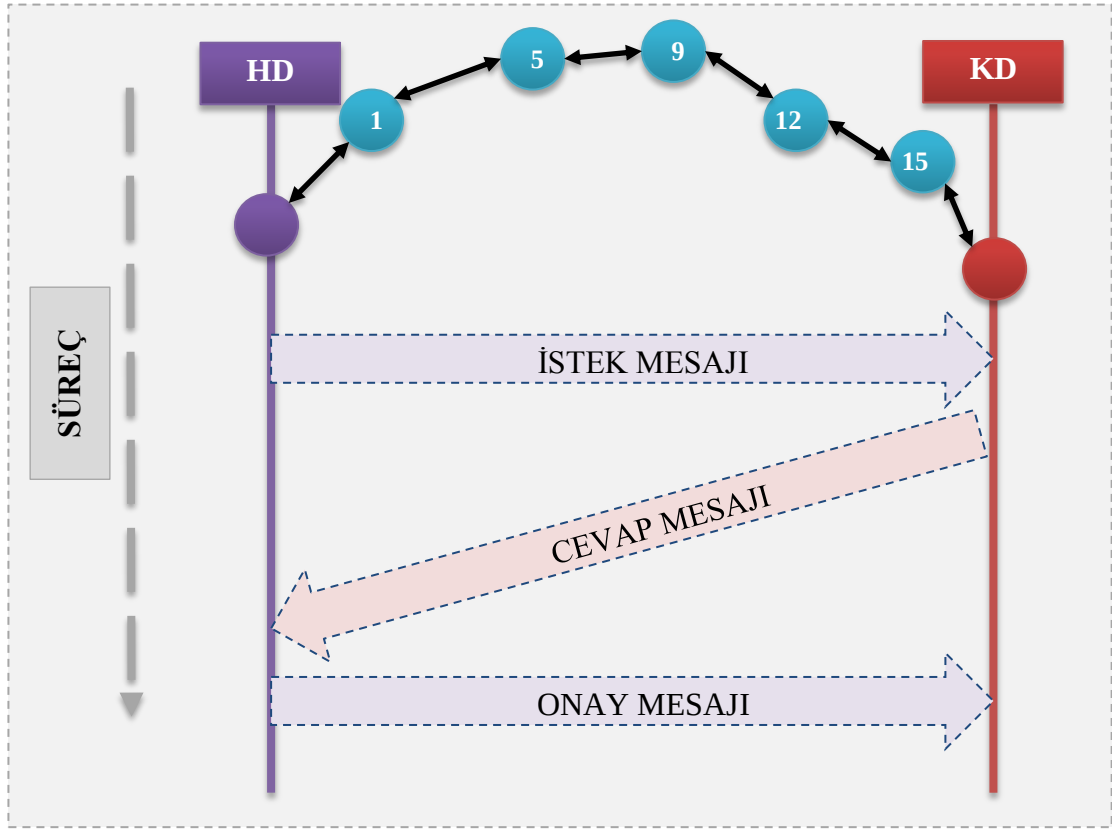
Şekil 6.19. VIF modülünün genel yapısı

Bu doktora çalışmasında önerilen VIF modülü belirlenen kriterler ve amaçları gerçekleştirmek için şekilde görüldüğü gibi üç ana bloktan oluşmaktadır. Birinci blok veri yolu tanıma (VYT) bloğudur. Bu YBGF tarafından belirlenmiş ve AYF tarafından VIF modülüne bildirilmiş olan aktif yolun, yol içindeki tüm duyargalara tanıtmak ve yolun hazır hale getirmek ile görevlidir. İkinci blok veri iletiminin başlaması ve sürdürülmesi (VIBS) aşamalarını yürütmek ile görevli olan bloktur. Üçüncü blok ise aktif yol üzerinden sürdürülen iletişimin sonlandırılması gerektiğinde süreçleri yönetmek ile görevli veri iletişimi sonlandırma (VIS) bloğudur.

6.3.4.1. Veri Yolu Tanıma (VYT) Bloğu

YBGF ile belirlenmiş ağ yaşam ömrü açısından etkin yol üzerinden KD ile HD arasında iletişimin başlayabilmesi için öncelikle yol üzerindeki tüm düğümler arasında bağlantı yolunun oluşturulması gerekmektedir. Bu doktora çalışmasında önerilen VYT bloğu ile aktif yol üzerinden gerçekleşecek iletişimin altyapısı oluşturularak yolun iletişim için hazır hale getirilmesi sağlanmaktadır. Hazır hale gelen yol üzerinden bir sonraki aşamada iletişim başlamaktadır.

Bu doktora çalışmasında gerçekleştirilen VYT bloğu, HD ile KD arasındaki aktif yol üzerinden gerçekleştirilecek olan iletişime yolu hazır hale getirmek için TCP'ye benzer üç yönlü anlaşma metodu kullanmaktadır. VYT bloğunda, HD ile KD arasındaki bağlantının oluşturulabilmesi ve üç yönlü anlaşmanın gerçekleşebilmesi için İSTEK, CEVAP ve ONAY olmak üzere 3 tip mesaj kullanılmaktadır. İstek mesajı HD tarafından KD'ye iletişim için aktif yolu tanıtmak, cevap mesajı KD'nin yolu tanıdığını HD'ye söylemek, onay mesajı ise HD'nin KD'ye yolu onayladığı ve bu yol üzerinden veri göndermeye başlayabileceğini söylemesi için kullanılmaktadır. VYT bloğunda yolun hazır hale getirilmesi için gerçekleştirilen anlaşma yapısı Şekil 6.20'de gösterilmektedir. Şekil 6.20'de gösterilen VYT bloğu anlaşma yapısı, Şekil 6.17'deki örnek ağ topolojisi ve bu topolojiye bağlı olarak Tablo 6.5'deki en uygun yolun seçildiği kabul edilerek oluşturulmuştur.



Şekil 6.20. VYT bloğu anlaşma yapısı

VYT bloğu ile üçlü anlaşma yapısında kullanılan mesajlar şu şekildedir.

İstek Mesajı Yapısı:

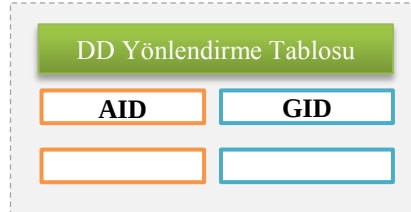
VYT bloğunda iletişimin gerçekleşmesi için HD ile KD arasındaki yolun hazırlanması için öncelikle HD, KD'ye YBT üzerindeki aktif yol bilgisini AYF'den alarak aktif yol içindeki son düğüm olan KD için BY alanının başına 0 yazarak bir istek mesajı gönderir. İstek mesajı HD'nin KD'ye veri iletişimi için bu yolu kullan deme şeklidir. Buradaki asıl problem HD ile KD arasında direkt bir bağlantının olmayışı, bağlantının ağ alanı içindeki DD'ler üzerinden gerçekleşmesi gereğidir. Dolayısı ile HD ile KD iletişimin gerçekleşeceği yol için anlaşırken arada kullanılan DD'lerinde iletişim esnasında hangi DD'ler ile iletişim kuracağını öğrenmesi gerekmektedir. Anlaşmanın ilk adımı olan HD'den KD'ye gönderilen istek mesajı KD'ye ulaştığında, yol içindeki tüm DD'ler istek mesajının kimden geldiğini ve kime mesajı göndermesi gerektiğini istek mesaj paketinden öğrenerek kendileri ile ilgili yön bilgilerini kendi yönlendirme tablolarına yazmaktadır. HD'den KD'ye gönderilen istek mesajı genel mesaj yapısı içindeki MT, KID, HID, SS ve BY alanlarını kullanmaktadır. İstek mesajının yapısı Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. İstek mesajı yapısı

Şekil 6.21’de görülen İstek mesajı yapısında bulunan KID, mesajı gönderen düğümün kaynak ID değerini, HID ise mesajın gönderileceği hedefin ID değerini vermektedir. Gönderilen mesajın tipini MT alanı, HD ile KD arasındaki atlama sayısını SS, mesajın toplam yol bilgisini ise BY alanı vermektedir.

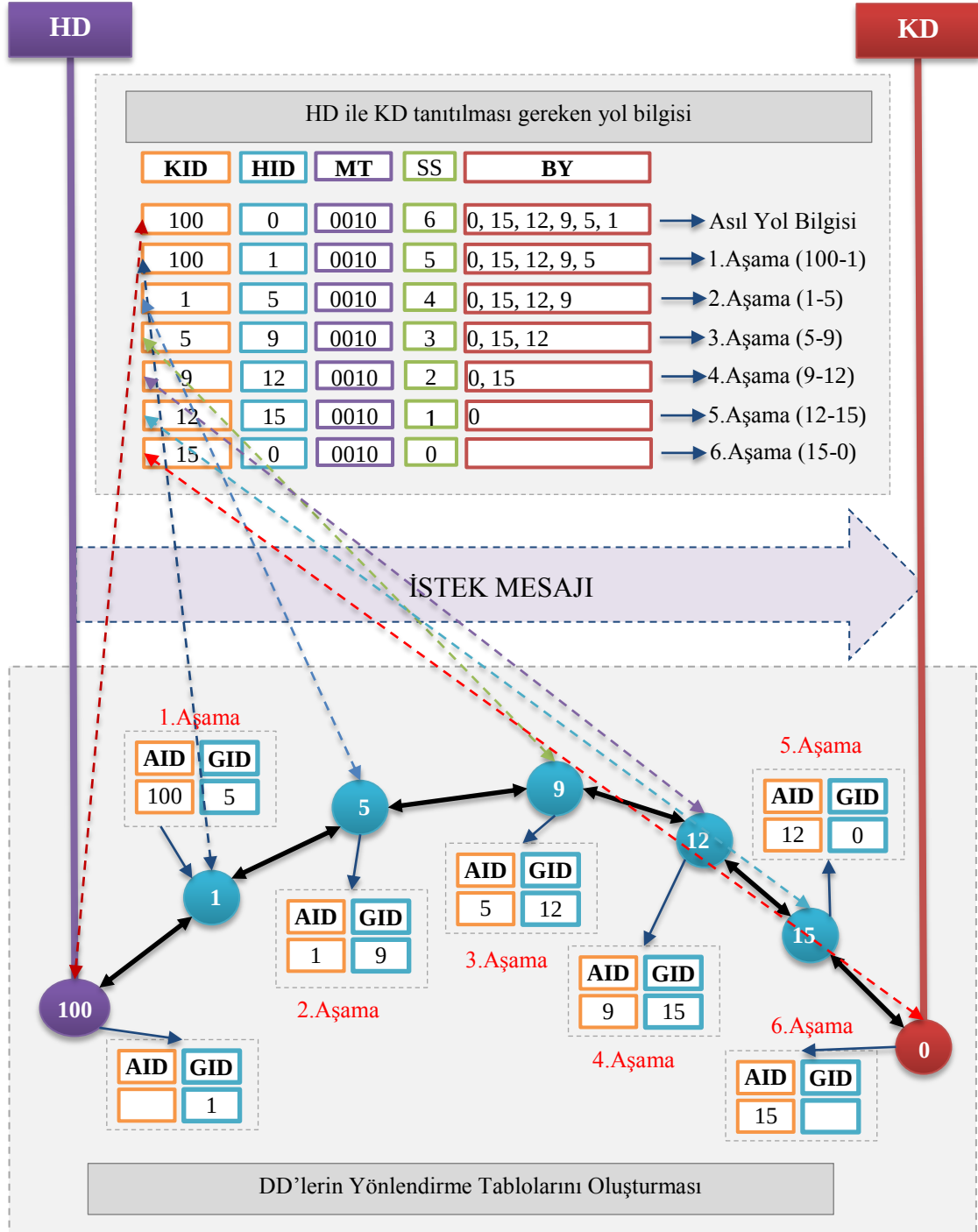
Ağ içindeki ilgili DD’ler istek mesajı kendilerine gelince iki işlem yaparlar. Birinci işlem istek mesajının BY alanı içinde bulunan bir sonraki DD’ye yönlendirilmesi, ikinci işlem ise anlaşma aşamasından sonra gerçekleşecek olan iletişim süreçlerinde kullanmak üzere hangi DD’ler ile iletişim kuracağını kendisine ait yönlendirme tablosuna yazmasıdır. Böylece bundan sonraki iletişim süreçlerinde tüm DD’ler kendilerine ait yönlendirme tablolarına bakarak hareket etmeleri sağlanmış olacaktır. DD’lere ait yönlendirme tablosunun yapısı Şekil 6.22’de gösterilmiştir.



Şekil 6.22. DD yönlendirme tablosu

Şekil 6.22’de gösterilen DD’lere ait yönlendirme tablolarında sadece iki alan bulunmaktadır. Birinci alan, mesajın alındığı DD’yi tanımlayan AID alanı, ikincisi ise mesajın gönderileceği DD’yi tanımlayan GID alanıdır. İstek mesajı kendinde ulaşan bir DD mesajı aldığı zaman öncelikle mesajın tipine bakarak mesajın bir istek mesajı olduğunu öğrenir. Mesajın kimden geldiği bilgisini istek mesajındaki KID alanından okur ve bu bilgiyi kendi yönlendirme tablosundaki AID alanına yazar. Bir sonraki aşamada ise istek mesajının içindeki BY alanından mesajı göndereceği DD’nin ID bilgisini okur ve bu bilgiyi de yönlendirme tablosundaki GID alanına yazar. Böylece bir DD bundan sonraki iletişim süreçlerinde kullanacağı yol bilgilerini kendisine ait yönlendirme tablosu üzerinde

oluşturmuş olur. Yönlendirme tablosunu oluşturan DD istek mesajını yol bilgisi içindeki bir sonraki DD'ye iletirken SS değerini 1 azaltır. Bu süreç, istek mesajının HD'den çıkması ile başlar ve istek mesajının KD'ye ulaşması ile sonlanır. İstek mesajının HD'den çıkış KD'ye ulaşmaya kadar gerçekleşen süreçler Şekil 6.23'de gösterilmiştir.



Şekil 6.23. İstek mesajı süreçleri

İstek mesajı süreci sonunda HD ile KD arasındaki tüm DD'ler kendilerine ait yönlendirme tablolarını oluşturmuş olur. İstek mesajı süreci sonunda ağ içindeki tüm düğümler artık hangi DD'ler ile iletişim kurması gerektiğini öğrenmiş olur.

Cevap ve Onay Mesajlarının Yapısı:

VYT aşamasında istek mesajını alan KD, istek mesajı ile tanımlanmış yol üzerinden HD'ye cevap mesajı göndermektedir. Gönderilen bu mesaj yol üzerindeki tüm düğümlerin aktif ve yolun kullanılabilir olduğu anlamına gelmektedir. Cevap mesajı HD'ye geldiğinde, KD'ye onay mesajı gönderir. HD'nin KD'ye onay mesajını göndermesi ile iletişim için yol kullanıma açılmıştır. VYT sürecinde kullanılan cevap ve onay mesajları aynı yapıdadır. Her iki mesajda da kaynağın adresini barındıran KID, hedefin adresini barındıran HID alanları ile gönderilen mesajın tipini bildiren MT alanları bulunmaktadır. İstek mesajı KD'ye geldiğinde gelen paket içerisindeki BY ve SS alanlarına bundan sonraki süreçlerde ihtiyaç duyulmadığı için tekrar kullanılmamaktadır.

KD istek mesajına cevap mesajı vereceği zaman mesaj paketi içindeki MT alanını istek mesajı olan "0010" yerine cevap mesajı anlamına gelen "0011" olarak değiştirerek HD'ye gönderir. HD'de KD'ye onay mesajı paketini gönderirken MT alanındaki cevap mesajını onay mesajı anlamına gelen "0100" olarak değiştirerek gönderir. Böylece üçlü anlaşma süreci tamamlanmış olur. Cevap ve onay mesaj paketlerinin yapısı Şekil 6.24'de görülmektedir.



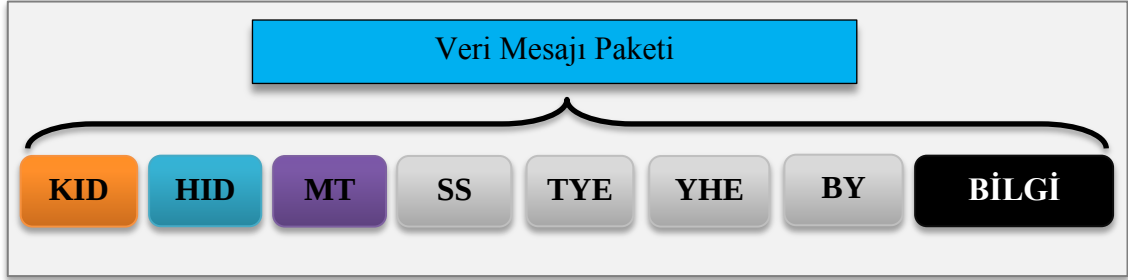
Şekil 6.24. Cevap ve Onay mesajı yapısı

VYT sürecinin son aşamasında KD'ye onay mesajının gönderilmesi ile birlikte yolun hazır olduğu bilgisi AYF modülüne bildirilerek iletişimin başlaması sağlanır.

6.3.4.2. Veri İletiminin Başlaması ve Sürdürülmesi (VIBS) Bloğu

Bu doktora çalışmasında önerilen VIBS bloğu, HD ile KD arasında anlaşma süreci tamamlanan aktif yol üzerinden iletişimin başlaması ve sürdürülmesi süreçlerini yönetmek için tasarlanmıştır. Bu blok öncelikle VYT bloğu ile iletişim için hazır hale gelmiş yol

üzerinden iletişimin başlayacağı bilgisini AYF modülünden alır. Bu işlem VYT bloğunda onay mesajının HD'ye ulaşması ile eş zamanlı gerçekleşmektedir. Bu aşamadan itibaren KD algıladığı verileri HD'ye tanımlı yol üzerinden göndermeye başlar. HD ile KD arasındaki iletişim için kullanılan veri paketi yapısı Şekil 6.25'de gösterilmiştir.



Şekil 6.25. Veri paketi yapısı

İletişim için kullanılan veri paketinde genel mesaj yapısı içindeki MT, KID, HID ve BİLGİ alanları kullanılmaktadır. Burada MT alanı mesajın bir veri paketi olduğunu, KID mesajın çıktığı DD'nin kaynak adresi değerini, HID mesajın ulaşacağı hedef DD'nin adresini vermektedir. BİLGİ alanı ise KD tarafından algılanmış veriyi barındıran alan olarak tanımlanmaktadır. BİLGİ alanındaki veri KD tarafından algılanmış sıcaklık, basınç gibi bir değer olduğu için tek bir veri paketi ile HD'ye gönderilebilmektedir.

Bu doktora çalışmasında önerilen VIBS bloğu ile HD ve KD arasındaki iletişim süreçleri şu şekilde işlemektedir.

- KD algıladığı veriyi Veri paketinin içindeki BİLGİ alanına yazar.
- Veri paketinin MT alanına gönderilecek olan paketin bir veri paketi olduğunu söylemek için "0101" değerini yazar.
- KID alanına kendi adres bilgisini, HID alanına ise yönlendirme tablosunda anlaşma sürecinde oluşturulmuş olan iletişim kuracağı DD'nin adresini yazar ve veri paketini gönderir.
- Veri paketini alan DD öncelikle paketin MT alanına bakar ve paketin bir veri paketi olduğunu öğrenir. Paketin KID değerine kendi adresini, HID adresine ise kendi yönlendirme tablosu içinde bulunan verinin gönderileceği DD'nin adresini yazar ve paketi bir sonraki DD'ye iletir.
- Paket yol içindeki DD'lerden geçerek HD'ye ulaşır.

- HD paketi alıp MT alanından paketin bir veri paketi olduğunu öğrendiğinde VIBS bloğu ile AYF modülüne KD'den bir paket geldiğini bildirir.
- AYF modülü YBT'deki alanları günceller ve yolun ağ yaşam ömrü açısından etkinliğini kontrol eder. Yol hala etkin ise VIBS bloğuna yol etkin mesajını iletir.
- VIBS bloğu yol etkin olduğu sürece veri iletimi için aktif yolu kullanmaya devam eder.
- AYF modülü VIBS bloğuna yol artık ağ yaşam ömrü açısından etkin değil mesajı gönderdiğinde VIBS bloğu HD ile KD arasındaki iletişimin sürdüğü yolu kapatmak ve yeni yol üzerinden veri iletimini başlatmak için bölüm 6.3.4.3 de ayrıntıları anlatılacak olan VIS bloğunu aktif eder.
- VIBS bloğuna AYF modülü tarafından aktif yol üzerinden iletişimin gerçekleşmediği bilgisi gelirse VIBS, blok içinde tanımlanmış olan periyotlarda AYF modülünden sorunun çözülüp çözülmediği bilgisini sorgular ve sorun çözülmedi ise AYF modülüne aktif yol üzerinden iletişimin kesildiği bilgisini ulaştırır. AYF modülü veri iletim süreçlerini bir sonraki etkin yol için tekrar başlatarak HD ile KD arasındaki iletişimin sürekliliğini sağlar.

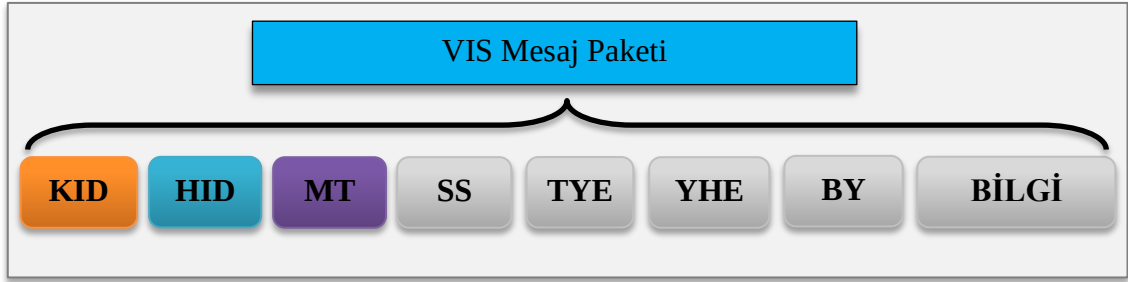
Bu doktora çalışmasında gerçekleştirilen VIBS bloğu sayesinde HD ile KD arasındaki iletişimin ağ yaşam ömrü açısından en etkin yol üzerinden sürdürülebilirliği sağlanmış olur.

6.3.4.3. Veri İletişimini Sonlandırma (VIS) Bloğu

Bu doktora çalışmasında, ağın toplam yaşam ömrünü etkin bir şekilde kullanabilmek için, HD ile KD arasında aktif yol üzerinden gerçekleşen iletişim sürecinin etkinliği sürekli kontrol edilerek, yol etkinliğini yitirdiğinde daha etkin bir yol üzerinden iletişimin sürdürülmesi amaçlanmaktadır. Bunun içinde gerek duyulduğunda etkin yoldaki iletişimin sonlandırılması ve YBT'de tanımlı daha etkin bir yol var ise o yol üzerinden iletişim süreçlerinin tekrar başlatılması gerekmektedir.

Çalışmada önerilen VIS bloğu, HD ile KD arasındaki aktif yol üzerinden gerçekleştirilen iletişimin sonlandırılması için gerekli süreçleri yönetmek için tasarlanmıştır. VIS bloğu HD ile KD arasındaki iletişimi sonlandırabilmek için 4'lü anlaşma mekanizmasını kullanmaktadır. Kullanılan anlaşma yapısı HD ile KD'nin iletişimi sonlandırmak için gerekli anlaşmayı gerçekleştirmelerini sağlar. HD ile KD arasındaki

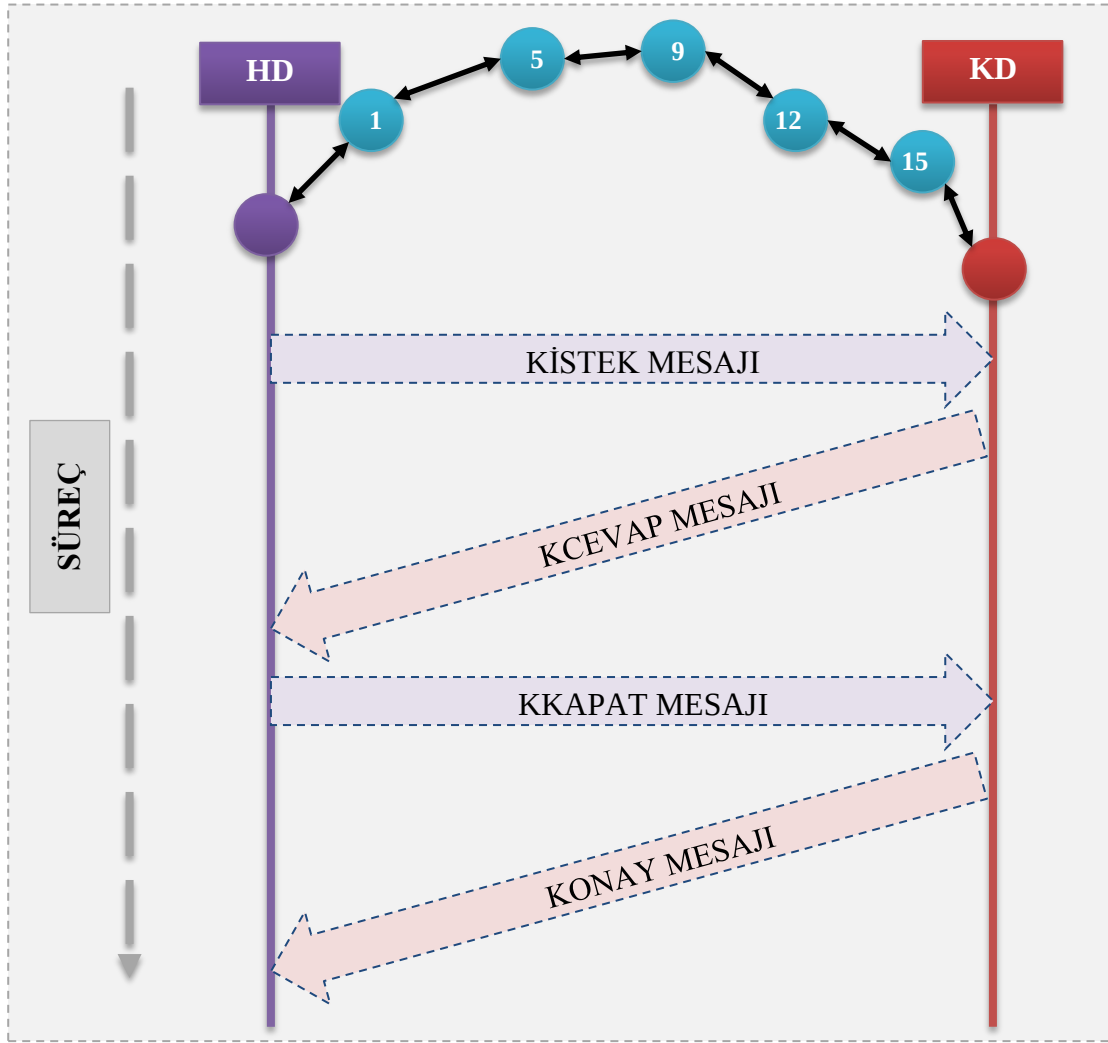
aktif yol üzerinden gerçekleşen iletişimin sonlandırılması için kullanılan mesaj paketi yapısı Şekil 6.26’de gösterilmiştir.



Şekil 6.26. VIS mesaj paket yapısı

HD ile KD arasında gerçekleşecek olan aktif yolun sonlandırma sürecinde 4’lü anlaşmanın gerçekleşebilmesi için VIS bloğunda 4 adet mesaj kullanılmaktadır. Birinci mesaj, HD’nin KD’ye yolun iletişim için kapatılması gerektiğini söylediği KISTEK mesajıdır. İkinci mesaj KD’nin HD’nin isteğine karşılık yol kapanabilir cevabını verdiği KCEVAP mesajıdır. Üçüncü mesaj HD’nin KD’ye bu yoldan artık paket göndermeyi durdurmasını söylediği KKAPAT mesajıdır. Dördüncü mesaj ise KD’nin HD’ye yolun iletişime kapandığını söylediği KONAY mesajıdır.

VIS bloğunda kullanılan 4 mesaj tipide Şekil 6.26’de gösterilmekte olan mesaj paket yapısını kullanmaktadır. Kullanılan mesaj paket yapısı genel mesaj yapısı içindeki MT, KID ve HID alanlarını barındırmaktadır. Burada KID, mesajı gönderen düğümün kaynak adresini, HID ise mesajın gönderileceği hedefin adresini vermektedir. MT alanı ise gönderilen mesajın tipini belirtmektedir. VIS bloğunda kullanılan KISTEK, KCEVAP, KKAPAT, KONAY mesajları gönderilirken MT alanlarında kendi mesaj tipleri ile ilgili parametreyi yazılıdır. VIS bloğunda yolun kapatılması için gerçekleştirilen anlaşma yapısı Şekil 6.27’de gösterilmektedir



Şekil 6.27. VIS bloğu anlaşma yapısı

Bu doktora çalışmasında önerilen VIS bloğu ile HD ve KD arasındaki aktif yol üzerinden gerçekleşen iletişimin sonlandırılması süreçleri şu şekilde işlemektedir.

- VIBS bloğu, AYF modülünden yolun ağ yaşam ömrünün etkinliği açısından değişmesi gerektiği bilgisini aldığı anda, aktif yolun kapatılması için VIS bloğunu çalıştırır.
- VIS bloğu yolun sonlandırmak için 4'lü anlaşma sürecini başlatır. Bu süreçte;
 - İlk olarak HD, KD'ye yolun kapatılması için KİSTEK mesajı gönderir. Mesajın KID alanına kendi adresini, HID alanına ise kendi yönlendirme tablosundaki paketi göndermesi gereken DD'nin adresini yazar. MT alanına ise bu mesajın bir KİSTEK mesajı olduğunu belirten "0110" yazar.
 - KİSTEK mesajı KD'ye ulaştığında KD yolun iletişime kapanabileceğini belirten KCEVAP mesajını HD'ye gönderir. Mesajın KID alanına kendi,

HID alanına yönlendirme tablosundaki paketi göndermesi gereken DD'nin adresini yazar. MT alanındaki "0110" değerini, bu mesajın bir KCEVAP mesajı olduğunu belirten "0111" değeri ile değiştirir ve mesaj paketini gönderir.

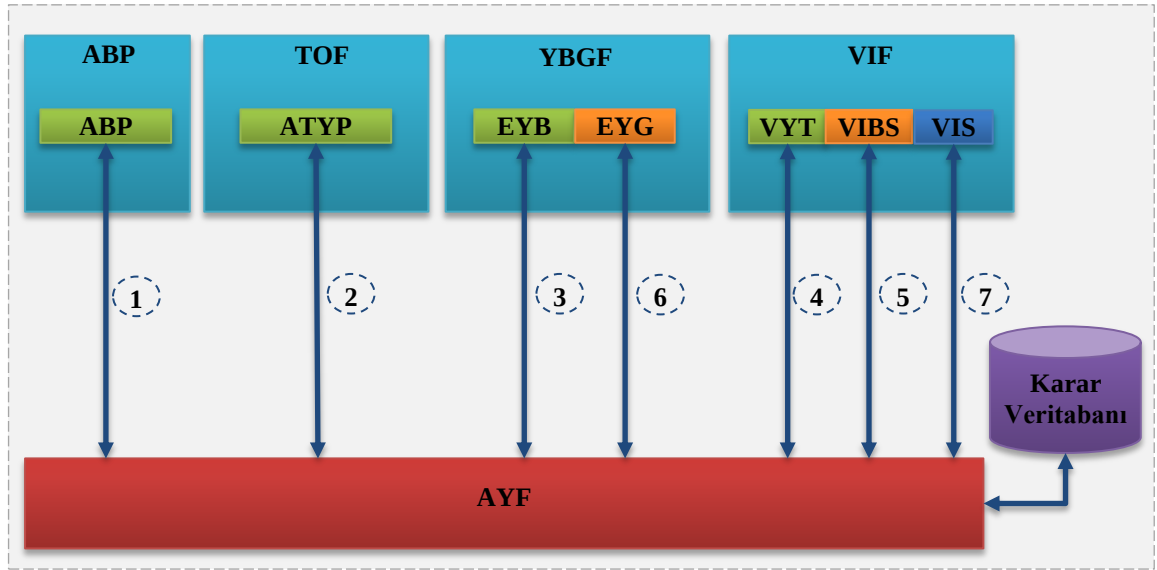
- KCEVAP mesajı HD'ye ulaştığında HD, bu yol üzerinden artık paket alınmayacağını söylemek için KD'ye KKAPAT mesajı gönderir. HD bu mesajı gönderirken mesaj paketinin MT alanındaki "0111" değerini mesajın KKAPAT mesajı olduğunu belirten "1000" değeri ile değiştirir. HD bu mesajı gönderdikten sonra yolun kapanması sürecini tamamlamak için cevap bekler.
- KKAPAT mesajını alan KD, HD'ye artık bu yol üzerinden paket gönderilmeyeceği anlamına gelen KONAY mesajı gönderir. Mesajı gönderirken MT alanındaki "1000" değerinin KONAY anlamına gelen "1001" değeri ile değiştirir ve mesaj paketini gönderir.
- VIS bloğunda 4'lü anlaşma süreci ile aktif yol üzerinden gerçekleşen iletişim sonlanmış olur. Bu aşamadan sonra HD ile KD arasındaki iletişimin sürekliliği için ağ yaşam ömrü için yeni etkin yol bilgisi AYF modülünden alınarak yeni yol üzerinden iletişimin başlaması gerekmektedir. Bu amaçla VIS bloğu AYF'den yeni yol bilgisini okur. Yeni yol var ise, yeni yol üzerinden iletişimin başlayabilmesi için VYT bloğunu çalıştırarak iletişim süreçlerini tekrarlar.
- VIS bloğu AYF'den yeni yol yok bilgisini alana kadar ağ yaşam ömrü açısından en etkin yol üzerinden iletişim devam eder. Yeni yol yok bilgisi gelirse artık ağ yaşam ömrü tamamlanmış yani YBT üzerinde kullanılabilecek yol bilgisi kalmamış demektir. Bu aşamada VIS bloğu AYF modülüne iletişimi tamamen sonlandırdığı bilgisini göndererek iletişim sürecini tamamen kapatır.

6.3.5. Ağ Yönetim Fazı (AYF) Modülü

AYF modülü sistem mimarisinde tanımlanmış olan TOF, YBGF, VIF modülleri ve bu modüllerin aralarındaki ilişkileri kontrol etmek, YBT'yi izleyerek ağ yaşam ömrünü etkin bir şekilde kullanabilmek için karar vermek, iletişim esnasında oluşabilecek sorunlara karşı çözümler üretebilmek için tasarlanmıştır. Bu bağlamda çalışmada gerçekleştirilen AYF modülünün temel amaçları şu şekilde sıralanabilir.

- ABP modülünden ağ yapısının oluşması için gerekli başlangıç parametrelerini okumak,
- Sistemin ağ yapısını öğrenmesi için TOF modülünü aktif etmek ve TOF modülü ile elde edilen yol bilgilerinin YBT'ye yazılmasını sağlamak,
- TOF modülünün çalışması bittiğinde YBGF modülünü aktif ederek YBT'de oluşan yol bilgilerini ağ yaşam ömrü etkinliğine göre sıralamak,
- HD ile KD arasındaki iletişimin en etkin yol üzerinden gerçekleşmesini sağlamak ve sürdürmek,
- İletim esnasında oluşacak sorunlara karşı çözümler üretmek,
- YBT üzerindeki tüm yollar tükenene kadar HD ile KD arasındaki iletişimi en etkin yol üzerinden yapılmasını sağlamak.

AYF modülünün süreçleri ve kontrol yapısı Şekil 6.28'de gösterilmiştir.



Şekil 6.28. AYF süreçleri

Bu doktora çalışmasında önerilen AYF modülü HD ve KD arasındaki iletişimin, ağ yaşam ömrü açısından en etkin yol üzerinden gerçekleştirmek için şu süreçleri izler.

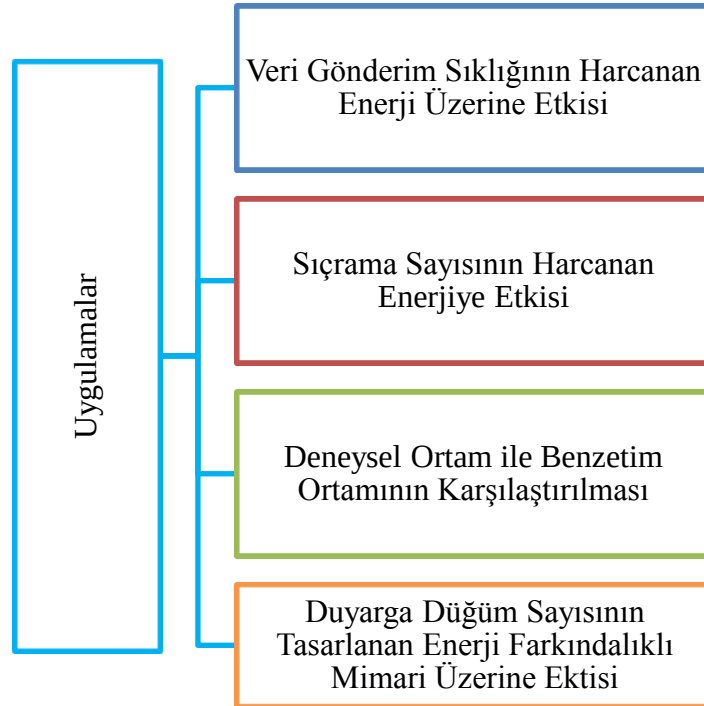
- Öncelikle ağın yapısını oluşturmak için ağda kullanılacak DD sayısı, TDA alanı gibi parametreleri ABP modülü ile birlikte sistem içinde tanımlar.
- Sistem parametreleri girilmiş ağda dağıtılan rastgele DD'ler kullanılarak HD ile KD arasındaki yolların keşfi için TOF modülünü çalıştırır.
 - TOF modülü ABP'de tanımlanmış süre kadar çalışır.

- Bu süreçte AYF, KD'den HD'ye gelen ATYP mesajlarını karar veritabanındaki YBT'lere yazar.
- AYF, ABP'de tanımlanmış süre sonunda TOF sürecini tamamlar.
- AYF, TOF süreci ile belirlenerek YBT'ye yazılmış yolların TYE ve YHE değerlerine göre YKO değerlerini hesaplar.
- Yolların ağ yaşam ömrü etkinliğine göre sıralanması için YBGF modülündeki EYB bloğunu çalıştırır.
- EYB bloğuna göre YBT'nin ilk sırasındaki yolu aktif yol olarak atar.
- AYF, aktif yol üzerinden iletişimin başlayabilmesi için gerekli anlaşma sürecini gerçekleştirmek için VIF modülündeki VYT bloğunu çalıştırır.
- VYT'den aktif yol hazır bilgisini aldıktan sonra aktif yol üzerinden HD ile KD arasındaki iletişimin başlaması için VIF modülündeki VIBS bloğunu çalıştırır.
- AYF, HD'ye her paket geldiğinde YBT üzerindeki aktif yolun ve aktif yolda kullanılan DD'lere göre diğer yolların YKO değerini günceller.
- Aktif yolun YKO değeri ABP'de belirlenmiş eşik değerinin altına düştüğünde yol üzerinden gerçekleşen iletişimin sonlandırılması için VIF modülündeki VIS bloğunu çalıştırır.
- VIS modülünü çalıştırırken buna paralel olarak yeni aktif yol bilgisine göre VYT sürecini tekrar başlatarak HD ile KD arasındaki iletişimin devamlılığını sağlar. Bu işlemi YBT üzerinde tanımlanacak yol olduğu sürece gerçekleştirir.
- YBT üzerinde tanımlanabilecek yol kalmaması HD ile KD arasındaki tüm yolların enerjisinin tamamen tükendiği yani ağ yaşam ömrünün son bulduğu anlamına gelmektedir. AYF bu durumda tüm iletişim süreçlerini kapatır.

7. UYGULAMALAR

7.1. Giriş

Bu bölümde doktora tez çalışmasının asıl amacı olan telsiz duyarga ağlarda enerji farkındalıklı yönlendirme için tasarlanan mimarinin hem benzetim hem de deneysel ortamda testi gerçekleştirilecektir. Test için bölüm 5’te detaylı anlatılan Castalia benzetim programı ve Jennic Seti kullanılacaktır. Laboratuvar ortamında elde edilen sonuçların gerçekçi olabilmesi için bölüm 6.3.4’de anlatılan veri iletim fazından başlanacaktır. Başlanan bu sürece kadar ağ topolojisinin belirlendiği, yol belirleme fazında da enerji farkındalıklı en uygun olarak KD ve HD dahil 10 adet duyargadan oluşan yolun atandığı kabul edilmiştir. 10 adet duyarga test ortamı için yaklaşık olarak 500 adet duyargadan oluşacak bir sistemi modellediği açıktır. Sonuç olarak gerçek bir telsiz duyarga algılayıcı sistem laboratuvar test ortamında gerçekleştirilmiş olur. Bu bölümde ele alınan konular Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Gerçekleştirilen uygulamalar

7.2. Veri Gönderim Sıklığının Harcanan Enerji Üzerine Etkisi

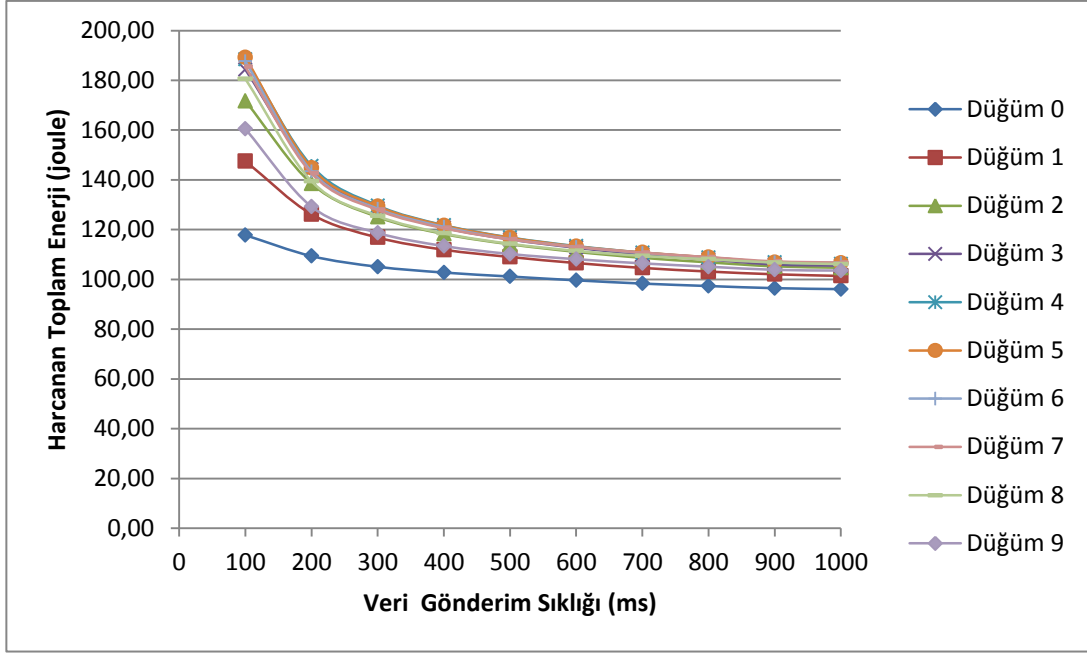
TDA’larda nihai hedef başarılı veri iletimi olduğuna göre birim başarılı veri başına harcanan enerji önemli bir parametredir. Gönderim başarısını etkileyen faktörlerden bir tanesi kaynak düğümden elde edilen verilerin gönderim sıklığıdır. Bu amaçla değişik sıklıkta gönderilen veriler için her bir düğümün harcadıkları enerji ile başarılı/hatalı verilerin sayıları Tablo 7.1’de, her bir düğümde harcanan enerjide Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Tablo 7.1’de HE= joule olarak harcanan enerji miktarı, Tx= toplam gönderilen paket, Rc= toplam alınan başarılı paket, F1= duyarlılığın altında olduğu için hatalı algılanan paket, F2= bozuk paket değerleridir.

Tablo 7.1. Farklı gönderim sıklıklarına göre düğüm parametreleri

Paket Gönderim Sıklığı (ms)	Düğüm=0 (Kaynak Düğüm)						Düğüm=1					
	HE (J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam	HE (J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
100	117,78	1053	47624	25563	60148	134388	147,55	59910	60963	49780	43325	213978
200	109,37	1091	30611	20641	25007	77350	126,17	35672	36761	32282	15439	120154
300	105,07	1097	22580	16946	14550	55173	116,83	25681	26782	23846	8611	84920
400	102,75	1145	18252	14580	9388	43365	111,93	20323	21467	19227	5346	66363
500	101,16	1126	15209	12828	6636	35799	109,01	16727	17856	16082	3998	54663
600	99,63	1168	13128	11673	4867	30836	106,57	14352	15520	14066	2968	46906
700	98,32	1167	11495	10436	3674	26772	104,61	12473	13640	12121	2410	40644
800	97,34	1210	10200	9363	2971	23744	103,15	10988	12200	10653	2100	35941
900	96,47	1189	9180	8654	2276	21299	102,05	9859	11049	9556	1678	32142
1000	96,09	1156	8414	8039	2200	19809	101,39	9126	10284	8992	1526	29928
Paket Gönderim Sıklığı (ms)	Düğüm=2						Düğüm=3					
	HE (J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
100	171,73	73425	133080	59611	31500	297616	184,31	79590	152396	123291	29242	384519
200	138,48	40587	76165	36508	11440	164700	144,10	42804	83103	71843	12271	210021
300	125,07	28395	53955	27235	6146	115731	128,43	29747	57916	51974	6975	146612
400	118,25	21897	42092	21962	4288	90239	120,77	22998	44678	41249	5012	113937
500	114,11	17946	34563	18368	3323	74200	116,05	18864	36633	34173	3712	93382
600	111,06	15316	29582	16051	2607	63556	112,72	16070	31247	29627	2849	79793
700	108,67	13132	25531	14043	2397	55103	109,99	13872	26902	25730	2542	69046
800	106,85	11546	22487	12445	2127	48605	107,99	12197	23652	22511	2342	60702
900	105,23	10251	20044	11323	1845	43463	106,00	10843	20986	20312	2054	54195
1000	104,69	9527	18597	10655	1720	40499	105,50	10119	19565	18989	1741	50414

Tablo 7.1. Devamı

	Düğüm=4						Düğüm=5					
Paket Gönderim Sıklığı (ms)	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
100	188,47	83638	158317	143128	30726	415809	189,18	87956	166450	147807	34907	437120
200	145,59	44546	85185	79409	13005	222145	144,81	46412	88881	81082	14469	230844
300	129,68	30811	59377	56212	7288	153688	129,34	31978	61438	57344	8221	158981
400	121,77	23876	45929	44166	5019	118990	121,64	24843	47983	45233	4934	122993
500	116,84	19537	37797	36554	3500	97388	116,73	20308	39315	37588	3368	100579
600	113,40	16650	32308	31617	2535	83110	113,27	17405	33678	32507	2166	85756
700	110,76	14459	27974	27363	2132	71928	110,81	15110	29290	28008	1971	74379
800	108,80	12664	24622	23933	2062	63281	108,89	13307	25767	24813	1644	65531
900	106,82	11321	21886	21524	1684	56415	106,87	11921	23040	22169	1366	58496
1000	106,23	10571	20414	19999	1508	52492	106,55	11071	21388	20806	1069	54334
	Düğüm=6						Düğüm=7					
Paket Gönderim Sıklığı (ms)	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
100	187,64	91200	174750	155749	36424	458123	185,44	94736	180502	170473	30036	475747
200	143,39	47796	92205	85460	13666	239127	142,62	49286	94582	90650	11429	245947
300	128,39	32757	63306	59940	7856	163859	127,89	33688	64943	62705	6483	167819
400	121,11	25376	49264	47366	4401	126407	120,57	25900	50250	48742	4104	128996
500	116,17	20733	40378	39005	3033	103149	116,08	21137	41058	39976	2924	105095
600	113,07	17669	34526	33606	2041	87842	113,03	17962	34948	34086	2332	89328
700	110,62	15355	30007	29159	1772	76293	110,73	15583	30305	29539	2153	77580
800	108,77	13567	26471	25696	1626	67360	108,94	13796	26780	26049	2041	68666
900	106,86	12079	23638	23141	1442	60300	107,24	12332	23896	23526	1827	61581
1000	106,63	11204	21888	21482	1178	55752	106,75	11369	21986	21712	1606	56673
	Düğüm=8						Düğüm=9 (Hedef Düğüm)					
Paket Gönderim Sıklığı (ms)	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
100	180,59	100593	190706	79813	16679	387.791	160,47	101262	94757	64250	36322	296591
200	139,44	51087	98543	42023	7882	199.535	129,20	51366	48277	40048	12048	151739
300	125,48	34625	64943	62705	6483	168.756	118,68	34771	32847	29256	6210	103084
400	118,51	26412	51388	23192	3161	104.153	113,40	26465	25197	23384	3731	78777
500	114,31	21434	41789	19016	2548	84.787	110,21	21483	20388	19303	2880	64054
600	111,47	18156	35419	16319	2029	71.923	108,13	18136	17198	16541	2379	54254
700	109,44	15786	30683	14130	1871	62.470	106,44	15746	14935	14174	2260	47115
800	108,09	14026	27194	12446	1693	55.359	105,12	13970	13186	12381	2255	41792
900	106,78	12647	24430	11210	1373	49.660	103,84	12602	11923	11020	2036	37581
1000	106,14	11537	22348	10323	1394	45.602	103,55	11492	10839	10116	1951	34398



Şekil 7.2. Farklı gönderim sıklığına göre düğümde harcanan toplam enerji

Tablo 7.2’de, Tablo 7.1’de verilen detaylı bilgiler sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi için özetlenmiştir.

Tablo 7.2. Farklı veri gönderim sıklığına göre toplam harcanana enerji ve başarı oranı

Paket Gönderim	Enerji Tüketimi (J)	Toplam Paket	Başarılı Paket	Başarı Oranı (%)
s1=100 msn	1713,149	99742	46687	0,468
s2=200 msn	1363,169	49871	29598	0,593
s3=300 msn	1234,858	33247	21494	0,646
s4=400 msn	1170,692	24935	17023	0,683
s5=500 msn	1130,666	19948	14357	0,720
s6=600 msn	1102,347	16623	11966	0,720
s7=700 msn	1080,377	14248	10241	0,719
s8=800 msn	1063,933	12467	8909	0,715
s9=900 msn	1048,161	11082	7943	0,717
s10=1000 msn	1043,527	9974	7118	0,714

Şekil 7.2’de açıkça görüldüğü gibi veri gönderim sıklığı arttıkça düğümde harcanan enerji artmaktadır. Tablo 7.2 ve Şekil 7.2 birlikte değerlendirildiğinde veri gönderim sıklığı arttığında her bir düğümde işlenen paket ve dolayısı ile ilgili düğümün harcadığı toplam enerji artmasına rağmen başarı oranı düşüktür. Dolayısı ile sık veri gönderim durumunda başarılı veri başına harcanan enerji artmaktadır. Sonuç olarak enerji farkındalıklı bir

mimari tasarımında veri gönderim sıklığının tespiti önemlidir. Şekil 7.2 ve Tablo 7.2’de görüldüğü gibi makul veri sıklığında hem başarımlı oranı artmakta hem de düğüm başına enerji düşmektedir.

7.3. Sıçrama Sayısının Harcanan Enerjiye Etkisi

Başarılı algılanan veri başına harcanan enerjide etkin bir başka parametrede seçilen yol üzerindeki düğüm sayısı (sıçrama sayısı) dır. Tablo 7.3’de farklı sıçrama sayılarına göre sistemde harcanan toplam enerji ve başarılı paket başına harcanan enerji görülmektedir. Bu sonuçlar Castalia Benzetim ortamında veri gönderim sıklığı 800ms ve toplam benzetim süresi 10000ms alınarak bulunmuştur.

Tablo 7.3. Değişik sıçrama sayılarına göre benzetim sonuçları

Yoldaki Düğüm Sayısı	Toplam Enerji (J)	Başarılı Paket	Toplam Paket	Başarı Oranı (%)	Başarılı Paket Başına Harcanan Enerji
d2	113,572	12373	12498	0,99	0,07
d5	1055,884	11732	12481	0,94	0,09
d8	1138,72	10352	12472	0,83	0,11
d10	1065,010	8989	12466	0,72	0,12
d20	2141,861	5358	12402	0,43	0,40
d30	3172,711	990	12309	0,08	3,20
d50	5071,691	137	12276	0,01	37,02

Tablo 7.3’den görüldüğü gibi TDA’larda enerji verimliliği seçilen yoldaki toplam sıçrama sayısına bağlıdır. Sıçrama sayısı arttıkça başarılı paket başına harcanan toplam enerji üstel olarak artmaktadır. Doktora tez çalışmasında enerji farkındalıklı yapı için önerilen sistemde minimum enerji harcanımını garanti edecek mekanizmanın kullanılmasının haklılığını ortaya koymaktadır. Tablo 7.3’de özetlenerek verilen sonuçların ayrıntıları Tablo 7.4 - Tablo 7.7 arasında verilmiştir. Tablo 7.4’de 10 sıçramalı yol için düğüm parametreleri, Tablo 7.5’de 20 sıçramalı yol için düğüm parametreleri, Tablo 7.6’da 30 sıçramalı yol için düğüm parametreleri, Tablo 7.7’de 50 sıçramalı yol için düğüm parametreleri verilmiştir.

Tablo 7.4. 10 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri

Düğüm	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
Düğüm = 0	97,390	1210	10200	9363	2971	23744
Düğüm = 1	103,372	10988	12200	10653	2100	35941
Düğüm = 2	107,028	11546	22487	12445	2127	48605
Düğüm = 3	108,135	12197	23652	22511	2342	60702
Düğüm = 4	108,985	12664	24622	23933	2062	63281
Düğüm = 5	109,039	13307	25767	24813	1644	65531
Düğüm = 6	108,952	13567	26471	25696	1626	67360
Düğüm = 7	109,020	13796	26780	26049	2041	68666
Düğüm = 8	108,083	14026	27194	12446	1693	55359
Düğüm = 9	105,006	13970	13186	12381	2255	41792

Tablo 7.5. 20 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri

Düğüm	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
Düğüm = 0	95,749	1142	6499	6104	2230	15975
Düğüm = 1	99,953	7134	8268	7015	1884	24301
Düğüm = 2	103,299	7699	14786	8708	1837	33030
Düğüm = 3	104,080	8326	15930	9927	6309	40492
Düğüm = 4	115,792	8729	16168	15164	2438	42499
Düğüm = 5	115,994	8604	16771	15994	3005	44374
Düğüm = 6	105,327	9141	17580	12453	6898	46072
Düğüm = 7	106,265	9574	18516	17378	2254	47722
Düğüm = 8	106,766	10025	19310	18356	2382	50073
Düğüm = 9	107,715	10378	20091	19035	2990	52494
Düğüm = 10	108,327	10956	21062	20061	2837	54916
Düğüm = 11	108,100	11561	22266	21013	2665	57505
Düğüm = 12	108,869	11996	23286	22390	2153	59825
Düğüm = 13	108,915	12614	24300	22857	1838	61609
Düğüm = 14	108,591	12698	24560	23844	2081	63183
Düğüm = 15	108,467	12740	24579	23896	3296	64511
Düğüm = 16	108,654	13135	25548	24657	2003	65343
Düğüm = 17	108,512	13324	25753	25293	1902	66272
Düğüm = 18	107,558	13446	26023	11922	2141	53532
Düğüm = 19	104,928	13627	13124	12208	1438	40397

Tablo 7.6. 30 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri

Düğüm	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
Düğüm = 0	90,617	240	1206	1212	6676	9334
Düğüm = 1	96,928	4395	4624	4446	1113	14578
Düğüm = 2	99,833	4699	9046	4857	1605	20207
Düğüm = 3	100,942	5244	9884	9471	1398	25997
Düğüm = 4	103,205	5629	10763	10069	1798	28259
Düğüm = 5	103,600	6030	11522	10845	1908	30305
Düğüm = 6	102,469	6657	12344	11483	1259	31743
Düğüm = 7	103,061	6745	12829	11804	1217	32595
Düğüm = 8	101,808	6682	12729	6495	7037	32943
Düğüm = 9	117,688	6481	12105	11606	3085	33277
Düğüm = 10	117,956	6378	12369	11813	3284	33844
Düğüm = 11	102,300	6991	13320	7657	6927	34895
Düğüm = 12	105,199	7312	14189	13231	2037	36769
Düğüm = 13	105,558	7733	14764	14149	2440	39086
Düğüm = 14	105,042	8355	15747	14900	2668	41670
Düğüm = 15	106,324	8695	16662	15587	3436	44380
Düğüm = 16	106,384	9575	17975	17019	2660	47229
Düğüm = 17	106,956	10022	19302	17867	3039	50230
Düğüm = 18	108,286	10582	20293	19226	3297	53398
Düğüm = 19	108,162	11356	21632	20419	2357	55764
Düğüm = 20	108,410	11863	22767	21196	2060	57886
Düğüm = 21	108,970	11941	22966	22100	2652	59659
Düğüm = 22	108,528	12144	23538	22492	2703	60877
Düğüm = 23	108,501	12355	23812	23007	2661	61835
Düğüm = 24	108,519	12574	24347	23302	2624	62847
Düğüm = 25	108,431	12821	24712	23752	2524	63809
Düğüm = 26	108,367	12953	24905	24095	2758	64711
Düğüm = 27	108,462	13106	25303	24571	2353	65333
Düğüm = 28	107,474	13257	25690	11876	1689	52512
Düğüm = 29	104,731	13196	12497	11868	1998	39559

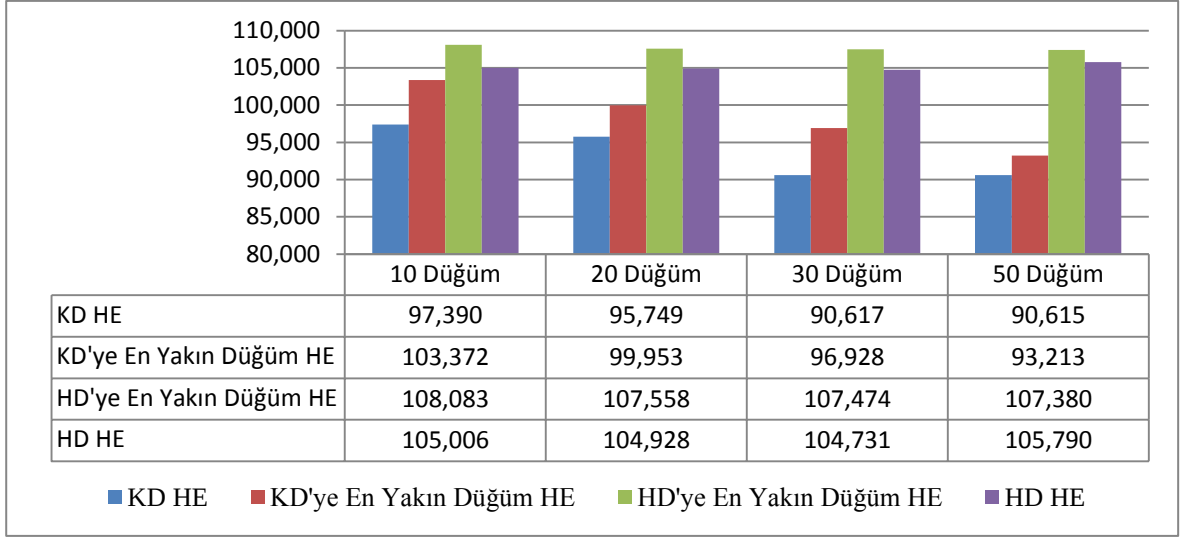
Tablo 7.7. 50 Sıçramalı yol için düğüm parametreleri

Düğüm	HE(J)	Tx	Rc	F1	F2	Toplam
Düğüm = 0	90,615	1512	1648	1613	353	5126
Düğüm = 1	93,213	1788	3299	1782	81	6950
Düğüm = 2	91,030	1826	3602	3266	42	8736
Düğüm = 3	92,538	1824	3586	3444	72	8926
Düğüm = 4	92,473	1786	3471	3334	246	8837
Düğüm = 5	92,429	1702	3385	3337	286	8710
Düğüm = 6	92,312	1699	3376	3343	148	8566
Düğüm = 7	92,323	1699	3353	3208	141	8401
Düğüm = 8	92,244	1680	3279	3181	160	8300
Düğüm = 9	92,227	1621	3200	3105	279	8205
Düğüm = 10	92,199	1601	3188	3121	186	8096
Düğüm = 11	92,143	1604	3178	1778	150	6710

Tablo 7.7. Devamı

Düğüm = 12	93,985	1590	1871	1777	148	5386
Düğüm = 13	104,654	294	1823	1765	213	4095
Düğüm = 14	89,798	297	580	624	5152	6653
Düğüm = 15	89,871	310	591	581	7882	9364
Düğüm = 16	95,534	4162	4455	4343	591	13551
Düğüm = 17	98,304	4301	8438	4476	862	18077
Düğüm = 18	101,147	4481	8747	8398	1109	22735
Düğüm = 19	100,058	4823	9215	8798	972	23808
Düğüm = 20	100,216	4968	9672	9090	975	24705
Düğüm = 21	101,616	5235	10050	9495	578	25358
Düğüm = 22	99,670	5198	10202	4639	5466	25505
Düğüm = 23	115,415	5134	9411	9057	2158	25760
Düğüm = 24	115,757	4970	9687	9284	2022	25963
Düğüm = 25	99,692	5223	10177	5232	5956	26588
Düğüm = 26	102,642	5438	10597	10151	1512	27698
Düğüm = 27	103,035	5823	11110	10744	1714	29391
Düğüm = 28	103,538	6244	11903	11231	1991	31369
Düğüm = 29	104,078	6663	12762	11918	2257	33600
Düğüm = 30	103,298	7201	13661	12786	2212	35860
Düğüm = 31	104,001	7669	14671	13558	1888	37786
Düğüm = 32	105,513	8083	15350	14218	1857	39508
Düğüm = 33	104,453	8170	15524	14658	2463	40815
Düğüm = 34	104,639	8385	15888	14869	2611	41753
Düğüm = 35	105,841	8508	16188	15112	2648	42456
Düğüm = 36	105,776	8607	16366	15473	2744	43190
Düğüm = 37	106,030	8786	16794	15854	2424	43858
Düğüm = 38	105,040	8904	17141	16363	2268	44676
Düğüm = 39	104,952	9053	17327	16708	2540	45628
Düğüm = 40	105,193	9326	17970	17181	2149	46626
Düğüm = 41	105,409	9559	18395	17763	2055	47772
Düğüm = 42	105,081	9784	18552	17836	2562	48734
Düğüm = 43	105,301	10050	19435	8584	12813	50882
Düğüm = 44	123,879	10015	19650	18460	5295	53420
Düğüm = 45	124,035	11474	20768	19274	4771	56287
Düğüm = 46	106,693	12097	23532	12039	11712	59380
Düğüm = 47	107,631	12651	24656	23781	2221	63309
Düğüm = 48	107,380	13143	25671	11824	1197	51835
Düğüm = 49	105,790	13944	12937	12054	803	39738

Tablo 7.4 - Tablo 7.7 arasında verilen duyarga düğüm parametrelerinin kolay anlaşılabilmesi için Şekil 7.3’de kaynak düğüm, kaynağa en yakın düğüm, hedef düğüm ve hedef düğüme en yakın düğüm için sıçrama sayılarına göre harcanan enerjiler verilmiştir.



Şekil 7.3. Sıçrama sayılarına göre duyargalarda harcanan enerji (joule)

Şekil 7.3’de görüldüğü gibi en fazla enerji tüketimi ara düğümlerde olmaktadır ki, bu düğümlerin enerjileri sınırlıdır. Doktora çalışmasında geliştirilen algoritmada duyarga başına işlemde düşük seviyede tutulmaya çalışılmıştır. Ayrıca hedefe yakın düğümlerde yol bilgisi için yük paylaşımının bu tez çalışmasında önerilmesinin önemi de ortaya çıkmaktadır.

7.4. Deneysel Ortam ile Benzetim Ortamının Karşılaştırılması

Bu bölümde doktora tez çalışmasında önerilen mimarinin deneysel ortamda testi gerçekleştirilecektir. Test için bölüm 7.3’de elde edilen sonuçlar ile bölüm 5.3.2’de ayrıntısı verilen deney düzeneğinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Deney düzeneği toplam 10 duyargadan oluşmaktadır. Laboratuvar ortamında elde edilen sonuçların gerçekçi olabilmesi için veri iletim fazından başlanmıştır. Her bir duyarga düğümün konfigürasyonuna veri alacağı ve veri ileteceği düğümler girilmiştir. Böylelikle yol tanımlamalarındaki sıçrama sayıları garanti altına alınmıştır. Deneysel ortam ve benzetim ortamının sonuçları farklı sıçrama sayılarına göre elde edilen başarımlar oranları Tablo 7.8’de gösterilmiştir.

Tablo 7.8. Karşılaştırma tablosu

Sıçrama Sayısı (SS)	Benzetim Başarı Oranı (%)	Deneysel Başarı Oranı (%)
2	0,99	0,98
5	0,94	0,92
8	0,83	0,82
10	0,72	0,70

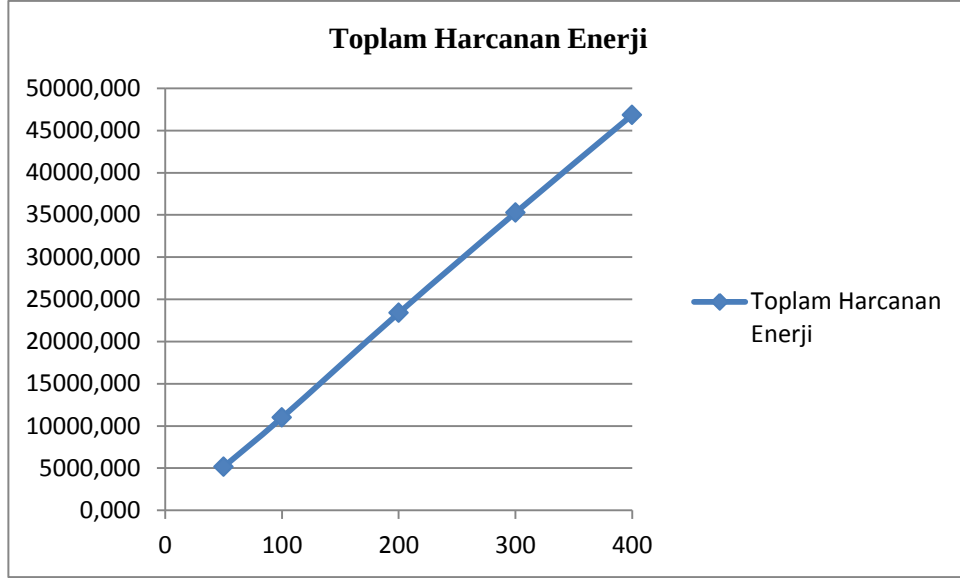
Tablo 7.8’den de görüldüğü gibi laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar ile Castalia benzetim ortamında elde edilen sonuçlar tutarlılık içindedir. Bu sonuç doktora tez çalışmasında geliştirilen mimari için benzetim ortamında elde edilen sonuçların gerçeğe yakın olduğunu ispatlamaktadır.

7.5. Duyarga Düğüm Sayısının Tasarlanan Enerji Farkındalıklı Mimari Üzerine Etkisi

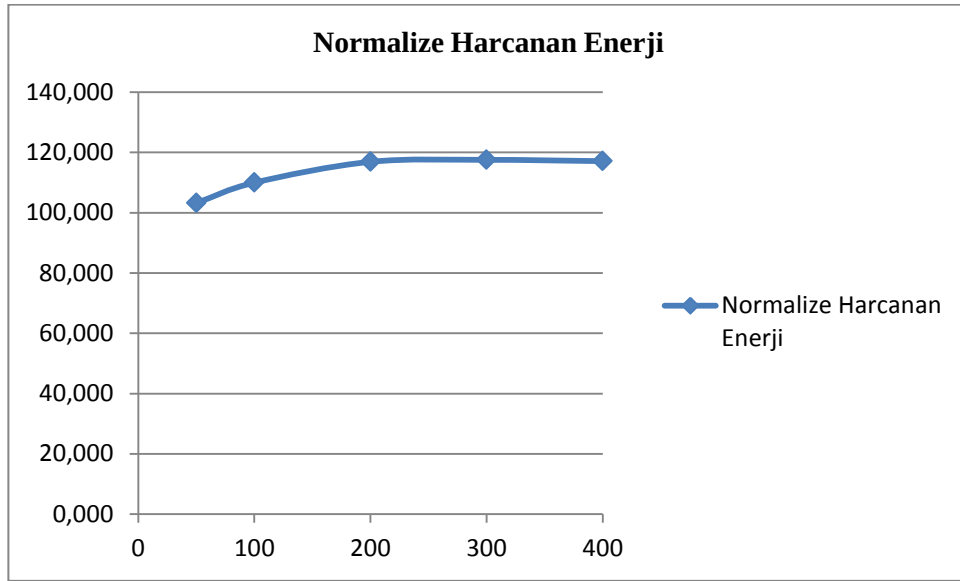
Bölüm 7.4’de benzetim ortamında elde edilen sonuçların laboratuvar ortamında oluşturulan fiziksel ortam ile örtüştüğü gösterilmişti. Bu bölümde elde edilen sonuçlar Castalia Benzetim ortamında bulunmuş sonuçlardır. Castalia benzetim ortamında simülasyon yapılırken veri gönderim sıklığı 800ms, benzetim süreside 10000ms, dağıtım yüzeyi 500m x 500m alınmıştır. Tablo 7.9’da rastgele olarak yukarıda tanımlanan yüzeye dağıtılmış olan değişik duyarga sayılarına göre elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 7.9 kullanılarak Şekil 7.4’de duyarga sayısına göre toplam enerjinin değişimi, Şekil 7.5’de de normalize harcanan enerji (düğüm başına harcanan enerji) nin değişimi değişik duyarga sayılarına göre gösterilmiştir.

Tablo 7.9. Değişik duyarga sayılarına göre sistem parametreleri

Toplam Düğüm Sayısı	Toplam Harcanan Enerji (J)	Normalize Harcanan Enerji (J)	Başarılı Paket	Toplam Paket	Başarı Oranı (%)
50	5161,026	103,221	11941	12479	0,96
100	10996,422	109,964	10965	12469	0,88
200	23376,194	116,881	11566	12478	0,93
300	35258,387	117,528	11534	12478	0,92
400	46842,824	117,107	11918	12478	0,96
500	65245,153	130,490	11355	12478	0,91



Şekil 7.4. Değişik duyarga sayılarına göre sistemde harcanan enerji (joule)



Şekil 7.5. Değişik duyarga sayılarına göre duyarga başına harcanan enerji (joule)

Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'den açıkça görüldüğü gibi tez çalışmasında geliştirilen mimari yapı minimum işlem içerdiğinden sistemdeki duyarga sayısından bağımsız olarak duyarga başına harcanan enerji hemen hemen sabit kalmaktadır.

Sonuç olarak çalışmada, telsiz duyarga ağlarda enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi içinde geliştirilen algoritma ve mekanizmaların başarısı benzetim ve laboratuvar ortamında test edilmiştir.

8. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu doktora çalışmasında enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi üzerinde durulmuştur. Çalışmada amaçlanan faydaların ışığında yönlendirme süreçlerinin tümünü kontrol edebilecek bir yönlendirme mimarisi önerilmiştir. Önerilen mimaride TDA'da KD ile HD arasındaki yolların keşfi için gerekli olan topoloji oluşturma fazı, bulunan yollar içinden ağ yaşam ömrü açısından en etkin yolun seçilmesi, seçilen yolun etkinliğini yitirdiği zaman yeni yol ile güncellenmesini sağlayan yol belirleme ve güncelleme fazı, KD ile HD arasındaki veri iletimini sağlayan veri iletim fazı ve tüm süreçlerin bir biri ile koordinasyonunu sağlayan ağ yönetim fazı mekanizmaları bulunmaktadır. Sistem içerisindeki her bir mekanizma enerji tüketimini azaltmak, başarılı paket başına enerjiyi makul seviyelerde tutmak ve ağ yaşam ömrünü uzatmak için birer görev üstlenmektedir.

Doktora tez çalışmasının asıl amacı olan telsiz duyurga ağlarda enerji farkındalıklı yönlendirme için tasarlanan mimari yapı bölüm 7'de hem benzetim hem de deneysel ortam için testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler ile geliştirilen mimari yapının başarımı için veri gönderim sıklığının harcanan enerjiye etkisi, yol üzerindeki sıçrama sayısının harcanan enerjiye etkisi, ağ içindeki duyurga düğüm sayısının harcanan enerjiye etkisinin nasıl olduğu sorularına cevap aranmıştır. Ayrıca geliştirilen mimari yapının hem benzetim hem de deneysel ortamdaki başarımı sorgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde mimari yapının hem benzetim hem de laboratuvar ortamı sonuçlarının birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür.

Uygulama bölümünde elde edilen sonuçlar, doktora tez çalışmasında geliştirilen enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisi için önerilen yapıda minimum enerji harcanımını garanti edecek mekanizmaların kullanılmasının gerekliliğini göstermiştir.

Bu doktora çalışmasında bir kaynak düğüm, bir hedef düğüm ve arada bulunan duyurga düğümler ile bir telsiz duyurga ağı oluşturulmuş ve oluşturulan TDA için önerilen enerji farkındalıklı yönlendirme mimari tasarımının başarımı ortaya konmuştur.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak gelecekte, önerilen enerji farkındalıklı yönlendirme mimarisinin geliştirilerek birden fazla kaynak ve birden fazla hedefin olduğu bir ağ topolojisi için uygulanabilir hale getirilmesi planlanmaktadır. Yine TDA yapısında kullanılan tüm duyurga düğümlerin aynı zamanda algılama yapması yani kaynak düğüm

gibi davranması sağlanarak ağ içindeki tüm düğümlerin hedef düğüme veri göndermesi durumu incelenerek önerilen yönlendirme mimarisi için enerji farkındalığı irdelenecektir.

Bu doktora çalışmasında bir TDA ağı için yönlendirme katmanında enerji farkındalığı yaratılmaya çalışılmıştır. TDA iletişim süreçlerinde özellikle uygulama ve ağ katmanlarında da ağ yaşam ömrünü etkin kullanmaya yönelik olarak çalışmanın geliştirilmesi ile önerilen mimari yapının tüm süreçleri kontrol eden bir protokole dönüştürülmesi tez çalışmasının ışığında gelecek çalışması olarak hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E.,** 2002. Wireless Sensor Networks: A Survey, *Computer Networks Elsevier*, **38**(4), 393-422,
- [2] **Akyildiz, I. F., Wang, X., and Wang, W.,** 2005. Wireless mesh networks: a survey., *Computer Networks*, 445-487.
- [3] **Dowla, F.,** 2004. *Handbook of RF and Wireless Technologies*, USA.
- [4] Genet, 2005. Telsiz Duyarga Agları, *Genetlab Ar-Ge Raporu*. İstanbul.
- [5] **Hernández, C. F. G.,** 2007. Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, **7** (3), 264-270,
- [6] **Soyinka, W.,** 2010. Wireless Network Administration A Beginner's Guide. The McGraw-Hill Companies, New York Chicago San Francisco.
- [7] **Yu, Y., Prasanna, V. K., and Krishnamachari, B.,** 2006. Information Processing and Routing in Wireless Sensor Networks, *World Scientific Publishing Co*.
- [8] **Marti, M.,** 2004. Shooter Localization in Urban Terrain, *IEEE Computer*, **37** (8), 60-61.
- [9] **Simon, G.,** 2004. Sensor network-based counter sniper system, *Proc. Sensys*.
- [10] **Winkler, M., Unknown, T. K. D., Hughes, K., and Barclay, G.,** 2008. Theoretical and Practical a~ects of military wireless sensor networks, *Telecommunications and Information Technology*, 3-45.
- [11] **Wang, Q., Hassanein, H., and Xu, K.,** 2004. Compact Wireless and Wired Sensing Systems: A Practical Perspective on Wireless Sensor Networks ,CRC Press.
- [12] http://www.ban.fraunhofer.de/index_e.html Body Area Network. 10.03.2010
- [13] http://www.imec.be/ovinter/static_research/human.shtml The IMEC Human++ project website. 02.01.2010
- [14] **Jovanov, E., Milenkovic, A., Otto, C., and de Groen, C. P.,** 2005. A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, **2**(6), 1-10.
- [15] <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/proj/codeblue/> Wireless Sensor of Medical Care (Harvard) Sensor Labs CodeBlue project. 29.03.2010
- [16] <http://www.intel.com/research/prohealth> Intel's Prohealth Project. 02.03.2010
- [17] http://cordis.europa.eu/fetch?action=d&caller=proj_ist&rcn=58081 IST Project Fact Sheet. 01.05.2010
- [18] **Shen, C., Srisathapornphat, C., and Jaikaeo, C.,** 2001. Sensor information networking architecture and applications, *IEEE Personal Communications*,

52–59.

- [19] **Feng, J., Koushanfar, F., and Potkonjak, M.,** 2005. Handbook of Sensor Networks Compact Wireless and Wired Sensing Systems, Sensor Network Architecture, CRC Press.
- [20] **Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H.,** 2000. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00)*.
- [21] **Arampatzis, T., Lygeros, J., and Manesis, S.,** 2005. A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks, *IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation*, Limasol, Cyprus, 719-724.
- [22] **Akkaya, K., and Younis, M.,** 2005. A Survey of Routing Protocols, *Elsevier Ad Hoc Network*, 3(3), 325-349.
- [23] **Al-Karaki, J. N., and Kamal, A. E.,** 2004. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey, *EEE Wireless Communication*, 11(6), 6-28.
- [24] **Chang, J. H., and Tassiulas, L.,** 2000. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks, *Advanced Telecommunications and Information Distribution Research Program (ATIRP2000)*, College Park, MD.
- [25] **Bandyopadhyay, S., and Coyle, E.,** 2003. An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks, *INFOCOM*, 3(23), 1713.
- [26] **Sundani, H., Li, H., Devabhaktuni, V. K., Alam, M., and Bhattacharya, P.,** 2010. Wireless Sensor Network Simulators A Survey and Comparisons, *International Journal Of Computer Networks (IJCN)*, 2(5), 249-265.
- [27] **Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D.,** 2008. Wireless sensor network survey, *Computer Networks*, 52, 2292-2230.
- [28] **Chen, B., Jamieson, K., Balakrishnan, H., and Morris, R.,** 2002. SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks, *Wireless Networks*, 8(5), 481-494.
- [29] **Akkaya, K., and Younis, M.,** 2003. An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks, *23rd IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks*, Rhode Island, USA, 710-715.
- [30] **Al-Karaki, J. N., Ul-Mustafa, R., and Kamal, A. E.,** 2004. Data Aggregation in Wireless Sensor Networks - Exact and Approximate Algorithms, *IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, Phoenix, Arizona, USA.
- [31] **Ilyas, M., and Mahgoub, I.,** 2004. Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems, FL Bocaraton,
- [32] **Sohrabi K., and Pottie, J.,** 2000. Protocols for self-organization of a wireless sensor network, *IEEE Personal Communications*, 7(5), 16-27.

- [33] **Shah, R. C., and Rabaey, J.,** 2002. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks, *IEEE WCNC*, Orlando.
- [34] **Schurgers, C., and Srivastava, M. B.,** 2001. Energy efficient routing in wireless sensor networks, *Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*,
- [35] **Raniwala, A., and Chiueh, T.,** 2005. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network, *IEEE INFOCOM* , Miami, 2223-2234.
- [36] **Kanthi, C. N., and Jain, B. N.,** 2007. Spanner based distributed channel assignment in wireless mesh networks, *IEEE International Conference on Communication Systems Software and Middleware*, Bangalore, India, 1-10.
- [37] **Köksal, S. A.,** 2007. 802.11 Kablosuz Yerel Alan Ağlarında Güvenlik Sorunu, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [38] **Öztürk, E.,** 2004. Wlan Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Networks) Teknolojisinin İncelenmesi , Mevcut Düzenlemelerin Değerlendirilmesi ve Ülkemize Yönelik Düzenleme Önerisi, *Uzmanlık Tezi*, Telekomünikasyon Kurumu, Ankara,
- [39] B. Telecom, 1978. A Standard Code for Radiopaging Report of the Post Office Code Standardization Advisory Group (POCSAG), *Technical Report*, New Zealand.
- [40] <http://www.openmobilealliance.org/Technical/wapindex.aspx> WAP Forum. 15.01.2010
- [41] <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/SIG> Bluetooth SIG 10.03.2010
- [42] http://www.broadcom.com/docs/WLAN/802_11n-WP100-R.pdf 802.11n : The Next-Generation Wireless LAN Technology. 12.02.2010
- [43] <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>. A. I. Standards. 01.03.2010
- [44] Odom, W., 2002. Cisco Networking Academy. CCNA 604-607 Sınavı Sertifikasyon Rehberi, Sistem Yayıncılık, İstanbul.
- [45] http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_Data_Association IrDA. 01.05.2010
- [46] Intermec Technologies Corporation, 1998. Guide to Wireless LAN Technologies.
- [47] **Brown, P. D., Moore, L. S., and York, C.,** 1991. Low Power Optical Transceiver for Portable Computing Device, *United States Patent*, No: 5075732 dated 24.11.1991.
- [48] <http://www.irda.org> Infrared Data Association. IRDA. 10.03.2011.
- [49] **Proakis, J. G.,** 1995. *Digital Communications*. McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering, New York.
- [50] **Glover, I. A., and Grant, P. M.,** 1998. *Digital Communications*,. Prentice Hall International Inc., England, 470,

- [51] **Klaus, F.**, 2010. RFID Handbook in Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication. Wiley.
- [52] <http://www.rfid.org> RFID - Radio Frequency Identification. 02.04.2010
- [53] http://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band HYPERLINK. 04.04.2010
- [54] **Prasad. R. and Munoz. L.**, 2003. WLANs and WPANs towards 4G Wireless, *Fundamentals of WLAN*, London, 133-134.
- [55] **Özdemir, M.**, 2003. Wireless LAN Technology & Security Update. *Cisco System Inc.*, 3.
- [56] **Çibuk, M.**, 2009. WIMAX/IEEE 802.16 Ağları Üzerinden Web Tabanlı Bio-Telemetry Uygulamaları için Protokol Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [57] <http://www.ieee802.org/15> IEEE 802.15 Çalışma Grubu Resmi Web Sitesi. 01.05.2010
- [58] **Xu, S., and Saadawi, T.**, 2001. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?, *IEEE Communications Magazine*, **39**,130-137.
- [59] **Milovanovic, A., Rao, K. R., and Bojkovic, Z. S.**, 2009. Wireless Multimedia Communications, CRC Press,
- [60] <http://www.palowireless.com/infotooth/tutorial.asp> Bluetooth Resource Center. 12.04.2010
- [61] <http://www.palowireless.com/homerf/homerf1.asp> HomeRF Overview and Market Positioning. 17.05.2010
- [62] http://searchnetworking.techtarget.com/sDefinition/0,,sid7_gci535092,00.html SearchNetworking.com. 11.03.2010
- [63] <http://www.homenethelp.com/web/explain/about-homerf-2.asp> Technology overview of HomeRF 2.0. 22.03.2010
- [64] **Yılmaz, E., ve Öztürk, E.**, 2007. Yeni Nesil Kablosuz İletişim Teknolojileri Karşılaştırmalı Analizi, *EMO III. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu*, Adana,
- [65] **Molisch, A. F., Foerster, J. R., and Pendergrass, M.**, 2003. Channel Models for Ultrawideband Personal Area Networks, *IEEE Wireless Communications*, **10**(6), 14-21.
- [66] <http://www.zigbee.org/About/FAQ/tabid/192/Default.aspx> ZigBee Alliance 24.03.2010
- [67] <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee> ZigBee. 01.05.2010
- [68] **Kinney, P.**, 2003. ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works, *Communications Design Conference*, 20.
- [69] **Le, K. T.**, 2005. ZigBee SoCs Provide Cost-effective Solutions, *White Paper*, 9.

- [70] **Craig, W. C.**, 2003. Zigbee: Wireless Control That Simply Works, *White Paper*, 7.
- [71] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Wimax> WiMax. 19.03.2010
- [72] http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11n IEEE 802.11n. 01.04.2010
- [73] <http://www.ieee802.org/11/> IEEE 802.11. IEEE 802.11 Çalışma Grubu 12.06.2010
- [74] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi> Wi-Fi. 05.06.2010
- [75] <http://www.etsi.org/website/technologies/hiperlan.aspx> HiperLAN ETSI. 27.03.2010
- [76] **Hoymann, C., Püttner, P., and Forkel, I.**, 2003. The HIPERMAN Standard - a Performance Analysis, *IST - Mobile & Wireless Communications Summit*, 827-831.
- [77] http://en.wikipedia.org/wiki/HiperMAN_HiperMAN. 06.06.2010
- [78] **Güngör, M., Tekin, M., ve Yılmaz, R.**, 2009. WiMAX: Diğer Genişbant Telsiz Erişim (GTE) Teknolojileri ile Karşılaştırılması, *Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Sektörel Araştırma ve Stratejiler Dairesi Başkanlığı*.
- [79] **Bahtiyar, Ş., Alagöz, F., ve Çağlayan, M. U.**, 2005. Dördüncü Nesil Kablosuz Ağlar Arasında Karşılıklı Kimlik Doğrulama Uyumluluğu İçin Yeni Bir Çözüm, *1. Ağ Ve Bilgi Güvenliği Ulusal Sempozyumu*, İstanbul, 1-6.
- [80] **Tran, M., Zaggoulos, G., and Nix, A.**, 2005. Mobile WiMAX: Performance Analysis and Comparison with Experimental Results, *IEEE WLAN Design Guide, Agilent Technologies*.
- [81] **Qu, F., Wang, F. Y., and Yang, L.**, 2011. Intelligent Transportation Spaces: Vehicles, Traffic, Communications, and Beyond - 802.11abgn Wireless Device Server Data Sheet. *IEEE Communications Magazine Redpine Signals*.
- [82] **Chong, C. Y.**, 2003. Sensor Networks: Evolution, Opportunities and Challenges, *Senior Proceedings of the IEEE*, 1247-1256.
- [83] **Garcia-Hernandez, C. F., Ibargüengoytia-Gonzalez, P. H., Garcia-Hernandez, J., and Perez-Diaz, J. A.**, 2007. Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 3(7), 264-273.
- [84] **Alaybeyoğlu, A., Dağdeviren, O., ve Kantarcı Kayhan, A.**, 2009. Telsiz Duyarga Ağlarında Hızlı Hareket Eden Hedefler için Küme Tabanlı Hedef İzleme Algoritması, *IEEE SIU*, 977-980.
- [85] **Tayşi, Z. C.**, 2006. Telsiz Algılayıcı Düğüm Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [86] **Ökdem, S., ve Karaboğa, D.**, 2007. Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Yönlendirme, *Akademik Bilişim ' 07*, Kütahya.
- [87] **Soytürk, M., ve Altılar, D. T.**, 2008. Telsiz, tasarsız ve duyarga ağlar için kaynak-başlatmalı coğrafi veri akış yöntemi, *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 7(5), 26-33.

- [88] **Bayrakdar, Y., Yıldırım, K. S., ve Kantarcı, A.,** 2009. Kablosuz Duyarga Ağlarında İki Temel Araştırma Alanı Saat Eşzamanlaması ve Topoloji Kontrolü, *Akademik Bilişim '09*, Şanlıurfa.
- [89] **Lee, S. H.,** 2009. Wireless Sensor Network Design For Tactical Military Applications: Remote Large-Scale Environments, *KAIST Daejeon*, South Korea.
- [90] **Yang, Y., Prasanna, V. K., and Krishnamachari, B.,** 2006. Information Processing and Routing in Wireless Sensor Networks, *World Scientific Publishing Conference*, USA.
- [91] **Klinger, B. A., Thompson, D. W. J.,** 1993. Designing for performance: A cognitive systems engineering approach to modifying an AWACS human computer interface, *Armstrong Laboratory Technical Report*.
- [92] **Banâtre, M., Marrón, P. J., Ollero, A., and Wolisz, A.,** 2008. Cooperating Embedded Systems and Wireless Sensor Networks, *ISTE Ltd*, USA.
- [93] **Boyacı, A.,** 2009. Kablosuz Algılayıcı Ağlar Üzerine Bir İnceleme, *Doktora Semineri*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [94] **Hande, A., Polk, T., Walker, W., and Bhatia, D.,** 2006. Self-Powered Wireless Sensor Networks for Remote Patient Monitoring in Hospitals, *Molecular Diversity Preservation International*, Switzerland, 6.
- [95] **Kahn, J. M., Katz, R. H., and Pister, K. S. J.,** 1999. Next century challenges: mobile networking for smart dust, *ACM MobiCom '99*, Washington, USA, 271-278.
- [96] **Polastre, J., Szewczyk, R., and Culler, D.,** 2005. Telos Enabling Ultra-Low Power Research, *IPSN '05 Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in Sensor Networks*, USA.
- [97] **O'Reilly, and Lynch, C.,** 2005. Processor choice for wireless sensor networks, *REALWSN'05: Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks*, 1-5.
- [98] **Kalia, M., Bansal, D., and Shorey, R.,** 1999. MAC Scheduling and SAR Policies for Bluetooth: A Master Driven TDD Pico-Cellular Wireless System, *6th IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MOMUC)*, San Diego, CA.
- [99] <http://www.sensor-networks.org/index.php?page=1115215223> WSN Research Group. Smart Parking Sensor Platform. 08.06.2010
- [100] http://www.libelium.com/smart_cities/ Libelium. Smart Cities Platform. 17.08.2010
- [101] <http://www.sensor-networks.org/index.php?page=1016616603> WSN Research Group. Argiculture Sensor Board. 12.06.2010
- [102] http://www.libelium.com/squidbee/index.php?title=Waspote_vs_SquidBee Waspote vs SquidBee. 14.06.2010
- [103] **Heinzelman, W., Kulik, J., and Balakrishnan, H.,** 1999. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks, *5th ACM/IEEE Mobicom Conference (MobiCom '99)*, Seattle, 174-185.

- [104] **Yıldırım, K. S., Kalaycı, T. E., and Uğur, A.,** 2008. Optimizing Coverage in a K-Covered and Connected Sensor Network Using Genetic Algorithms, *9th WSEAS International Conference on Evolutionary Computing*, Sofia, Bulgaria.
- [105] **Bhardwaj, M., and Chandrakasan, A.,** 2002. Bounding The Lifetime of Sensor Networks via Optimal Role Assignments, *IEEE*, New York,USA, 1587-1596.
- [106] **Küçük, G., and Başaran, C.,** 2006. Power-Aware Processors for Wireless Sensor Networks, *21st International Symposium on Computer Sciences*, İstanbul.
- [107] **Curren, D.,** 2005. A survey of simulation in sensor networks, NY: *University of Binghamton*.
- [108] **Rizvi, S. S., and Chung, T. S.,** 2009. PIYAS-Proceeding to Intelligent Service Oriented Memory Allocation for Flash Based Data Centric Sensor Devices in Wireless Sensor Networks, *Molecular Diversity Preservation International*, Switzerland.
- [109] **Estrin, D., Govidan, R., Heidemann, J., and Kumar, S.,** 1999. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks, *ACM Mobicom*, 263-270.
- [110] **Park, N., Kim, D., Doh, Y., Lee, S., and Kim, J.,** 2005. An Optimal and Lightweight Routing for Minimum Energy Consumption in Wireless Sensor Networks, *IEEE*.
- [111] <http://www.healthyaims.org/> Healthy Aims. 12.03.2010
- [112] **To, C. K.,** 2001. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad HOC Networks, *IEEE Communications Magazine*.
- [113] <http://www.national.com> National Semiconductor Corporation LMX3162 Single Chip Radio Transceiver. 01.03.2010
- [114] **Pottie, G. J., and Kaiser, W. J.,** 2000. Wireless integrated network sensors, *Communications of the ACM*, **43**(5), 551–558.
- [115] **Gallardo, J. R., Gonzalez, A., Villasenor-Gonzalez, L., and Sanchez, J.,** 2007. Multipath Routing Using Generalized Load Sharing For Wireless Sensor Networks, *7th IASTED Wireless and Optical Communications International Conferences (WOC)*, Montreal, 1-8.
- [116] **Hoblos, G., Staroswiecki, M., and Aitouche, A.,** 2000. Optimal design of fault tolerant sensor networks, *IEEE International Conference on Control Applications*, Anchorage, 467–472.
- [117] **Nadig, D., and Iyengar, S. S.,** 1993. A new architecture for distributed sensor integration, *IEEE Southeastcon '93*, Charlotte, NC.
- [118] **Bulusu, N., Estrin, D., Girod, L., and Heidemann, J.,** 2001. Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems, *International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA)*, Ambleside, UK.

- [119] **Pham, T., Eun, J. K., and Moh, M.,** 2004. On Data Aggregation Quality and Energy Efficiency of Wireless Sensor Network Protocols, *Broadband Networks*, 730-732.
- [120] **Bulusu, N., Heidemann, J., and Estrin, D.,** 2000. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, *Technical report*, Computer science department University of Southern California.
- [121] **Kulik, J., Heinzelman, W. R., and Balakrishnan, H.,** 2002. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks, *Wireless Networks*, **8**, 169-185.
- [122] **He, T.,** 2006. An Integrated Sensor Network System for Energy Efficient Surveillance, *ACM Transactions on Sensor Networks*.
- [123] **Gay, D., Levis, P., and Behren, R. V.,** 2003. The nesC language: a holistic approach to networked embedded systems, *PLDI*, San Diego, CA.
- [124] <http://www.nari.ee.ethz.ch/wireless/research/projects/ban.html> Noninvasive Wireless Body Area Networks. 12.04.2010
- [125] <http://www.doc.ic.ac.uk/vip/ubimon/home/index.html> UbiMon. 14.03.2010
- [126] <http://web.sakarya.edu.tr/~muratc/index-10.html> Çakıroğlu, M. Kişisel Web Sayfası. 15.03.2010
- [127] **Shih, E.,** 2001. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, *ACM MobiCom '01*, Rome, Italy, 272-286.
- [128] **Liu, J.** 2001. Simulation modeling of large-scale ad-hoc sensor networks, *European Simulation Interoperability Workshop*, London, England.
- [129] **Tekin, U.,** 2006. Kablosuz Duyarga Ağlarda Etkili Yönlendirme ve Enerji Problemleri, *Yüksek Lisans Semineri*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.
- [130] **Intanagonwiwat, C., Govindan, R., and Estrin, D.,** 2000. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks, *ACM MobiCom '00*, Boston, 56-67.
- [131] **Braginsky D., and Estrin, D.,** 2002. Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks, *First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta.
- [132] **Chu, M., Haussecker, H., and Zhao, F.,** 2002. Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks, *The International Journal of High Performance Computing Applications*, **16**(3).
- [133] **Ye, F., Chen, A., Liu, S., and Zhang, L.,** 2001. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks, *International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 304-309.
- [134] **Yao, Y., and Gehrke, J.,** 2002. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, *SIGMOD Record*.

- [135] **Sadagopan, N.**, 2003. The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks, *First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications*, Alaska.
- [136] **Servetto, S., and Barrenechea, G.**, 2002. Constrained Random Walks on Random Graphs: Routing Algorithms for Large Scale Wireless Sensor Networks, *1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Atlanta, Georgia, USA.
- [137] **Lindsey, S., and Raghavendra, C.**, 2002. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems, *IEEE Aerospace Conference*, 3(16), 1125-1130.
- [138] **Rodoplu, V., and Meng, T. H.**, 1999. Minimum Energy Mobile Wireless Networks, *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 17(8), 1333-1344.
- [139] **Manjeshwar, A., and Agarwal, D. P.**, 2001. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks, *In 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*.
- [140] **Manjeshwar, A., and Agarwal, D. P.**, 2002. APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks, *International Parallel and Distributed Processing Symposium IPDPS*, 195-202.
- [141] **Savvides, A., Han, C. C., and Srivastava, M.**, 2001. Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors, *Seventh ACM Annual International Conference on Mobile Computing ve Networking (MobiCom)*, 166-179.
- [142] **Xu, Y., Heidemann, J., and Estrin, D.**, 2001. Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing, *Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing ve Networking*, 70-84.
- [143] **Yılmaz, M.**, 2007. Duty cycle control in wireless sensor Networks, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTU Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [144] **Yu, Y., Estrin, D., and Govindan, R.**, 2001. Geographical ve Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks, *Technical Report, UCLA / CSD-TR-01-0023*. UCLA Computer Science Department.
- [145] **Stojmenovic, I., and Lin, X.**, 1999. GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks, *In International Conference on Parallel ve Distributed Computing ve Systems*, Boston, MA, USA.
- [146] **Kuhn, F., Wattenhofer, R., and Zollinger, A.**, 2003. Worst-Case optimal ve average-case efficient geometric ad-hoc routing, *4th ACM International Conference on Mobile Computing ve Networking*, 267-278.
- [147] **Braginsky, D., and Estrin, D.**, 2001. Rumor Routing Algorithm For Sensor Networks, *International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'01)*.

- [148] **Dulman, S., Nieberg, T., Wu, J., and Havinga, P.,** 2003. Trade-Off between Traffic Overhead and Reliability in Multipath Routing for Wireless Sensor Networks, *WCNC Workshop*, New Orleans, Louisiana, USA.
- [149] **He, T.,** 2003. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks, *In the Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems*.
- [150] **Wang, Q., Zhu, Y., and Cheng, L.,** 2006. Reprogramming wireless sensor networks: challenges and approaches, *Network IEEE*, **20**(3), 48-55.
- [151] **Mekni, M., and Moulin, B.,** 2008. A survey on sensor webs simulation tools, *Second International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 574-579.
- [152] <http://castalia.npc.nicta.com.au/> Castalia Home, 19.03.2011
- [153] <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/> GloMoSim, 24.03.2011
- [154] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> , NS-2, 15.03.2011
- [155] <http://www.nsnam.org/> NS-3, 17.03.2011
- [156] **Levis, P., Lee, N., Welsch, M., and Culler, D.,** 2003. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications., *1st ACM Int. Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, Los Angeles, CA, 126-137.
- [157] http://www.irs.uji.es/uwsim/wiki/index.php?title=Main_Page UWSim, 14.03.2011
- [158] <http://compilers.cs.ucla.edu/avrrora/> The AVR Simulation and Analysis Framework, Avrora, 13.04.2011
- [159] **Sundresh, S., Kim, W., and Agha, G.,** 2004. Environment and Network Simulator, *37th ACM Annual Symposium on Simulation*, Washington, DC, 221.
- [160] <http://www.sics.se/~fros/cooja.php> Networked Embedded Systems Cooja, 26.03.2011
- [161] https://www.itm.uni-luebeck.de/ShawnWiki/index.php/Shawn_Introduction Shawn Introduction, 23.05.2011
- [162] **Girod, L.,** 2004. EmStar: A software Environment for Developing and Deploying Wireless Sensor Networks, *USENIX 2004*, Boston, MA, 283-296.
- [163] <http://www.j-sim.org> J-Sim, 01.05.2011
- [164] **Park, S., Savvides, A., and Srivastava, M. B.,** 2000. SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks, *Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, Boston, MA, 104-111.
- [165] <http://ptolemy.berkeley.edu/visualsense/> Ptolemy Project - UC Berkeley EECS Dept, 03.05.2011
- [166] <http://www.isis.vanderbilt.edu/projects/nest/prowler> Prowler Probabilistic Wireless Sensor Simulator, 14.05.2011

- [167] <http://www.omnetpp.org/> OMNeT++ Network Simulation Framework. 12.11.2010
- [168] **Bergamini, L., Crociani, C., and Vitaletti, A.,** 2009. Simulation vs Real Testbeds: A Validation of WSN Simulators, *Technical Report 3*, Sapienza Università di Roma.
- [169] **Boulis, A.,** 2007. Castalia: Revealing Pitfalls in Designing Distributed Algorithms in WSN, *5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, Sydney, Australia, 407-408.
- [170] **Pham, H. N., Pediaditakis, D., and Boulis A.,** 2007. From Simulation to Real Deployments in WSN and Back, *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Helsinki, Finland, 1-6.
- [171] <http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia%20-%20User%20Manual.pdf>
Castalia a simulator for wireless sensor networks and body area networks. 01.11.2010
- [172] <http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia%20-%20User%20Manual.pdf> Castalia User Manuel. 01.11.2010
- [173] **Li, S., Ma, X., Wang, X., and Tan, M.,** 2011. Energy-efficient multipath routing in wireless sensor network considering wireless interference, *Journal of Control Theory Application*, **9**(1), 127-132,.

ÖZGEÇMİŞ



Y k. M h. Aytuğ BOYACI

Fırat Üniversitesi Enformatik Bölümü, 23119, Elazığ / Türkiye

Ki isel Bilgiler

Doğum Tarihi - Yeri	23/05/1978 – GEBZE / KOCAELİ
Gsm	0 (532) 492 49 40
e-posta	aytugboyaci@firat.edu.tr, aytugboyaci@gmail.com
Web	www.aytugboyaci.com

Eğitim Bilgileri

Yüksek Lisans Eğitimi	Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği A.B.D., Elazığ, 2005-2008
Lisans Eğitimi	Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Elazığ, 1999-2003
�n Lisans Eğitimi	İstanbul Üniversitesi TBMYO, Endüstriyel Elektronik Bölümü, İstanbul, 1996-1999
Lise Eğitimi	Tuzla Endüstri Meslek Lisesi, Elektronik Bölümü, İstanbul, 1992-1995

İ  Deneyimleri

2002-2004	Fırat Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Yazılım ve Ar-Ge Departmanı
2004-Halen	Fırat Üniversitesi Enformatik Bölümü, Elazığ, Okutman