



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ENERJİ  
KORUNUMLU İLETİŞİM TEKNİKLERİ**

**Bilg.Yük.Müh. Taner ÇEVİK  
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı  
Bilgisayar Mühendisliği Programı**

**Danışman  
Prof.Dr. A.Halim Zaim**

**Mayıs, 2012**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 14/05/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Bilgisayar Mühendisliği programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Prof. Dr. A. Halim Zaim (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi



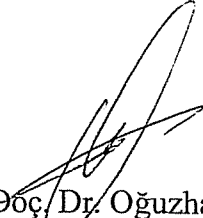
Prof. Dr. Ahmet Sertbaş  
İstanbul Üniversitesi



Prof. Dr. Selim Akyokuş  
Doğuş Üniversitesi



Prof. Dr. Sadık Kara  
Fatih Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan Öztaş  
İstanbul Üniversitesi

## ÖNSÖZ

Her şeyden önce, bu günlere kadar gelmemi sağlayan, okumam için her türlü fedakarlığa katlanan annem, babam ve ağabeyime sonsuz minnetlerimi sunuyorum. Ayrıca, kendisi de halen bir doktora öğrencisi ve de aynı zamanda hayatımızın güneşi kızımız Bahar 'ın annesi, eşim Nazife 'ye de çok teşekkür ederim. Kendisinin de en kısa zamanda bu satırları yazma aşamasına gelmesini temenni ediyorum.

Beni danışmanlığına kabul eden ve hem ders hem de tez aşamasında her türlü kolaylığı sağlayıp önümü açan Prof. Dr. Abdül Halim Zaim 'e sonsuz şükranlarımı sunuyorum. Yardımlarını esirgemeyen tezimin izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Selim Akyokuş ve özellikle de Prof. Dr. Ahmet Sertbaş 'a da teşekkürü borç bilirim. Değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Sadık Kara ve Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan Öztaş 'a da ayrıca teşekkür ederim.

Daha aklıma gelmeyen, burada ismini belirtmediğim, katkısı olan ve de emeği geçen herkese sonsuz saygı ve sevgilerimi iletiyorum.

**Mayıs, 2012**

**Taner ÇEVİK**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR.....	viii
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xiii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>12</b>
2.1. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR.....	12
2.2. TASARSIZ AĞLAR.....	13
2.2.1. Tasarsız Ağların Özellikleri.....	14
2.2.2. Tasarsız Ağların Avantajları.....	16
2.3. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN DİĞER KABLOSUZ AĞ YAPILARINDAN FARKLILIKLARI .....	17
2.4. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ENERJİ SARFIYATINI ENGELLEME AMAÇLI UYGULANAN YÖNTEMLER.....	18
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>23</b>
3.1. ENERJİ KORUNUMUNDA HİZMET ÇEVİRİMİ İLE İLGİLİ TEKNİKLER.....	23
3.1.1. Topoloji Kontrol (Topology Control) Protokolleri.....	24
3.1.1.1 Konuma Dayalı (Location Driven) Protokoller.....	24
3.1.1.2 Bağlanırlığa Dayalı (Connection Driven) Protokoller.....	26
3.1.2. Güç Yönetimi Protokolleri.....	27
3.2. ÖNERİLEN İŞ HATTI TEKNİĞİ İLE GELİŞTİRİLMİŞ UYKU-UYANMA PROTOKOLÜ (STEM WITH PIPELINING).....	28
3.3. ENERJİ KORUNUMUNDA YÖNLENDİRME KATMANI İLE İLGİLİ TEKNİKLER.....	32

3.3.1. Önerilen Çoklu Veri Toplama Merkezli Yük Dengeli Enerji Verimli Yönlendirme Algoritması (LEERA-MS: Load Balanced Energy Efficient Routing Algorithm with Multiple Sinks) .....	33
3.3.2. Enerji Eşik Seviyeli Yük Dengeli Enerji Verimli Yönlendirme Algoritması (LEERA-TH: Load Balanced Energy Efficient Routing Algorithm with Energy Level Threshold).....	38
3.4. KÜMESEL YAPILI KABLOSUZ AĞLARDA ENERJİ KORUNUMU İLE İLGİLİ TEKNİKLER.....	38
3.4.1. Önerilen Çok Kanallı Kümesel Yapılı Kablosuz Algılayıcı Ağ Yapısında Enerji Korunumlu Jeton Tabanlı Yönlendirme .....	40
3.4.1.1. Küme İçi İletişim .....	41
3.4.1.2. Jeton Tabanlı Maliyet Hesaplamalı Yön Bulma Algoritması.....	42
3.4.1.3. Kümeler Arası İletişim.....	45
3.4.1.4. Harcanan Enerji Miktarlarının Veri Toplama Merkezleri Tarafından Yayınlanması.....	47
3.5. ÇOKLU ORTAM KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR .....	48
3.5.1. ÇOKLU ORTAM KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	49
3.5.2. Önerilen Çok Kanallı Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Katmanlar Arası Etkileşimli Mimari Yapısı.....	53
3.5.2.1. Zaman Planı Uygulayıcısı ve Sınıflandırıcı(Scheduler & Classifier)..	53
3.5.2.2. Uyarlanabilir Alt-Akış Oluşum Mekanizması.. .....	55
3.5.2.3. Çok Kanallı Yapı .....	56
3.5.2.4. Güzargah Tespiti ve Kaynak Rezervasyonu .....	57
3.5.2.5. Talep Edilen Servis Kalitesini Gözeten Yük Dengeli Yön Bulma Algoritması .....	58
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>65</b>
4.1. İŞ HATTI EKLENEREK GELİŞTİRİLMİŞ STEM YAPISI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR.....	65
4.2. ÇOKLU VERİ TOPLAMA MERKEZLİ YÜK DENGELİ ENERJİ VERİMLİ YÖNLENDİRME ALGORİTMASI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR.....	69
4.3. ÇOK KANALLI KÜMESEL YAPILI KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ YAPISINDA ENERJİ KORUNUMLU JETON TABANLI YÖNLENDİRME ALGORİTMASI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR .....	72

4.4. ÇOK KANALLI ÇOKLU ORTAM KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KATMANLAR ARASI ETKİLEŞİMLİ MİMARİ YAPISI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR.....	77
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>94</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Orman yangınlarını önlemek için kurulmuş örnek bir uygulama .....	3
Şekil 1.2: Bölge güvenliğini sağlamak üzere kurulmuş bir uygulama .....	3
Şekil 1.3: Kablosuz Algılayıcı Ağ kullanılarak hastaya ait verilerin doktora veya sağlık yetkililerine bildirilmesi .....	3
Şekil 1.4: Arı üzerine yerleştirilmiş bir kablosuz algılayıcı düğüm .....	4
Şekil 1.5: Madeni para ebatlarında bir kablosuz algılayıcı düğüm .....	4
Şekil 1.6: Kablosuz algılayıcı düğümün iç yapısı .....	4
Şekil 1.7: İnsanın girmesinin tehlikeli olabileceği bir coğrafi ortamda KAA kullanımı.....	7
Şekil 2.1: Hücresel ağlar ile tasarsız ağların yapısal gösterimi .....	14
Şekil 2.2: Sel altında kalan bir şehirden bir görüntü .....	16
Şekil 2.3: Savaş alanındaki araçların tasarsız ağlar vasıtasıyla birbiriyle haberleşmesi.....	16
Şekil 2.4: Enerji korunum tekniklerinin sınıflandırılması .....	19
Şekil 2.5: Hidden Terminal problemi .....	21
Şekil 3.1: GAF çalışmasında ağ yapısının gridlere bölümü .....	25
Şekil 3.2: Veri ve kontrol sinyal iletim kanalları .....	28
Şekil 3.3: STEM yapısında alım ve iletim zamanlamaları .....	29
Şekil 3.4: P-STEM yapısında alım ve iletim zamanlamaları .....	31
Şekil 3.5: En kısa yol örneği .....	33
Şekil 3.6: LEERA ile örnek uygulama .....	36
Şekil 3.7: LEERA-MS ile örnek uygulama .....	37
Şekil 3.8: Küme İçi Paket Yapısı .....	41
Şekil 3.9: exp değerine bağlı olarak enerji sarfiyatındaki değişim miktarı .....	43
Şekil 3.10: Çok katmanlı, kümesel yapıli bir topoloji örneği.....	44
Şekil 3.11: Jeton Yapısı .....	45
Şekil 3.12: Birinci kuşaktaki bir kümede oluşturulan kümeler arası iletişim paket yapısı.....	46

Şekil 3.13: İkincü kuşaktaki bir kümede oluşturulan kümeler arası iletişim paket yapısı.....	46
Şekil 3.14: Üçüncü kuşaktaki bir kümede oluşturulan kümeler arası iletişim paket yapısı.....	46
Şekil 3.15: Bilgilendirme mesaj yapısı .....	47
Şekil 3.16: Düğümlerde bulunan sınıflandırıcı ve zaman planı uygulayıcıları .....	54
Şekil 3.17: Örnek senaryo .....	56
Şekil 3.18: Alt-akış oluşumu .....	56
Şekil 3.19: Toplam bant genişliğinin N adet alt kanala bölümü .....	57
Şekil 3.20: LEERA-MS yönteminde paket iletimi .....	59
Şekil 3.21: Senaryo 1- Gerçek zamanlı paket iletimi .....	60
Şekil 3.22: Güzargah tespit ve kaynak rezervasyon talep mesajı .....	60
Şekil 3.23: Yayımlanan güzargah tespit ve kaynak rezervasyon talep raporu .....	61
Şekil 3.24: Yönlendirme tablosundaki kayıtların yapısı .....	62
Şekil 3.25: Gerçek zamanlı paket yapısı .....	62
Şekil 3.26: Senaryo 2: Gerçek zamanlı paket iletimi .....	63
Şekil 3.27: NACK mesaj yapısı .....	64
Şekil 4.1: NN metodu ile paket iletimi .....	66
Şekil 4.2: FN metodu ile paket iletimi .....	67
Şekil 4.3: CAN metodu ile paket iletimi .....	67
Şekil 4.4: CTTS metodu ile paket iletimi .....	68
Şekil 4.5: STEM ve P-STEM yapılarının gecikme yönünden mukayesesi .....	68
Şekil 4.6: Toplam harcanan enerji miktarlarının karşılaştırılması .....	70
Şekil 4.7: Paket iletim sürelerinin karşılaştırılması .....	70
Şekil 4.8: En fazla enerji sarfiyatı yapan düğümün harcadığı enerji miktarı .....	71
Şekil 4.9: Ağ ömrünün karşılaştırılması .....	72
Şekil 4.10: Ağ üzerinde enerjisi tükenmemiş düğüm sayısı .....	74
Şekil 4.11: En fazla enerji sarfiyatı yapan düğümün harcadığı enerji miktarı .....	74
Şekil 4.12: Ağ üzerindeki düğümler tarafından harcanan toplam enerji miktarı .....	75
Şekil 4.13: Ağ ömrü .....	75
Şekil 4.14: Enerjisi tükenmemiş düğüm sayısı .....	76
Şekil 4.15: Ağ ömrü .....	76
Şekil 4.16: Metotların enerji sarfiyatı yönünden mukayeseleri .....	78



Şekil 4.17: Metotların ağ ömrünün süresi yönünden mukayeseleri .....	79
Şekil 4.18: Kanal sayısının enerji sarfiyatına etkisi .....	79
Şekil 4.19: Talep edilen servis kalitesinin enerji sarfiyatına etkisi .....	80
Şekil 4.20: Talep edilen servis kalitesinin birim saniyede iletilen veri miktarına etkisi.....	80

## TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1: Simülasyonda kullanılan parametrelerin değerleri .....	66
Tablo 4.2: Harcanan toplam enerji miktarları ve dolaşan düğüm sayısı .....	69
Tablo 4.3: Simülasyon parametreleri .....	73
Tablo 4.4: Simülasyon parametreleri .....	77

## SEMBOL LİSTESİ

<b>KAA</b>	: Kablosuz Algılayıcı Ağlar
<b>TDMA</b>	: Time Divison Multiple Access (Zaman Paylaşımli Çoklu Ortam Erişimi)
<b>CDMA</b>	: Code Division Multiple Access (Kod Paylaşımli Çoklu Ortam Erişimi)
<b>FDMA</b>	: Frequency Division Multiple Access (Frekans Paylaşımli Çoklu Ortam Erişimi)
<b>CSMA/CA</b>	: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Çarpışma Sakınmalı Taşıyıcı Hissederek Çoklu Erişim)
<b>RTS</b>	: Request to Send (Gönderme İstem Kodu)
<b>CTS</b>	: Clear to Send (Gönderme İzin Kodu)
<b>MACA</b>	: Multiple Access with Collision Avoidance (Çarpışma Sakınmalı Çoklu Erişim)
<b>MACAW</b>	: A Media Access Protocol for Wireless LAN's (Kablosuz Yerel Ağlar İçin İletim Hattı Erişim Protokolü)
<b>LAN</b>	: Local Area Network (Yerel Ağ)
<b>GPS</b>	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
<b>GAF</b>	: Geographical Adaptive Fidelity
<b>GERAF</b>	: Geographic Random Forwarding (Coğrafi Rastgele İletim)
<b>ASCENT</b>	: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies (Adapte Olabilen Kendiliğinden Ayarlanabilen Ağ Topolojileri)
<b>STEM</b>	: Sparse Topology and Energy Management (Seyrek Topoloji ve Enerji Yönetimi)
<b>ACK</b>	: Acknowledgement (Alındı Onayı)
<b>P-STEM</b>	: Pipelined STEM (İş-hatlı STEM)
<b>RFID</b>	: Radio Frequency Indetification (Radyo Frekansını Tanıma)
<b>RTWAC</b>	: Radio Trigger Wake-up with Addressing Capabilities (Adresleme Kapasiteli Radyo Tetiklemeli Uyanma)

- GPSR** : Greedy Perimeter Stateless Routing
- LEERA -MS** : Load Balanced Energy Efficient Routing Algorithm with Multiple Sinks (Yük Dengeli Enerji Verimli Çoklu Veri Toplama Merkezli Yönlendirme Algoritması )
- LEERA –MS-TH** : Load Balanced Energy Efficient Routing Algorithm with Energy Level Threshold (Yük Dengeli Enerji Verimli Çoklu Veri Toplama Merkezli Eşik Enerji Seviyeli Yönlendirme Algoritması)
- LEACH** : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (Düşük Enerjili Adapte Olabilen Kümeleme Hiyerarşisi)
- PEGASIS** : Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (Algılayıcı Bilgi Sistemlerinde Güç Verimli Toplama)
- HEED** : Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering (Hibrid Enerji Verimli Dağıtık Kümeleme)
- AMRP** : Average Minimum Reachability Power (Ortalama Minimum Erişilebilirlik Gücü)
- FM** : Frequency Multiplexing (Frekans Çoğullama)
- EETBR** : Energy Efficient Token Based Routing (Enerji Verimli Jeton Tabanlı Yönlendirme)
- LBRF** : Load Balanced Reliable Forwarding (Yük Dengeli Güvenilir Yönlendirme)
- DLBS** : Directional Load Balanced Spreading (Yönlü Yük Dengeli Serpme)
- DGR** : Directional Geographic Routing (Yönlü Coğrafi Yönlendirme)
- SPEED** : A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks (Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Gerçek Zamanlı İletişim İçin Durumsuz Protokol)
- MMSPEED** : Multipath Multi\_SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks (Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Servis Kalitesi Garantili Çok Güzargahlı Çoklu SPEED Protokolü)
- M RTP** : A Multiflow Real-Time Transport Protocol for Ad Hoc Networks (Tasarsız Ağlar İçin Çoklu Akışlı Gerçek Zamanlı Ulaşım Protokolü)

<b>MRTCP</b>	: Multiflow real-time transport control protocol (Çoklu Akışlı Gerçek Zamanlı Ulaşım Kontrol Protokolü)
<b>AGEM</b>	: Adaptive Greedy-Compass Energy-Aware Multipath Routing Protocol for WMSNs (Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Adapte Olabilen En Kısa Yol Hedefli Çok Güzargahlı Yönlendirme Protokolü)
<b>AODV</b>	: Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing (Tasarsız Talep Esaslı Uzaklık Vektörü Yönlendirmesi)
<b>QoS</b>	: Quality of Service (Servis Kalitesi)
<b>QS-LEERA-MS</b>	: Quality of Service Considering Load Balanced Energy Efficient Routing Algorithm with Multiple Sinks (Servis Kalitesi Gözetimli Yük Dengeli Enerji Verimli Çoklu Veri Toplama Merkezli Yönlendirme Algoritması )
<b>NACK</b>	: Nacknowledgement (Veri İletimi Hatalı Mesajı)
<b>NN</b>	: Nearest Neighbor (En Yakın Komşu)
<b>FN</b>	: Furthest Neighbor (En Uzak Komşu)
<b>CAN</b>	: Closest Angled Neighbor (En Yakın Açığı Yapan Komşu)
<b>CTTS</b>	: Closest To The Sink (Veri Toplama Merkezine En Yakın Düğüm)

## ÖZET

### KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ENERJİ KORUNUMLU İLETİŞİM TEKNİKLERİ

Kablosuz Algılayıcı Ağlar, insanoğlunun hayatında günden güne daha fazla yer almaya başladı. Sağlık, askeri, ulaşım, endüstri, tarım ve benzeri birçok alanda insan gücünün yerine kablosuz algılayıcı ağ teknolojisi kullanılarak maliyet, zaman, insan sağlığının korunması gibi konularda tartışılmayacak derecede önemli kazançlar elde edilmiştir. Kablosuz algılayıcı ağların hayatımızda bu kadar çok yer edinmesinin sebebi, teknolojiye gelişmelerdir. Özellikle, elektronikte meydana gelen gelişmeler sayesinde, kablosuz algılayıcı ağların temel yapısını oluşturan algılayıcı düğümler, daha küçük ebatlarda ve maliyetlerde olmakla birlikte, çok daha üstün kabiliyetlerle donatılmış bir şekilde üretilebilme olanağına kavuşulmuştur. Algılayıcı düğümlerin, çok küçük ebatlarda üretilebilmesi, uygulama alanlarını da o derecede genişletmiştir. Ancak, küçük ebatlı olmanın getirdiği çok önemli dezavantajlar da vardır. Bunlardan en önemlisi, kısıtlı enerji kaynağına sahip olma problemidir. Küçük ebatlarda üretilen bu cihazların kısa süreli de ömürleri vardır. Kullanıldıkları alanlar itibarıyla de, yeri geldiğinde insanoğlunun girip de, enerjisi tükenen algılayıcı düğümü değiştirmesinin mümkün olmadığı uygulamalar olabilir. Böyle durumlarda, enerjisi tükenen bir düğüm görev yapamayacaktır. Dolayısıyla da, sorumlu olduğu bölge ile ilgili gerekli verilerden mahrum kalacaktır. Bunun yanında, çok sekmeli iletişim kullanıldığı varsayıldığında, veri toplama merkezine iletilmek üzere başka düğümler tarafından kendisine iletilen verilerin iletilme işleminde de görev alamayacaktır. Böylece, yeri geldiğinde iletişimin aksamasına, dolayısıyla da başka düğümlerin de görevlerini yapamamasına sebep olacaktır.

İşte bu sebeple, kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, enerjinin mümkün olduğunca dikkatli sarf edilmesidir. Bunun için, kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarında kullanılan yazılım ve donanım birimleri tasarlanırken, mümkün olan en az enerji sarf edecek ürünler hedeflenmelidir. Bilim adamları da kablosuz algılayıcı ağlar ile ilgili yeni teknikler, yöntemler geliştirerek, kablosuz algılayıcı ağların ömrünü mümkün olduğunca uzatabilme konusunda çaba harcamaktadırlar.

Kablosuz algılayıcı ağlarda, enerji sarfiyatında en büyük pay sahibi olan birimlerden birisi, hatta en önemlisi haberleşme alt birimidir. Bu birim, kablosuz algılayıcı düğümün diğer alt birimlerinin harcadığı enerji miktarından çok daha fazlasını tek başına tüketmektedir. Bu sebeple, bu tezde kablosuz algılayıcı ağların en önemli problemi olan enerji korunumu problemi üzerine yoğunlaşarak, algılayıcı düğümün en fazla enerji tüketen alt birimi, haberleşme ünitesiyle ilgili daha verimli teknikler geliştirmek üzerine çalıştık.

Teknolojideki gelişmeler, kablosuz algılayıcı ağların kullanıldığı uygulama alanlarıyla birlikte kablosuz algılayıcı ağların temel elemanı olan algılayıcı düğümlerin kabiliyet ve kapasitelerini de geliştirmiştir. Sıcaklık, nem, basınç gibi sayısal fiziksel değerleri ortamdaki ortamdan elde edilip bu metinsel veriyi merkeze ileten düğümler yerine, günümüzde, çoklu-ortam (multimedya) verilerini de ortamdaki ortamdan elde edilmesini sağlayacak kamera ve mikrofon gibi cihazlara sahip algılayıcı düğümler geliştirilmiştir. Bu yeni nesil düğümler, eskisine göre daha fazla depolama alanı ve işlem gücü gerektiren görsel verilerin işlenmesine, depolanmasına ve iletilmesine uygun mekanizmalar ile donatılmışlardır. Geleneksel kablosuz algılayıcı düğümlerdeki en önemli ilgi alanı, enerji sarfiyatının mümkün olduğunca aşağıya çekilmesiydi. Ancak, bu yeni nesil kablosuz algılayıcı ağlardaki bir diğer önemli konu ise gerçek zamanlı iletilmesi gereken görsel verilerin, belirli bir servis kalitesi sağlanarak veri toplama merkezine ulaştırılabilmesidir. Biz de bu ihtiyaca binaen, tezimizin son aşamasında, yeni nesil çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar adı verilen yapılar için katmanlar arası (cross-layer) işbirliği kullanarak, çok kanallı bir kablosuz algılayıcı ağ yapısı üzerinde eşit yük dağılımlı ve yeterli servis kalitesi sağlayan bir yönlendirme algoritması üzerinde çalıştık.

## SUMMARY

### ENERGY CONSERVATIVE COMMUNICATION TECHNIQUES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

In the last decade, Wireless Sensor Networks have gotten more impact among our lives. By using Wireless Sensor Networks in areas such as health, military, transportation, industry, agriculture, etc., significant gains have been acquired in terms of time, cost and human life protection. The reason for Wireless Sensor Networks have been getting more mission in our lives is the technological developments. Especially by the electronical evolutions, it has been possible to produce the main component *sensor nodes* in low costs and sizes with much more superior capabilities. The possibility of producing those devices in very small sizes has extended the usage areas. However, being small size breeds some additional challenges. The most crucial problem of those devices is having limited energy sources. Therefore, they got very short lifetimes. Also, due to their usage areas, it may not be possible for human being to go into the application area of the nodes, and replace the energy depleted ones with the news. In these situations, the energy depleted nodes will not be able to perform their tasks. Thus, the system will be lack of the data belong to the area that should be sensed by these dead nodes. Besides, in situations where multi-hop communication is utilized, these energy depleted nodes will not be able to employed for forwarding data arriving from further nodes to the sink. This may cause disruptions in communication, thereby inspiring other nodes by not fulfilling their requirements.

Because of the reasons mentioned above, the major challenge to be considered for Wireless Sensor Networks is the economic consumption of the energy as much as possible. In order to achieve this, energy stingy products must be targeted during hardware or software design process. Thus, scientists endeavor to develop new methods for the aim of prolonging the lifetimes of these networks to the utmost.

One of the most energy grasping component of sensor nodes is the communication sub-unit. Communication sub-unit consumes much more energy alone than most of other sub-units. Hence, in our thesis, we focus on that energy shortage problem of the Wireless Sensor Networks, thereby trying to develop better energy efficient techniques for the communication sub-unit.

Technological developments have given the opportunity of increasing the capabilities of sensor nodes thereby extending their application areas. Nodes sense scalar data from the physical environment and transmit this data to the data collection center formerly, have evolved to the ones equipped with camera and microphones which can gather multimedia data. These new generation nodes are equipped with suitable mechanisms so that they can satisfactorily handle the collection, storage, processing and transmission



of the multimedia data. The major idea in traditional Wireless Sensor Networks is to reduce the energy consumption as much as possible. However, another challenge to be considered for Multimedia Wireless Sensor Networks is the transmission of the delay constrained multimedia data to the data collection center with a certain service quality. Hence, in the last stage of our thesis work, we tried to develop a multi channel cross layer architecture for Multimedia Wireless Sensor Networks with the aim of satisfactory distribution of the load balance and low-delay transmission of the real time data.

## 1. GİRİŞ

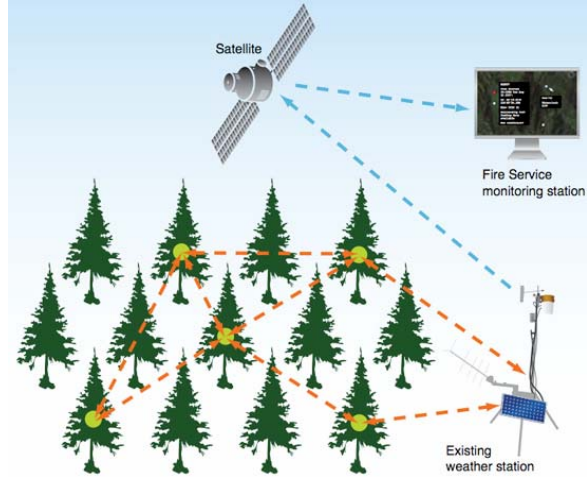
Bilgisayar ve elektronik, her geçen gün yaşamımızın içine daha çok girmekte ve birçok alanda insanoğlunun yerini almaya başlamaktadır. Günümüzde, insan gücüyle yapmanın, hesaplamanın güç, hatta imkansız olduğu işlemlerde; aynı şekilde insanoğlunun veri toplamasının, topladığı bu veriyi değerlendirme amacıyla belirli bir merkeze iletmesinin ve bu işlemleri periyodik ve çok düşük hata oranlarıyla gerçekleştirmesinin mümkün olmadığı ortamlarda, bilgisayar ve elektronik devreye girmektedir. Basit bir örnek verecek olursak, insanın giremeyeceği veya girmesinin tehlikeli olacağı bir coğrafi ortamdan periyodik olarak fiziksel verilerin toplanması gerekliliğine dayanan bir projede, insan gücünü kullanmak yerine, bu görevi insanoğlu yerine gerçekleştirecek elektronik aygıtlar kullanmak, önceleri hayal gücünden öteye geçemiyordu. Bunun sebebi, bu işlemleri gerçekleştirecek aygıtların ve mekanizmanın daha önceleri var olmaması, olsa bile çok büyük maliyetlerde gerçekleştirilebilmesi idi. Ancak, günümüzde, devre, işaret işleme ve benzeri elektronik alt alanlar ile kablosuz ortamdaki veri iletim tekniklerinde gerçekleştirilen yenilikler sayesinde, bu tehlikeli ve maliyetli gibi görünen işlemler artık son derece kolay, verimli ve düşük maliyetli hale getirilmiştir.

Herhangi bir fiziksel ortamdan verilerin alınarak yerel olarak işlenmesini ve bu verilerin değerlendirilmesi amacıyla belirli bir merkeze iletimini sağlayan yazılım ve donanım mekanizmasının tümüne Kablosuz Algılayıcı Ağ denmektedir. Kablosuz Algılayıcı Ağlar, başlıca 3 ana ögeden oluşmaktadır: (1) veriyi fiziksel ortamdan toplayarak, yeri geldiğinde bunu belirli bir işleminden geçirerek, çok sekmeli veya tek sekmeli iletim vasıtasıyla ileten algılayıcı düğüm elemanı; (2) toplanan verilerin iletiminde görevli iletişim mekanizması; (3) tüm verileri toplayan ve kullanıcının anlayabileceği, değerlendirme yapabileceği şekilde kendisine sunan bir veri toplama ve değerlendirme merkezi [1]. Bu üç ana ögenin oluşturduğu kablosuz algılayıcı ağlar, aslında birçok inter-disipliner çalışma alanını da içinde barındırmaktadır. Verilerin fiziksel ortamdan toplanmasını sağlayan ve bu toplanan veriyi merkeze iletmekle, yeri geldiğinde bu

veriyi belirli bir işleme ve depolamaya tabi tutmakla görevli kablosuz algılayıcı düğümlerin tasarımında ve gerçekleştirilmesinde devre ve çip tasarımı ile yapay zeka ve kablosuz veri iletim teknikleri gibi alt alanlar devreye girmektedir. Ayrıca, düğümler arası verinin iletimi için fiziksel bir taşıyıcı ve bu verinin iletiminde ortak mutabakatı sağlayacak protokollerin de tasarlanması gerekmektedir [2].

Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Şekil 1.1-1.3 'de örnekleri görüldüğü üzere, ofis, ev, fabrika gibi yerlerde kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesi, gemi, uçak ve arabalarda hataların erken teşhis ve önleminin alınması, orman yangınlarının erken uyarım sistemiyle önlenmesi, tarımsal sulama sistemlerinin gerçekleştirilmesi, güvenlik açısından kritik noktalarda saldırıların anında haber verilmesi gibi hayatımızın birçok alanında yer almaya başladı ve almaya da devam edecektir [1, 3, 4, 5].

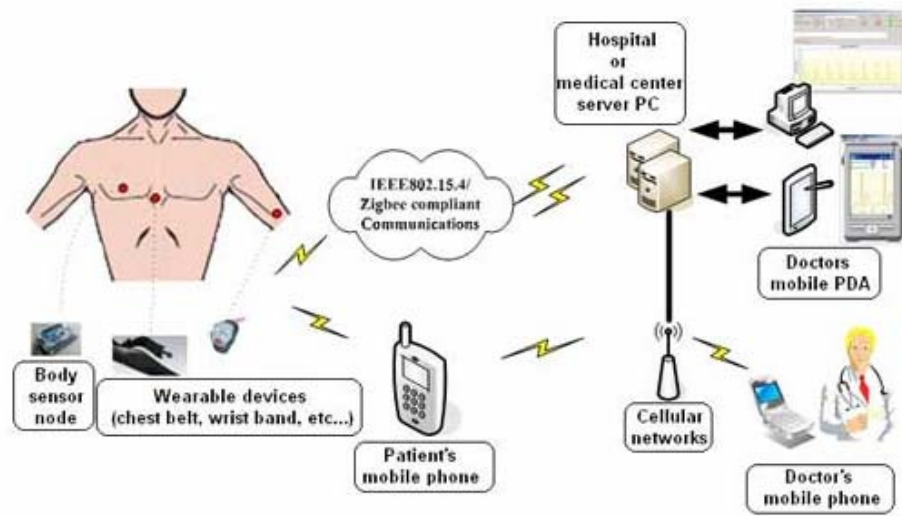
Sağlık alanında, bazı üniversiteler, hastaneler ve sağlık merkezleri, Kablosuz Algılayıcı Ağları, hastalarına daha iyi hizmetler sunabilme, doğabilecek olumsuzlukları önceden haber verme ve hastaneye gelmeden önce erken müdahale şansı tanınmasına olanak vermesi, ayrıca uzun soluklu tedavilerin hastalar üzerindeki etkilerinin sürekli ve gerçek zamanlı ölçülüp değerlendirilerek tedavi tekniklerinin verimliliği hakkında fikir sahibi olunması gibi noktalarda kullanmak amacıyla araştırma faaliyetlerini devam ettirmektedirler. Bunun için verilebilecek en güzel örnek çalışmalardan birisi, Harvard üniversitesinin yürüttüğü, insan üzerine giyilebilen bir giysi şeklinde düzenlenmiş ve felçli hastalar üzerinde denenen bir Kablosuz Algılayıcı Ağ uygulamasıdır. Bu çalışmaya göre, rehabilitasyon sürecindeki felçli hastalar, bu kıyafeti giyerek rehabilite edici egzersiz hareketlerini gerçekleştirmektedirler. Bu süre zarfında, hastaların kas hareketlenmeleri ile ilgili veriler, kıyafetteki algılayıcı düğümler vasıtasıyla algılanmakta, toplamakta, işlenmekte ve merkeze iletilmektedir. Bu verilerin değerlendirilmesi sonucunda, uygulanmakta olan egzersiz hareketlerinin rehabilitasyon aşamasındaki hastalar üzerindeki etkileri gözlenmekte ve faydaları hakkında fikir sahibi olunmakla birlikte, bu egzersizlerin geliştirilmesi yönünde olanak sağlamaktadır. Bu çalışmanın haricinde, yine Harvard Üniversitesinde, EKG sinyalleri gibi hayati önem taşıyan verilerin gerçek zamanlı olarak hastadan alınıp yetkili merkezlere iletilmesi gibi konuları içeren mekanizma ve sistemler üzerinde çok faydalı ve kapsamlı çalışmalar yapılmıştır [1, 6 – 12].



Şekil 1.1: Orman yangınlarını önlemek için kurulmuş örnek bir uygulama [13]



Şekil 1.2: Bölge güvenliğini sağlamak üzere kurulmuş bir uygulama [14]



Şekil 1.3: Kablosuz Algılayıcı Ağ kullanılarak hastaya ait verilerin doktora veya sağlık yetkililerine bildirilmesi [15].

Elektronikteki gelişmeler sayesinde, algılayıcı düğümlerin fiziksel ebatları o kadar küçüldü ki, bunu daha iyi anlayabilmek için Şekil 1.4 ve Şekil 1.5 ‘deki görüntülere bakmak yeterli olacaktır.

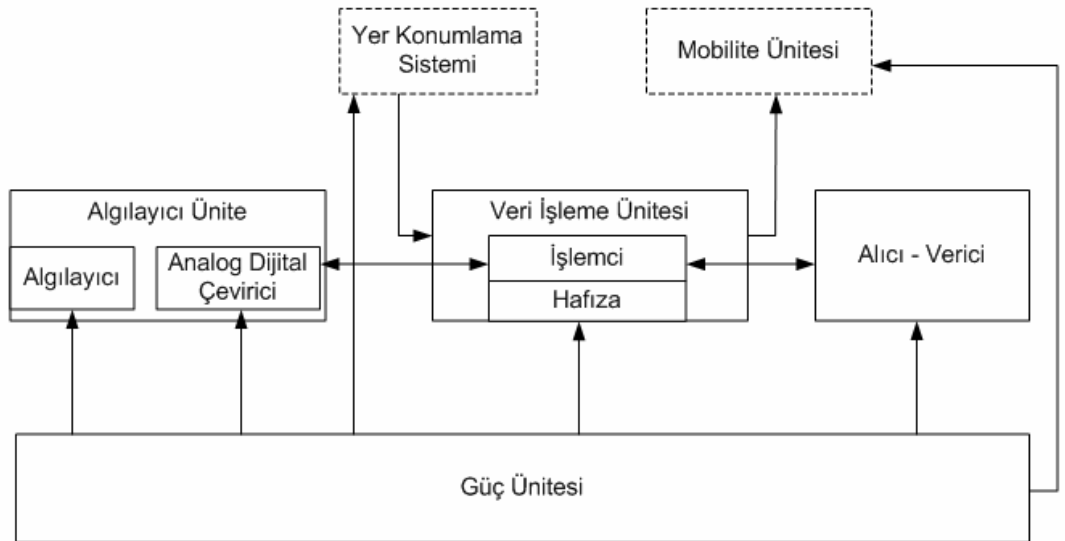


Şekil 1.4: Arı üzerine yerleştirilmiş bir kablosuz algılayıcı düğüm [16]



Şekil 1.5: Madeni para ebatlarında bir kablosuz algılayıcı düğüm [17]

Kablosuz Algılayıcı Düğümün iç yapısı genel olarak Şekil 1.6 ‘da gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Kablosuz algılayıcı düğümün iç yapısı [18]

Şekil 1.6 'da görüldüğü üzere, bir kablosuz algılayıcı düğümün içerisinde, ortamdan fiziksel verilerin elde edilmesini sağlayan algılayıcı mekanizması bulunmaktadır. Toplanan bu veri, işlenmek üzere Veri İşleme Ünitesine gönderilir. Algılayıcı düğüm, topladığı bu verileri, direkt olarak veri toplama ve değerlendirme merkezine iletmek yerine, kendi içerisinde bir değerlendirmeye (In-Node Processing) tutarak işler ve işlem sonucunda çıkan sadeleştirilmiş veriyi gönderir. Sadeleşen veri, merkeze iletmek amacıyla Alıcı-Verici ünitesine gönderilir [18].

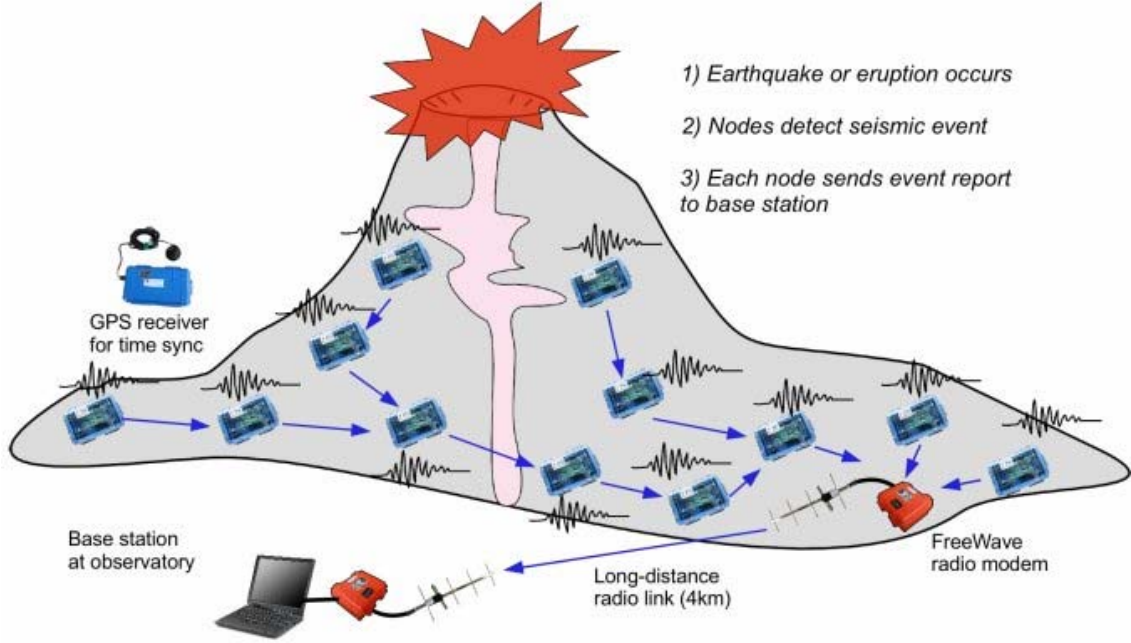
Kablosuz Algılayıcı Ağların en büyük avantajlarından birisi de tasarsız bir şekilde, kendi kendine organize olabilme yeteneğine sahip olabilmeleri, diğer bir deyişle ad-hoc yapıda olmasıdır. Daha açık bir ifadeyle, algılayıcı düğümler için herhangi bir yerleşim ve organizasyon planlaması yapmadan, örneğin rastgele serpiştirme şekliyle bir ağ yapısı kurulabilir. Bunun avantajı, herhangi bir yapısal düzenlemeye ve ayarlamaya gerek olmadan, düğümlerin kendi aralarında organize olarak bir ağ yapısı kurabilmeleridir. Bu sayede, sel, deprem gibi afetsel durumlarda hayati önem taşıyan kurtarma faaliyetlerinde devreye sokularak haberleşmenin devamını sağlayabilirler. Bu şekilde, herhangi bir yapıya bağlı kalmadan, kendi kendine organize olabilme yeteneğine sahip olabilmesi için de bu yapıya uygun haberleşme protokollerinin ve tekniklerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Her ne kadar Kablosuz Tasarsız Ağlar için kullanılan geleneksel tekniklerin Kablosuz Algılayıcı Ağlar için de kullanılabileceği akla gelse de, aslında bu tarz ağlara özel iletişim tekniklerinin geliştirilmesi daha uygundur. Bunun sebeplerini daha iyi anlayabilmek için, Kablosuz Algılayıcı Ağlar ve Kablosuz Tasarsız ağlar arasındaki farklılıklara göz atalım:

- Kablosuz Algılayıcı Ağlarda görev yapan düğüm sayısı, geleneksel tasarsız ağlardaki düğüm sayısından çok daha fazladır.
- Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğümler, tasarsız ağlardaki düğümlere göre daha yoğun bir şekilde yerleşim dağılımı gösterirler.
- Kablosuz Algılayıcı Ağ yapısı, tasarsız ağ yapısına göre daha sıklıkla değişiklik gösterir.

- Kablosuz Algılayıcı Ağlarda, ağ içerisindeki kapsama alanında bulunan diğer bütün düğümlerin alım yapabileceği “yayım (broadcast)” mantığına göre haberleşme yapılırken, tasarsız ağlarda “noktalar arası (point-to-point)” dediğimiz sadece iki düğüm arasında gerçekleşen bir veri iletimi mantığı söz konusudur.
- Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğümler, diğerlerine göre, enerji, veri işleme kapasitesi ve hafıza yönünden daha kısıtlı kaynaklara sahiptir.
- Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğüm sayısı fazla olduğundan, bütün düğümler için diğerlerinden ayırtıcı bir kimlik numarası (ID) mümkün olmayabilir. Bunun sebebi, düğüm sayısı fazla olduğundan, kimlik numarası uzayı da büyük olacak ve kimlik numaralarının büyüklüğü de veri iletimine ek bir yük getirecektir. Daha büyük kimlik numarası demek, daha fazla veri iletimi demektir. Daha fazla veri iletimi de daha fazla enerji sarfiyatı anlamına gelmektedir.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı birçok araştırmacı, Kablosuz Algılayıcı Ağların yapısına ve özelliklerine uygun iletişim teknikleri ve protokolleri geliştirmek için çabalamaktadırlar [18]. Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğümlerin küçük ebatlarda olması, onların birçok alanda, ucuz maliyetlerde kullanılabilme olanağı sağlamıştır. Ancak, bununla birlikte ortaya çıkan diğer bir önemli problem ise, kısıtlı kaynaklara sahip olmasıdır. Diğer bir deyişle, yukarıdaki şekillerde de görüldüğü üzere, bir madeni para büyüklüğünde olabilen, yeri geldiğinde bir arının sırtında taşıyabileceği ağırlıkta ve büyüklükte olabilen bu cihazların sahip olabileceği enerji depolama miktarı da elbette sınırlı olacaktır. Bu cihazların sahip oldukları güç kaynağının miktarı 0.5 Ah, 1.2V ve daha azıdır. Kısıtlı güç kaynağının getirdiği en büyük sıkıntı ise şudur: gücü tükenen düğümlerin güç kaynaklarının ya da bu düğümlerin alınıp yerine yenilerinin konulmasının mümkün olmadığı, hatta imkansız olduğu durumlar vardır. Buna bir örnek, Şekil 1.7 ‘de de görülebileceği üzere, bir volkanik dağ üzerine yerleştirilmiş Kablosuz Algılayıcı Ağ yapısında, enerjisi tükenen bir düğümü oradan alıp yerine yenisini yerleştirmek son derece tehlikeli olacaktır. Enerjisi tükenen düğümün değiştirilmeden orada bırakılması ve yenisinin de yerine yerleştirilmemesi başka problemler doğuracaktır. O düğümün bulunduğu yerden fiziksel veriler elde

edilemeyecek, bu da, işlevsellik yönünden verimli ve doğru sonuçların elde edilememesine, ayrıca ağ içerisinde bir bölgenin ulaşılacak olması da yapısal değişikliklere sebep olacaktır.



Şekil 1.7: İnsanın girmesinin tehlikeli olabileceği bir coğrafi ortamda KAA kullanımı [19].

Uygulamanın amacına ve yerine göre, Kablosuz Algılayıcı Ağların ömrünün aylar bazen de yıllar sürmesi beklenmektedir. Enerjinin kısıtlı olduğu bu ağ yapısında, düğümlerin ömrünü uzatmak için dış kaynaklardan (güneş enerjisi gibi) enerji sağlanması düşünülmüştür. Ancak bunun da ortaya bazı sorunlar çıkardığı tespit edilmiştir [20, 21]. Yukarıda bahsedilen, sınırlı miktardaki güç kaynağından dolayı, enerji, önemi çok büyük ve miktarı kısıtlı bir kaynaktır; ayrıca çok dikkatli kullanılmak durumundadır. Bu sebeplerden dolayı, araştırmacılar, enerji sarfiyatını gözetken, diğer bir deyişle daha az enerji sarfiyatına sebep olacak haberleşme teknikleri üzerinde çalışmalarını sürdürmektedirler.

Bilim adamları, kablosuz algılayıcı ağlar ile ilgili enerji sıkıntısını aşabilmek amacıyla hem ağ yapısında hem de algılayıcı düğümün donanımsal yapısı üzerinde birçok çalışmalar yapmış ve yeni teknikler önermişlerdir. Diğer kablosuz ağ teknolojilerinde kullanılan ve uygulanan iletişim tekniklerinin, kablosuz algılayıcı ağlar için uygun olmadığı tespit edilmiştir. Diğer ağ yapılarında, kablosuz algılayıcı ağlarda olduğu



kadar enerji problemi yoktur. Dolayısıyla, diğer ağ yapılarında kullanılan haberleşme teknikleri, enerji sarfiyatını pek fazla gözetmezler. Ancak, kablosuz algılayıcı ağlar için durum böyle değildir. Verinin düzgün bir şekilde hedefe varmasının amaçlanmasının yanında, bu veri iletimi sırasında mümkün olduğu kadar enerji sarfiyatını aza indireyecek yapılar ve teknikler geliştirilmelidir. İşte bu sebeplerden dolayı, diğer kablosuz algılayıcı ağlarda uygulanan tekniklerin ötesinde, kablosuz algılayıcı ağların yapısına münhasır teknikler geliştirilmiştir.

Kablosuz algılayıcı ağlarda enerji sarfiyatındaki en büyük etkenlerden birisi, haberleşme alt birimidir. Yapılan çalışmalar [22-26] göstermiştir ki, veri iletiminde harcanan enerji, işlemcide harcanan enerjiden çok daha fazladır. Hatta, bir bitlik verinin iletimi sırasında harcanan enerji miktarının, işlemcide gerçekleştirilen bin adet işlem sırasında harcanan enerjiye eşdeğer olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, kablosuz algılayıcı düğümlerin enerji sarfiyatına azaltmaya yönelik en büyük katkı, haberleşme mekanizması üzerinde yapılabilecek bir iyileştirme olacaktır. Bu sebeple, bu tez çalışmasında, kablosuz algılayıcı ağlar için geliştirilen haberleşme tekniklerini inceledik. Yaptığımız araştırmalar sonucunda, haberleşme protokol katmanının sadece bir seviyesinde değil, neredeyse her seviyesine yönelik çok değişik önerilerin yapıldığını tespit ettik. Biz de, haberleşme protokol katmanının ikinci ve üçüncü seviyelerinde çalışmalar yaparak, ağ yapısının ömrünü mümkün olduğu kadar uzatacak yeni metotlar geliştirdik.

Kablosuz algılayıcı düğümlere ait radyonun veri iletimi yapmıyorken, yani boşta olduğu zamanlarda, veri alışverişi sırasında harcadığı enerjiye yakın bir miktarı harcamaktadır. Dolayısıyla, eğer algılayıcı düğümün iletim yapacak kendisine veya herhangi başka bir düğüme ait verisi yok ise, gereksiz yere radyo alt birimini açık durumda tutmanın bir anlamı yoktur. Bu şekilde, düğümlerin belirli bir periyot çerçevesinde, radyolarını uyku durumuna geçirip bir müddet sonra tekrar uyandırarak iletim işlemi için aktif hale getirmesine hizmet çevrimi (duty-cycle) adı verilmektedir. STEM [27] adı verilen çalışmada düğümlerin belirli bir zamanlama planı üzerinde senkronize olarak, sadece uyanma zamanlarında radyolarını aktif hale getirdikleri bir çalışma şekli önerilmiştir. Tezimizin üçüncü bölümünde anlatıldığı üzere, biz de bu çalışmayı, paket iletimindeki gecikme parametresinin iyileştirilmesi yönünde geliştirmeye çalıştık. Çalışmamız

sonucunda, bahsedilen çalışmaya göre paket iletim süresinde daha iyi bir sonucun elde edildiğini tespit ettik.

Kablosuz algılayıcı ağlarda kullanılan düğümlerin kapsama alanları sınırlı olduğundan, veri, direkt olarak merkeze iletilmek yerine, çok sekmeli iletim (multi-hop) yöntemiyle bir sonraki komşuya iletilir. Bu şekilde, paket, düğümler üzerinden çok sekmeli iletim yöntemiyle veri toplama merkezine ulaşır. Ancak, kaynak düğümden çıkacak birden fazla paket, hep aynı düğümler üzerinden veri toplama merkezine giderse, hep bu düğümlerin enerjisi azalacaktır. Oysa, hep aynı düğümleri kullanmak yerine, bir sonraki paket iletilen düğümü seçerken, komşuların enerji seviyelerini de hesaba katarak seçim yapılırsa daha adil bir yük dağılımı sağlanmış olacaktır. Bunun yanı sıra, sistemde bir tek veri toplama merkezi kullanıldığı takdirde, bu cihaza yakın yerde konuşlanmış düğümler, bütün ağdaki diğer düğümlerden gelen paketleri veri toplama merkezine iletebilecek yegane elemanlardır. Dolayısıyla, her ne yöntem uygulanırsa uygulansın, bütün ağdan gelen paketlerin veri toplama merkezine ulaşmadan önce uğrayacakları son durak, bu veri toplama merkezi yakınındaki aktif bölge (hot-spot area) diye de adlandırılan kısımda yerleşik bulunan düğümlerdir. Bu sebepten dolayı, bu düğümlerin enerjileri diğer bütün düğümlerden önce ve kısa zamanda tükenir. Bunların enerjisinin tükenmesi, ağ ömrünün sona ermesi anlamına gelmektedir. Çünkü bu düğümler görev yapamaz duruma geldiği takdirde, diğer düğümlerden gelen paketlerin veri toplama merkezine iletilmesi mümkün olmayacaktır. İşte bu sebeple, tek bir veri toplama merkezi kullanmak yerine birden fazlasını kullanmak, aktif bölge alanını genişletecek. Bu da, son durak olarak daha fazla düğümün görev almasını, dolayısıyla yükün daha adil olarak dağıtılmasını ve ağın ömrünün uzamasını sağlayacaktır. Tez çalışmamızın ikinci aşamasında, çoklu veri toplama merkezli bir yapıda, enerji gözetim ve adil yük dağılımını sağlayacak bir yönlendirme algoritması üzerinde çalıştık. Elde ettiğimiz sonuçlardan da görülebileceği üzere, ağ yapısının ömrünün artırılmasına önemli ölçüde katkı sağlanmıştır.

Kablosuz algılayıcı ağlarda, enerji sarfiyatını aza indirmek amacıyla sunulmuş en önemli yöntemlerden birisi de, ağ yapısını kümelere bölme yaklaşımıdır. Daha önceden de bahsedildiği üzere, enerji sarfiyatına sebep olan en büyük etken veri iletim mekanizmasıdır. Bu sebepten dolayı, görevi aksatmadan, iletilen veri miktarını asgariye

indirmek çok önemlidir. Bu düşünceden yola çıkarak, ağ üzerindeki bütün düğümlerin verilerini merkeze ilemesi yerine, ağ yapısının kümelerle bölünerek, her bir kümede bir lider seçilip, kümedeki diğer düğümlerin verilerini bu lider düğüme ilemesi fikri esas alınmıştır. Lider düğüm de, kendi kümesi içerisindeki diğer sade düğümlerden gelen bu veriyi süzerek ya da özetini çıkararak, sadeleşmiş halini, diğer komşu kümelerin lider düğümleri üzerinden veri toplama merkezine gönderir. Şimdiye kadar yapılan kümesel yapıları algılayıcı ağ çalışmalarında, genellikle küme içi haberleşme üzerine odaklanılmıştır. Halbuki, daha fazla enerji kümeler arası iletişim sırasında harcanmaktadır. Biz de tezimizin üçüncü aşamasında, kümesel yapıları, çoklu iletim kanallı bir ağ yapısında, jeton tabanlı bir yönlendirme algoritması üzerinde çalıştık. Böylece, sadece küme içi iletişimi dikkate almayan, aynı zamanda kümeler arası iletim sırasındaki enerji sarfiyatını da göz önünde bulunduran bir yapı geliştirdik.

Önceden belirttiğimiz gibi, teknolojiye gelişmeler, algılayıcı ağların uygulama alanlarını genişletmekle beraber, algılayıcı düğümlerin de daha az maliyetlerde daha üstün özelliklerle donatılmasına imkan vermiştir. Algılayıcı düğümler artık, sıcaklık, basınç, nem gibi sayısal verilerle birlikte, sahip oldukları kameralar ve mikrofonlar sayesinde, ses ve görüntü gibi birden fazla boyutlu verileri de ortamdan elde etme kabiliyetine sahip olmuşlardır. Çoklu ortam verilerini fiziksel ortamdan elde edip bunu veri toplama merkezine ulaştıran bu yapıya Çoklu Ortam Algılayıcı Ağlar denmektedir. Bahsi geçen, birden fazla boyutlu verileri merkeze iletirken, klasik algılayıcı ağlarda kullanılan yöntemleri uygulamak pek uygun değildir. Bunun sebebi, klasik algılayıcı ağlarda kullanılan yöntemler, birincil olarak enerji sarfiyatı problemini gözetmektedir. Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlarda ise, enerjiyi mümkün olduğunca korumakla birlikte, verinin belirli bir servis kalitesi içerisinde veri toplama merkezine iletilmesi gerekmektedir. İşte bu yüzden, gerçek zamanlı veri iletimi yapılması gereken Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlara has yeni teknikler geliştirilmektedir. Ancak, yapılan çalışmaların geneli de sadece servis kalitesi üzerinde durmuşlardır. Bunun yanında, enerji sarfiyatını da göz önünde bulunduran çok çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Tezimizin son aşamasında, Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlarda, hem servis kalitesini garanti edecek, bunun yanında da, mümkün olduğu kadar servis kalitesini ihlal etmeyecek şekilde enerji korunumu sağlayacak bir yapı geliştirdik.

Tezin son kısmı olan beşinci bölüm, tez çalışması sonucunda varılan nihai kanaatler ve sonuçların bir özetini yansıtmaktadır.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA), belli bir fiziksel değeri ölçebilmek amacıyla bir alanın tümünü kapsayacak, yani belirli bir alanın bütününden veri elde edebilecek şekilde yerleştirilen algılayıcı düğümler, bu düğümlerin haberleşme standartlarını belirleyen protokoller ve düğümlerden gelen verilerin toplandığı merkezin oluşturduğu yapıya denmektedir. KAA 'ların temel yapısını oluşturan algılayıcı düğümler, fiziksel ortamdan veriyi toplama, bu veriyi daha önceden belirlenmiş kriterlere göre işleme, uygulama çeşidine bağlı olarak yeri geldiğinde şifreleme ve veri toplama merkezine iletme görevini yürütmektedirler [1].

KAA 'ların tasarımı, disiplinler arası bir çalışmayı gerekli kılmaktadır. Devre tasarımı, yapay zeka, kablosuz iletişim teknikleri, veri sıkıştırma ve kodlama teknikleri gibi alt bilimler, KAA 'ların tasarımında kullanılanlardan bazılarıdır [28]. Algılayıcı düğümler, uygulama alanına göre çok çeşitli büyüklükleri ölçebilirler ve algılayabilirler. Bu uygulama alanları genel olarak, üç ana kategori altında sınıflandırılabilir [1]:

- *Fiziksel değerlerin ölçülmesi:* Işık, sıcaklık, nem, basınç, radyasyon seviyesi ve benzeri fiziksel değerlerin ölçülmesi.
- *Kimyasal değerlerin ölçülmesi:* Herhangi bir sıvı karışım içindeki bir bileşenin oran seviyesinin ölçülmesi, vb.
- *Olayların tespiti:* Belirli bir coğrafi alanın güvenli bir şekilde kontrolü, dış müdahalelerin gerçek zamanlı olarak algılanması, vb.

Kablosuz algılayıcı ağlar, özellikle insanların ölçüm almasının tehlikeli ve güç olduğu yerlerde ve durumlarda kullanılmaktadır [29]. Bunun yanı sıra, yirmi dört saat boyunca bir coğrafi alan üzerinde, çok çeşitli noktalardan veri toplamak amacıyla yüzlerce kişiyi görevlendirmek yerine, bu işlevi yapabilecek kabiliyetteki yüzlerce algılayıcı düğümü bu coğrafi alana yerleştirerek, daha doğru verileri sürekli olarak elde etmek gibi bir

imkanı sunmaktadır bizlere. Ancak, bunu gerçekleştirirken, yüzlerce hatta yeri geldiğinde binlercesinin kullanılması gereken bu algılayıcı düğümlerin, çok ucuz maliyetlerde ve ebatlarda üretilmesi gerekmektedir. Bunu başarabilmek de, donanım tasarımındaki gelişmelere bağlıdır [30].

Kablosuz Algılayıcı Ağlar, bir tür tasarsız ağ yapısıdır. Yani, herhangi bir merkezi altyapıya ve düzenleyiciye ihtiyaç olmaksızın düğümlerin birbirleriyle haberleşebildikleri ağ yapısıdır. Bir sonraki bölümde, tasarsız ağ yapılarıyla ilgili gerekli bilgiler verilmektedir.

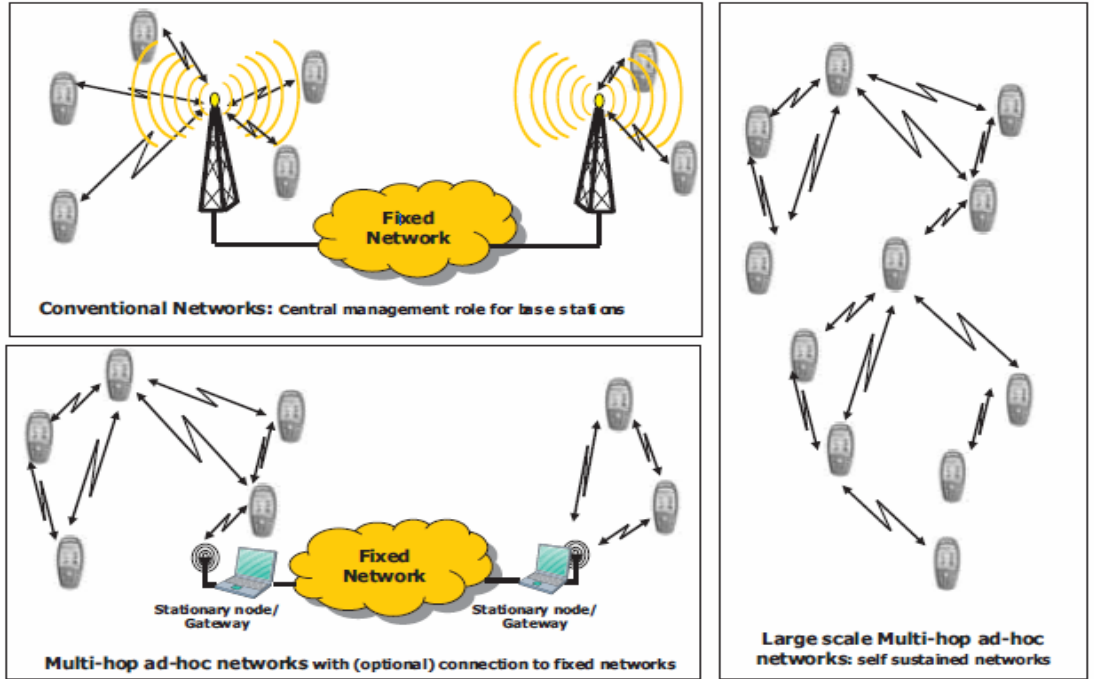
## 2.2. TASARSIZ AĞLAR

Kablosuz Ağ yapıları en temelde iki guruba ayrılmaktadırlar.

- Yapısal ağlar (Infrastructure Networks) : Haberleşmenin gerçekleşebilmesi için bir kurulum, organizasyon gereken ağ yapısı.
- Tasarsız ağlar (Ad hoc Networks) : Haberleşmenin gerçekleşebilmesi için herhangi bir kurulum, organizasyon, yapı gerektirmeyen ağ yapısı.

Tasarsız ağlar, herhangi merkezi bir düzenleyici ve ağ yapısı olmadan, kendi kendine organize olabilen ve iletişimini gerçekleştirebilen ağ çeşididir. Herhangi bir yapı veya çatı olmadığı için fiziksel olarak bir kurulumla ve yerleşime ihtiyaç yoktur. Herhangi bir yerde, herhangi bir anda, birbirinin kapsama alanında olan iki veya daha fazla düğümün birbiriyle haberleşmeye başlayabildiği ağ yapılarıdır [31]. Tasarsız ağlar, haberleşme için herhangi bir altyapı ve organizasyon kurmanın mümkün olmadığı veya istenmediği durumlarda, bölgelerde uygulanmaktadır. Tasarsız ağların, yapısal hücreli ağlarla mukayesesi Şekil 2.1 'de gösterilmektedir. Bir coğrafi alan üzerine dağılmış halde bulunan gezgin veya statik haldeki kullanıcılar düğüm olarak adlandırılmaktadır. Tasarsız ağın servis alanı, düğümlerin dağıtık olarak üzerinde buldukları alanın tümüdür. Ağdaki her düğüm, bir alıcı, bir de verici ile donatılmıştır. Tasarsız ağlar, kendi kendine organize olabildiklerinden, iletişime geçebilmek için, hücreli ağlardaki baz istasyonları gibi herhangi bir merkezi düzenleyiciye ihtiyaçları yoktur. Tasarsız ağın içindeki her bir düğüm, gene ağın içindeki herhangi başka bir düğüme, kapsama alanında olsun olmasın veri gönderebilir ve gene herhangi bir düğümden veri alabilir.

Eğer, veri göndereceği düğüm, kapsama alanında ise, veriyi direkt olarak alıcıya gönderir; yok eğer alıcı, kapsama alanı dışında ise, daha önceden belirlenmiş bir yönlendirme protokolüne göre alıcıya ulaştırılmak üzere, kendi kapsama alanındaki komşularından birine iletir. Veriyi alan komşusu ise, nihai alıcı eğer kendi kapsama alanında ise direkt gönderir; yok eğer değilse, ilk düğüm gibi o da paketi başka bir düğüme yönlendirir. Veri, nihai alıcıya ulaşana kadar bu veri aktarımı sürer. Buna çok sekmeli iletişim (multi-hop transmission) denmektedir. Kablosuz algılayıcı ağlarda da, düğümler çok küçük ebatlarda olduğundan, veri alım-iletim mesafeleri de kısıtlıdır. İşte bu sebeple, düğümler, fiziksel ortamdan elde ettikleri verileri direkt olarak veri toplama merkezine iletemediklerinden dolayı, kapsama alanında bulunan komşularına iletirler. Ayrıca, tasarsız ağlarda, çıkış kapısı (gateway) diye adlandırılan düğümler vasıtasıyla, tasarsız ağ yapısı içerisinde bulunan herhangi bir düğüm, dış dünya yani internet veya başka bir ağ ile veri alışverişi yapabilir [32].



Şekil 2.3: Hücresel ağlar ile tasarsız ağların yapısal gösterimi [32]

### 2.2.1. Tasarsız Ağların Özellikleri

Kablosuz tasarsız ağların, diğer kablosuz yapısal ağlara göre değişik karakteristiğe sahip olduğunu belirtmiştik. Dolayısıyla, tasarsız ağ yapısına dayalı bir uygulama

gerçeklenirken veya bu ağ yapısına yönelik herhangi bir protokol geliştirimi yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Bunları aşağıdaki gibi özetleyebiliriz [33]:

- *Çok sekmeli iletim-* Yapısal kablosuz ağlarda, genelde düğümler, merkezi bir düzenleyiciyle yıldız bağlantı şeklinde bir topoloji oluştururlar. Yani, direkt olarak düzenleyiciyle veri alışverişi yapabilirler. Tasarsız ağlarda ise, düğümler verilerini merkezi birime direkt olarak göndermezler. Çoklu iletişim denilen yöntemle, veri toplama merkezine doğru iletilmek üzere kapsama alanındaki komşularından herhangi birisine verilerini iletirler.
- *Gezginlik-* Tasarsız ağ yapılarının uygulandığı yerler bakımından ağdaki düğümler gezgin durumda olabilirler. Yapısal ağlarda ise düğümler genelde statik durumdadırlar. Dolayısıyla, yapısal bir ağ için tasarlanan bir metodun, örneğin bir yönlendirme protokolünün, tasarsız bir ağda da istenen performansı göstermesi beklenemez.
- *Kendi kendine organize olabilme-* Tasarsız ağlarda, yapısal ağlarda olduğu gibi merkezi bir haberleşme düzenleyicisi bulunmadığından, düğümler haberleşmeye başlayabilmek için herhangi başka bir üniteye ihtiyaç duymadan kendi organizasyonlarını yaparak birbirleriyle direkt olarak haberleşebilirler. Yapısal ağlarda ise, ağ yapısındaki iki düğüm, birbirlerine veri iletebilmek için bir düzenleyiciye ihtiyaç duymakta, verilerini birbirlerine ancak bu düzenleyici üzerinden iletebilmektedirler.
- *Ölçeklenebilirlik-* Yapısal ağlarda gezginlik seviyesi düşük olduğundan, ağ yapısında yapılacak herhangi bir değişiklik hiyerarşik bir yapılanma sayesinde çok zor olmaz. Ancak, tasarsız ağlarda, var olan bir ağ yapısını genişletmek o kadar da kolay değildir. Bunun sebebi de, tasarsız ağlardaki gezginlik oranının yüksek olmasıdır.
- *Enerji korunumu-* Tasarsız ağlar, enerjisi sınırlı olan ve tekrardan üretme imkanı olmayan elemanlardan oluşmaktadır. Kullanım amaç ve de ortamlarından dolayı da enerjilerinin yenilenmesi gibi durumlar söz konusu olmayabilir. Bu sebeple, tasarsız ağlara yönelik protokoller tasarlanırken, diğer kablosuz ağlarda göz önüne alınan kriterlere ek olarak, enerjinin korunumunu da dikkate alacak yöntemler geliştirilmelidir.
- *Güvenlik-* Tasarsız ağlar, yapısal ağlara göre, güvenlik ihlallerine daha açıktır.



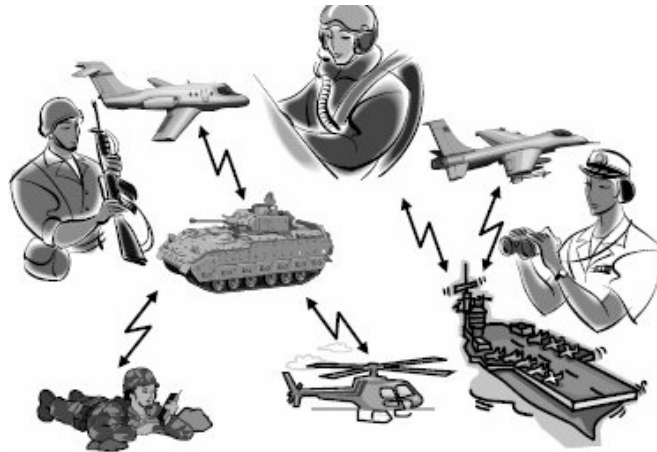
### 2.2.2. Tasarsız Ağların Avantajları

Tasarsız ağlar, bazı ihtiyaçlara binaen yapılan araştırmalar sonucunda ortaya atılan bir konudur. Tasarsız ağların ortaya çıkmasındaki en büyük etken, yapısal bir ağ topolojisinin kurulmasının mümkün olmadığı veya daha maliyetli olduğu durumlarda kendi kendine organize olabilecek ve iletişime geçebilecek bir ağ yapısına ihtiyaç duyulmasıdır. Örneğin, deprem gibi afetsel durumlarda bütün iletişim alt yapısının çöktüğü bir ortamda tasarsız bir ağın çok büyük faydaları olacaktır.



Şekil 2.2: Sel altında kalan bir şehirden bir görüntü [34]

Savaş alanlarında, araçların birbirleriyle herhangi bir alt yapıya ihtiyaç duymadan çok sekmeli iletişim vasıtasıyla iletişim kurabilmeleri de hayati önem taşımaktadır.



Şekil 2.3: Savaş alanındaki araçların tasarsız ağlar vasıtasıyla birbiriyle haberleşmesi [35]

Tasarsız ağların, yapısal ağlara göre avantajlarını birkaç madde halinde aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [32]:

- Veri iletimi yaparken harcanan enerji miktarı, veri ileten ve alan arasındaki mesafeyle orantılıdır. Dolayısıyla, yapısal ağlarda olduğu gibi, veriyi tek sekmeli iletim mantığıyla, direkt olarak veri toplama merkezine iletmek, çok daha fazla enerji sarfiyatına neden olacaktır. Ancak, tasarsız ağlarda uygulanan çok sekmeli iletim sayesinde, zaten enerjisi kısıtlı olan düğümler, verilerini, kapsama alanları içerisindeki bir komşusuna veri toplama merkezine iletmek üzere göndererek, enerji sarfiyatının önüne geçerek ağ yapısının da ömrünü uzatmış olurlar.
- Tasarsız ağ yapılarında, merkezi bir kontrol ve düzenleyiciye ihtiyaç duyulmadığından, yapısal ağlarda olduğu gibi düzenleyicinin zarar görmesi veya devreden çıkması gibi durumlarda iletişimin de çökmesi gibi bir durum söz konusu değildir.
- Öyle durumlar ve coğrafi şartlar mevcuttur ki yapısal bir ağ kurmak çok daha zor dolayısıyla maliyetli olacaktır. Böyle durumlarda, tasarsız bir ağın uygulamaya alınması çok daha az maliyetli olabilir.
- Tasarsız ağ yapısı, herhangi bir yapıya bağlı olmadığından, sabit bir yere de bağlı olmak zorunda değildir. Bu da, uygulamaya gezginlik ve esneklik kazandırmaktadır.
- Çok sekmeli iletişim kullanıldığından, veri iletimi kısa mesafeler arası olacağından işaretlerin çakışma olasılığı azalacaktır. Böylece, bir komşuluk içerisinde kullanılan frekans bandının, diğer başka bir komşuluk içerisinde tekrar kullanılarak, frekans bandının kullanım verimliliği, dolayısıyla birim zamanda iletilen veri miktarı (throughput) da artacaktır.

### **2.3. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN DİĞER KABLOSUZ AĞ YAPILARINDAN FARKLILIKLARI**

Her ne kadar isminden anlaşılacağı üzere, Kablosuz Algılayıcı Ağlar da bir kablosuz ağ türü olsa da, geleneksel kablosuz ağ yapılarına göre bazı farklılıklar göstermektedirler [30] :

- *Düğümelerin küçük ebatlı olması:* Kablosuz Algılayıcı Ağ yapısını teşkil eden algılayıcı düğümler çok küçük ebatlarda olduğundan, veri işleme, depolama ve

enerji kaynakları yönünden bir kısıt söz konusudur. Ağ uygulamasının yapıldığı bazı coğrafi mekanlarda, enerjisi tükenen algılayıcı düğümün yenisiyle değiştirilmesinin çok zor, hatta imkansız olduğu durumlar olabilir.

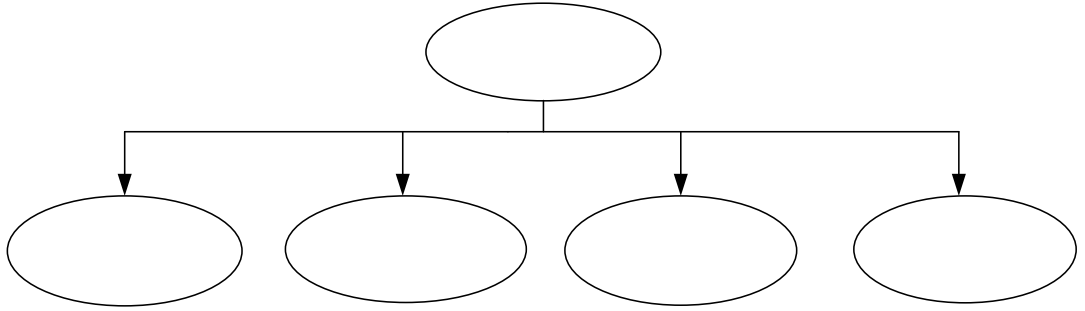
- *Düğüm sayısının fazlalığı:* Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğüm sayısı, diğer kablosuz ağ yapılarındaki düğüm sayılarından çok daha fazladır. Düğüm sayısının fazlalığı, düğümlerin ortamda yoğun bir şekilde dağılımına yol açar.
- *Kendinden ayarlanabilme:* Kablosuz Algılayıcı Ağlarda, düğümler, uygulamasına bağlı olarak, rastgele bir şekilde örneğin bir uçaktan atılmak suretiyle, coğrafi ortama dağıtılırlar. Daha sonrasında da, bunların haberleşmeye başlayabilmeleri için birisi tarafından konfigüre edilme gibi bir durum söz konusu değildir. Bu düğümler, kendiliğinden bir ağ yapısı kuracak şekilde, kendilerini ayarlamalıdır.
- *Uygulama bazlılık:* Kablosuz Algılayıcı Ağlar, uygulamaya münhasırdır. Örneğin, bir güvenlik uygulaması için geliştirilen bir ağ yapısını tarımsal sulama sistemi için kullanamazsınız. Her uygulamanın kendine has gereksinimleri ve özellikleri vardır. Dolayısıyla, uygulamanın karakteristiğine uygun olarak protokoller ve yapı geliştirilmelidir.
- *Toplojideki değişikliklerin sıklığı:* Uygulama çeşidine bağlı olarak, algılayıcı düğümler, zararlı ortamlarda kullanılabileceğinden, korozyona açıktırlar. Dolayısıyla, kolayca zarar görebilir ve devre dışı kalabilirler. Bunun yanı sıra, küçük ebatlarda olduklarından dolayı sınırlı enerji kaynaklarına sahiptirler. Fazla olmayan sürelerde enerjiler tükenerek gene devre dışı kalabilirler.
- *Veri artıklığı:* Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğüm sayısı çok yoğun olduğundan, herhangi bir coğrafi noktadaki veriyi aynı anda birden fazla düğümün veri toplama merkezine göndermeye çalışması söz konusudur. Bu da gereksiz yere veri artıklığına yol açar.

#### **2.4. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ENERJİ SARFIYATINI ENGELLEME AMAÇLI UYGULANAN YÖNTEMLER**

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, Kablosuz Algılayıcı Ağların en önemli problemi, küçük ebatlardaki algılayıcı düğümlerin sınırlı miktarda enerji kaynağına sahip olmalarıdır. Bu sebeptir ki, diğer geleneksel kablosuz ağlar için tasarlanan yöntemler

ve protokollerin aynı performansı Kablosuz Algılayıcı Ağlarda da göstermeleri beklenmemelidir. Performans kriterinin de ötesinde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, diğer kablosuz ağ uygulamalarındaki düğümlerin, Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğümler kadar enerji sıkıntıları olmadığından dolayı, bu ağlar için geliştirilen metotlar genellikle enerji korunumunu göz önünde tutmazlar. Bu ağlarda kullanılan teknikler genelde, servis kalitesi, verinin doğru ve zamanında ulaştırılması gibi kriterleri birinci derecede ön planda tutarlar. Bu sebeple, araştırmacılar, iletişim protokol yapısının hemen her seviyesinde bir yöntem geliştirirken, “düğümlerin daha az enerji harcamasını nasıl sağlayabiliriz?” sorusuna cevap aramaya odaklanmışlardır.

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda enerji korunumu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır ve birçok bilim adamı da yapılan bu çalışmaları inceleyen bilimsel makalelerinde, yapılan bu çalışmaları çok değişik kategoriler altında sınıflandırmışlardır [20]. Ancak, çok detaylı alt sınıflandırmalara girmeden, yapılan bu çalışmaları ana hatlarıyla dört ana başlık altında toplayabiliriz:



Şekil 2.4: Enerji korunum tekniklerinin sınıflandırılması

Yapılan çalışmalarda, algılayıcı düğümün en fazla enerji tüketen birimlerinin, veri toplama ve veri iletim haberleşme alt birimleri olduğu tespit edilmiştir [20]. Örneğin, bir bitlik verinin iletimi sırasında düğümler tarafından harcanan enerji miktarının, birkaç bin adet verinin işlemcide işlenmesi sırasında harcanan enerji miktarına eşit olduğu belirtilmektedir [23]. Bunun yanı sıra, düğümlere ait radyonun, boş durumdayken, yani herhangi bir iletim ya alım işlemi yapmıyorken bile harcadığı enerji miktarının neredeyse veri alım iletimi yapıyormuşçasına fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, düğümlere ait radyoların veri alışverişi yapmadıkları zamanlarda çalışır durumda durmalarına gerek yoktur. Bunun yerine, veri iletimi yapılmayan zamanlarda, radyolar uyku durumuna geçirilerek, gereksiz enerji sarfiyatının önüne geçilmiş olunur.

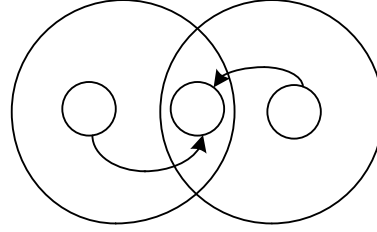
Düğümün radyolarının, veri iletimi sırasında aktif duruma geçip, işlemi gerçekleştirdikten sonra tekrardan uyku durumuna geçmesine Hizmet Çevrimi (Duty-cycling) adı verilmektedir. Ancak, hizmet çevrimi yöntemi ile ilgili dikkat edilmesi gereken husus, düğümlerin uyku-uyanma zamanlarının bir şekilde birbirleriyle koordine edilmesi gerektiğidir. Şöyle ki, eğer bir düğüm veri iletimi yapacaksa, verisini göndereceği, komşuluğundaki düğümlerden seçtiği bir sonraki durak düğümün alıcısının açık, yani uyanık durumda olması gerekir. Bütün ağ yapısı boyunca uyku-uyanma periyotlarının senkronizasyonu güç bir olaydır. Bilim adamları da hizmet çevrimi yöntemi ile ilgili birçok çalışmalar yapmış, yapmaya da devam etmektedir [20].

Veri yönlendirme teknikleri de, Kablosuz Algılayıcı Ağlarda enerji korunumu yönünden çok büyük önem arz etmektedir. Veri iletimi sırasında, mümkün olduğunca, daha fazla enerjiye sahip düğümlerin kullanılması esas amaçtır. Bu şekilde, enerji seviyesi düşük olan düğümler, veri iletiminde daha az görev alacak, böylece ağ yapısının ömrü uzayacaktır. Yük dağılımının mümkün olduğunca eşit dağıtılması amaçlanan bu yöntemlerdeki en büyük problem, bir düğümün veri toplama merkezine iletilmek üzere verisini yola çıkarırken bir yol belirleyebilmesi için, ağdaki bütün düğümlerin enerji seviyeleri hakkında bilgi sahibi olması gerekir. Ağdaki bütün düğümlerin, kendi enerji seviyelerini komşuluklarına yayın yapması ve bu bilgilerin tekrardan bütün ağ yapısı üzerinde dolaşması çok büyük miktarda enerji sarfiyatına ve ağ üzerinde de tıkanıklığa yol açar. Ayrıca, bu bilgi dolaşımı bir kereye mahsus olmayacak; düğümler, enerji harcadıkça, yenilenmiş enerji seviye bilgilerini, ağdaki diğer bütün düğümlerle paylaşmak zorunda kalacaklardır. Bu sebeple, ağ üzerinde global bir bilgi dolaşımının ve dolayısıyla da enerji sarfiyatının önüne geçebilmek amacıyla, bilim adamları değişik yönlendirme teknikleri üzerinde çalışmaya devam etmektedirler.

Diğer bütün ortak iletim hattı paylaşımli ağ yapılarında olduğu gibi, iletişim performansını belirleyen en önemli etkenlerden birisi de iletim hattı erişim (Medium Access Control) protokolüdür. MAC protokolünün başlıca vazifesi, ortak iletim hattına erişmeye çalışan düğümlerin, girişimlerini bir şekilde kontrol altında tutarak, muhtemel bir çakışmayı engellemektir. Bu amaçla, birçok MAC protokolü tasarlanmış ve uygulamaya sunulmuştur. Bunlardan bazıları, zaman paylaşımli çoklu ortam erişimi

(TDMA), kod paylaşımli çoklu ortam erişimi (CDMA), frekans paylaşımli çoklu ortam erişimi (FDMA) ve 802.11 [36] 'in kullandığı yarışma bazlı (contention-based) protokolleridir [37].

Veri iletimi yaparken, aynı komşuluk içerisindeki, yani birbirinin kapsama alanı içerisindeki düğümlerin ortak iletim hattına aynı anda veri göndermeleri çakışmaya (collision) sebep olur. Kablosuz ağlarda çakışmayı önlemek amacıyla uygulanan en yaygın MAC protokolü CSMA/CA 'dır. Kablosuz ağlarda, ortak iletim hattı müsait olmasına rağmen, Şekil 2.5 'deki gibi, alıcıya, başka bir düğüm tarafından veri gönderiliyor olabilir. Buna, Hidden Terminal problemi denmektedir.



Şekil 2.5: Hidden Terminal problemi

Şekil 2.5 'deki örnekte, A ve B düğümleri ile B ve C düğümleri birbirlerinin kapsama alanları içerisinde. Ancak, A ve C düğümleri birbirlerinin kapsama alanı dışındadırlar. Kablolu ağlarda kullanılan standart CSMA yöntemleri uygulansaydı eğer, A ve C düğümleri, sadece kendi kapsama alanlarındaki var olan bir veri iletişimini hissedebilecekti. Ancak, ne A düğümü B 'nin sağ yanında, ne de C düğümü B 'nin sol yanında var olan bir iletişimden haberdar olabilir. Dolayısıyla, iki düğüm de, B 'nin müsait olduğunu varsayıp iletişime geçebilirler. Sonuçta, B düğümü üzerinde çakışma olur. Bunu engelleyebilmek amacıyla, kablosuz ağlar için önerilen ve 802.11'in de çakışma önleme mekanizmasının üzerine inşa edildiği RTS/CTS mekanizmasını ilk ortaya atan çalışmalar, MACA [38] ve MACAW 'dır [39]. RTS/CTS mekanizmasının çakışmaları önleme yönünden performansının incelendiği bir çalışmada [40], çoklu ortam girişim menzilin (interference range), veri iletim menzilinden (transmission range) fazla olduğu durumlarda, RTS/CTS mekanizmasının da yeterli olmadığı tespit edilmiş ve bu mekanizmayı destekleyici bir çalışma sunulmuştur.

Kablosuz Algılayıcı Ağlara uygun bir MAC protokolü tasarlanırken, daha önce de belirttiğimiz gibi, öncelikli olarak enerji tasarrufunu gözeten bir mekanizma üzerinde durulmalıdır. Diğer önemli bir konu ise, düğümlerin yer değiştirmesi ya da enerjilerinin tükenmesi sonucu devre dışı kalmaları gibi sebeplere bağlı olarak ağ yapısında meydana gelen değişikliklere adapte olacak şekilde tasarlanmalıdır. Diğer ağ yapısı çeşitlerinde dikkat edilen birincil derecedeki hususlar olan, iletim hızı, bant genişliği, gecikme gibi kriterler, Kablosuz Algılayıcı Ağ yapılarında ikincil plandadır. Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğümlerin enerji sarfiyatında önemli rol oynayan faktörlerin en önemlilerinden birisi çakışmadır (collision). Bir çakışma durumunda, iletilen verilerin düzgün alınamaması sonucu göz ardı edilerek tekrarının talep edilmesi ve paketlerin yeniden iletimi sonucu harcanan enerji, zaten enerjisi sınırlı olan düğümlerin ömrünü iyice azaltmaktadır. Enerji sarfiyatını artıran diğer bir konu ise, düğümlerin, kapsama alanlarında meydana gelen her iletişime kulak misafiri (overhearing) olmalarıdır. Üçüncü faktör ise, kontrol paketlerinin çokluğudur. Kontrol paketlerinin alışverişi sırasında da enerji harcanacaktır. Dolayısıyla, çakışmayı engellemek amacıyla ağ üzerinde çok fazla kontrol paketi dolaşırsa, esas istenmeyen durum olan enerji sarfiyatının artmasına sebep olunur [37].

Yukarıda da belirtildiği gibi, Kablosuz Algılayıcı Ağlar için tasarlanan her protokolün, yöntemin veya yapının birincil hedefi, düğümlerin enerji sarfiyatını minimuma indirmek, dolayısıyla da ağın ömrünü maksimum seviyeye çıkartmak olmalıdır.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. ENERJİ KORUNUMUNDA HİZMET ÇEVİRİMİ İLE İLGİLİ TEKNİKLER

Önceki bölümde belirtildiği üzere, yapılan çalışmalarda, algılayıcı düğümün en fazla enerji tüketen birimlerinin başında, veri iletim haberleşme alt biriminin geldiği belirlenmiştir [20]. Gerçekleştirilen bir araştırmada, bir bitlik verinin iletimi sırasında düğümler tarafından harcanan enerji miktarının, birkaç bin adet verinin işlemcide işlenmesi sırasında harcanan enerji miktarına eşit olduğu sonucuna varılmıştır [23]. Bunun yanı sıra, düğümlere ait radyonun, boş durumdayken, yani herhangi bir iletim ya da alım işlemi yapmıyorken bile harcadığı enerji miktarının, neredeyse veri alım iletimi yapıyormuşçasına yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, düğümlere ait radyoların veri alışverişi yapmadıkları zamanlarda çalışır durumda durmalarına gerek yoktur. Bunun yerine, veri iletimi yapılmayan zamanlarda, radyolar uyku durumuna geçirilerek, gereksiz enerji sarfiyatının önüne geçilmiş olunur. Düğümlerin radyolarının, veri iletimi sırasında aktif duruma geçip, işlemi gerçekleştirdikten sonra tekrardan uyku durumuna geçmesine Hizmet Çevrimi (Duty-cycling) adı verilmektedir.

Hizmet Çevrimi ile ilgili yapılan çalışmalar, kendi içinde birbirini tamamlayıcı iki alt kategoriye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, bütün ağ yapısı üzerindeki bağlantılılığı (connectivity) sağlayabilecek minimum sayıda düğümlerin seçilmesi. Böylece, bu düğümlerin aktif durumda olup diğerlerinin uyku durumuna (sleep mode) geçme gibi enerji sarfiyatının minimum olduğu bir durumda beklemesi yöntemidir. Ağ üzerinde tam bağlantılılığı sağlayacak şekilde yeterli sayıda düğümlerin seçilmesine *Topoloji Kontrol (Topology Control)* denir. Böylece, bir ağ yapısı üzerinde bütün düğümlerin aktif olması durumundakine göre, sadece yeterli sayıda düğümlerin aktif kalması ile sağlanan enerji kazanımı ile ağ ömrü 2 ile 3 kat arasında artış göstermektedir [41-43]. Aktif düğümlerin de her zaman uyanık durumda olmalarına gerek yoktur. Herhangi bir haberleşme aktivitesi olmadığı durumlarda radyolarını kapatarak uyku durumuna geçebilirler. Bir haberleşme aktivitesi olması durumunda tekrar radyolarını açarak aktif



duruma geçebilirler. Bu yöntemde de, *Güç Yönetimi (Power Management)* denmektedir. Aslında bu iki yöntem, birbirlerini tamamlayıcı yöntemlerdir. İkisi beraber, Hizmet Çevrimi üst kategorisini oluştururlar [20].

Güç Yönetimi kategorisi, kendi içinde iki alt kategoriye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, *Uyku/Aktif Protokolleri (Sleep/Wakeup Protocols)* dediğimiz, enerji yönetim uygulamasının MAC üzerindeki bir katmanda gerçekleşmesidir. Bu katman, *Ağ (Network)* ya da *Uygulama (Application)* katmanı olabilir. Enerji yönetim tekniğinin, MAC katmanından bağımsız bir şekilde daha üst katmanlarda uygulanması, hem daha esnek bir yapı kazandırmış olur, hem de herhangi bir MAC katmanı protokolü ile kullanılabilmesini sağlar. Diğer bir yöntem ise, Güç Yönetimi tekniğinin MAC katmanında uygulanmasıdır. Bu teknikler, düğümlerin ortak kullandığı veri iletim ortamına erişim, düğümlerin aktif ya da uykuda olma durumlarına göre daha verimli bir şekilde optimize edilebilirler [20].

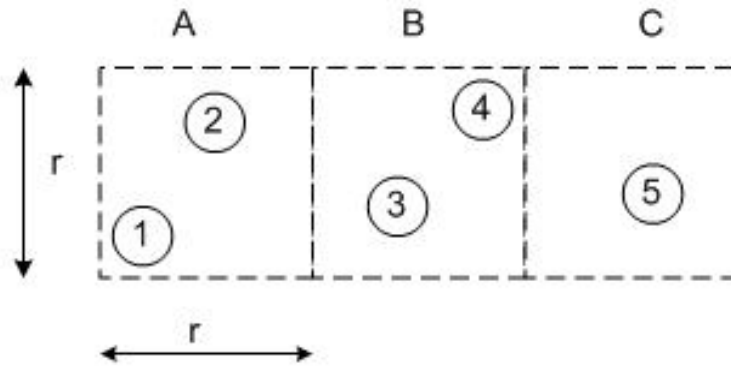
### **3.1.1 Topoloji Kontrol (Topology Control) Protokolleri**

Topoloji Kontrol Protokolleri, daha önce belirtildiği gibi, ağ içinde, veri aktarımını sağlayabilmek amacıyla gereksiz sayıda düğümün aktif durumda beklemesinin engellenmesi mantığı üzerine kurulmuştur. Hangi düğümlerin aktif durumda kalacağı, hangilerinin ise pasif yani uyku durumuna geçeceğine iki farklı yöntemle karar verilebilir. Yapılan çalışmalar, genelde bu iki yaklaşım üzerine kurulmuştur [20]:

#### *3.1.1.1 Konuma Dayalı (Location Driven) Protokoller*

Kablosuz Algılayıcı Ağlarla ilgili yapılan birçok çalışmada, ağ üzerindeki bütün düğümlerin, kendi coğrafi konumlarını ve en azından kendi kapsama alanındaki komşu düğümler ile veri toplama merkezi (Sink) 'nin coğrafi konumlarıyla ilgili yeterli bilgiye sahip olduğu varsayımı yapılmaktadır. Bunu sağlamanın da iki farklı yolu vardır. Birincisi, bütün düğümlerin, GPS denilen ve uydu haberleşmesi vasıtasıyla aygıtın konum koordinatlarını belirten bir aygıtı sahip olması yöntemidir. Teknolojideki gelişmeler, birçok elektronik aygıtın çok daha ucuz maliyetlerde üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu sayede, Kablosuz Algılayıcı Ağlardaki düğümlerin her birinin de böyle bir cihaza sahip olmaları zor ve maliyetli bir olay değildir. İkinci yöntem ise, ağ yapısı kurulum aşamasında, ağ üzerindeki düğümlerin coğrafi konumlarıyla ilgili bilgileri birbirleriyle haberleşmesidir.

Konuma Dayalı Protokollere verilebilecek en popüler ve referans sayılabilecek örneklerden bir tanesi GAF [44] adı verilen ve ağ yapısının sanal olarak “grid” denilen parsellere ayrıldığı çalışmadır. Bu çalışmada, Şekil 3.1 ’de görüldüğü gibi, topoloji, eşit büyüklüğe sahip parsellere dilimlenmekte, dolayısıyla, her bir düğüm de bir parselin içinde kalmaktadır. Böylece, her bir parselin içinde de birden fazla düğüm bulunmaktadır. Parsel ebatları öyle ayarlanmalıdır ki, komşu iki parselin birbirinden en uzak iki noktasında bulunan düğümlerin birbirlerinin kapsama alanı içinde olması gerekmektedir. Her bir parselde, aynı anda bir tane düğümün aktif kalması yeterli olacaktır. Böylece, parsel ebatları da uygun ayarlandığı takdirde, komşu iki parsel arasında veri iletimini sağlayabilecek iki adet düğüm her zaman mevcut olacaktır. Eşit yük dağılımını sağlamak amacıyla, her bir parseldeki aktif düğümler, bir müddet sonra aktif durumunu yani parsel içerisindeki veri iletim görevini bırakmalı, dolayısıyla da başkasına devretmelidir ki, hep aynı düğümler görevde kalıp enerjileri çabucak tükenmesin. Parsel içi veri iletim görevini üstlenmek amacıyla da düğümler kendi aralarında haberleşirler.



Şekil 3.1: GAF çalışmasında ağ yapısının gridlere bölümü.

Konuma Dayalı Protokollere örnek diğer bir çalışma ise, GERAF [45-47] adı verilen ve veri iletiminin, düğümlerin coğrafi konumlarına göre yapıldığı çalışmadır. Aslında, bu çalışma, daha çok coğrafi konum bağımlı yönlendirme algoritması olarak adlandırılabilir, duty-cycling özellikleri taşıdığından dolayı bu kategoride sınıflandırılmıştır [20]. Bu çalışmada düğümler, periyodik olarak aktif ve pasif durumları arasında gidip gelirler. Bir düğüm, genelde uyku durumundadır. Periyodik olarak, aktif duruma geçerler ve bu aktif durumda kalma süresinin başlangıcı dinleme periyodu denilen ve düğümlerin ortak iletim hattını, iletilmek üzere kendilerine yönelik herhangi bir verinin bulunup bulunmadığını kontrol ettikleri bölümdür. Bu dinleme sürecini takiben, eğer düğüm için

herhangi bir iletim görevi yoksa, düğüm uyku durumuna geri döner. Aksi takdirde, veri iletimi süresince aktif durumda olacak ve veriyi bir sonraki durağına iletmekle yükümlü olacaktır. Herhangi bir düğüm, veriyi iletmek üzere, bir sonraki durağı seçmek için kapsama alanını, verinin alıcısı doğrultusunda belli aralıklarla dilimlere böler. Verinin bir sonraki alıcısı olarak, alıcıya en yakın olan dilimdeki düğümler içerisinde birini seçer. Burada yapılacak seçimden bir sonuç çıkmazsa eğer, bu sefer bir gerideki bölgedeki düğümlerden bir aday seçilir ve süreç böylece devam eder.

### 3.1.1.2 Bağlanırlığa Dayalı (Connection Driven) Protokoller

Bu çeşit protokollerde, ağ üzerinde aktif kalacak düğümler belirlenirken, bütün ağ içi tam bağlanırlık esas tutulmaktadır. Diğer bir deyişle, ağ içindeki herhangi bir düğümde oluşturulan veri, veri toplama merkezine kadar sorunsuz ulaştırılabilir. Bu tarz çalışmalara verilebilecek en temel örneklerden birisi SPAN [48] adı verilen yapıdır. Bu çalışmada, aktif olan ve bağlanırlığı sağlayan düğümlere koordinatör adı verilmektedir. Koordinatör olmayan diğer düğümler, uyku durumundadırlar ve periyodik olarak uyanmaktadırlar. Periyodik olarak uyandıkları bu vakitlerde, kendilerinin koordinatör olarak görev yapmasının gerekip gerekmediğini kontrol etmektedirler. Eğer, komşu olan iki düğüm, direkt olarak birbirleriyle veya başka bir koordinatör üzerinden haberleşemiyorsa, yani bağlantıları yoksa o zaman, bu düğümün koordinatör olarak görev yapması gerekmektedir. Aynı anda iki düğüm birden aynı yerde koordinatör olmaya karar verebilir. Bunu engellemek için, düğümler, koordinatör olma kararını hemen almaz. İki düğümün aynı anda karar vermesini engellemek amacıyla, iki düğüm de zamanlamasını bir fonksiyona göre belirler. Bu fonksiyona etkileyen faktörler, yani değişkenler ise, düğüm aktif olduğu zaman bağlanırlık sağlayacağı düğüm sayısı ve düğümün kendi mevcut enerji miktarıdır. Bu faktörlerin birleşimiyle oluşan zamanlama değerleri aynı olmayacağından, iki düğümün aynı anda aynı komşulukta aktif olması önlenmiş olacaktır. Örneğin, mevcut enerjisi yüksek olan düğümün aktif olma şansı daha yüksektir. Böylece, ağın ömrü de uzamış olmaktadır. Çünkü enerjisi daha düşük olan düğüm aktif olursa, enerji harcayacak ve zaten düşük olan enerji seviyesi daha da azalacaktır. Bu da düğümün, dolayısıyla ağın ömrünün azalmasına neden olacaktır. Aktif olan düğümler de, ilelebet aktif olarak kalmamaktadırlar. Eğer kalırlarsa, yük dağılımı adaletsiz olacaktır. Çünkü bu takdirde, hep aynı düğümler iletim vazifesinde olurlar ve enerji harcarlar. Bu da, bu düğümlerin bir an önce enerjilerini tüketmelerine sebep olur. Bu sebeple, periyodik olarak, bu düğümler, komşuluklarındaki bütün

düğüm, direkt olarak veya aktif başka bir düğüm üzerinden bağlantıları varsa, kendisinin aktif durumda kalmasına gerek kalmadığına karar verir ve pasif duruma geçerek bunu komşularına duyurur [20].

ASCENT [49] çalışmasında ise düğümlerin pasif durumda olmaları, SPAN yapısındakinden farklıdır. Düğümler, pasif durumdayken uyku durumunda değildirler. Radyoları açıktır ve kapsam alanlarında yani komşuluklarında iletilen paketlerden haberdardırlar. Ancak, herhangi bir iletim görevinde bulunmazlar, pasif durumdadırlar. Unutulmaması gereken önemli bir nokta ise, düğümler, herhangi bir iletim görevinde bulunmasalar bile boş durumdayken açık tuttıkları radyoları iletim yapıyormuş derecesine yakın bir enerji sarfiyatı yapar. Aktif düğümler, eğer kapsama alanlarındaki mesaj kaybı oranı yükselirse, yardım çağrısında bulunurlar. Bu çağrıyı alan, komşu pasif düğümler, veri kaybını önlemek amacıyla, dolayısıyla bağlantırlılığını artırmak için aktif duruma geçerler. Yardım çağrısında bulunan sadece aktif durumdaki düğümler değildir. Veri toplama merkezi (Sink) de, veri kayıp oranı belirli bir seviyeye ulaştığında, pasif durumda olan düğümlere aktif duruma geçmeleri için çağrıda bulunur.

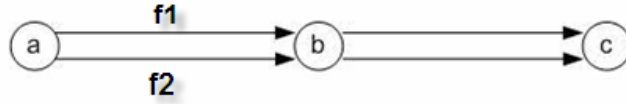
### 3.1.2 Güç Yönetimi Protokolleri

Güç yönetimi kategorisi altında toplanan protokoller aslında temel olarak, Uyuma-Uyanma (*Sleep-Wakeup*) çevrimi üzerinde odaklanmışlardır. Uyuma-Uyanma protokolleri, herhangi bir konum veya bağlantırlılık şartına bağlı olmadan, düğümlerin enerji sarfiyatının az olduğu uyku durumuna geçme ve gerektiğinde tekrar aktif duruma geçtikleri uygulamalardır. Bu tip protokollerin kullanıldığı uygulamalarda, bir düğüm, yalnızca başka bir düğüm kendisiyle iletişime geçmek istediği takdirde aktif duruma geçer. Diğer bütün durumlarda uyku durumundadır. Ancak, buradaki en önemli konu, zaten uyku durumunda olan bir düğümün iletim konusunda nasıl haberdar edileceğidir. Bunun için uygulanan en yaygın çözüm, düğümlerde iki adet radyo kullanılmasıdır. Bunlardan birisi, yüksek iletim hızına ve dolayısıyla yüksek enerji sarfiyatına sahip veri iletim radyosudur. Diğeri ise, düşük iletim hızına sahip, düşük enerji sarfiyatlı, düğümleri veri iletiminden haberdar etmek amacıyla kullanılan kontrol sinyallerinin iletiminde kullanılan radyodur. Uyuma-Uyanma protokolleri, daha çok hizmet çevriminin düşük olduğu, yani *olay tahrikli (event driven)* denilen, uygulamaya yönelik

herhangi bir olayın meydana geldiği durumda veri iletiminin olduğu uygulamalarda kullanılır. Diğer bütün durumlarda, düğümler uyku durumundadır [20].

### 3.2. ÖNERİLEN İŞ HATTI TEKNİĞİ İLE GELİŞTİRİLMİŞ UYKU-UYANMA PROTOKOLÜ (STEM WITH PIPELINING)

STEM [27] çalışmasında, yukarıda belirttiğimiz özelliklerin tamamını kapsayan bir uygulama geliştirilmiştir. Bu çalışmada, düğümler, Şekil 3.2. 'de görüldüğü üzere 2 adet radyo kanalına sahiptir. Ayrıca, ortak iletim bandı, kontrol sinyallerinin taşınacağı  $f_1$  ve veri sinyallerinin taşınacağı  $f_2$  frekansı olmak üzere ikiye ayrılmıştır.



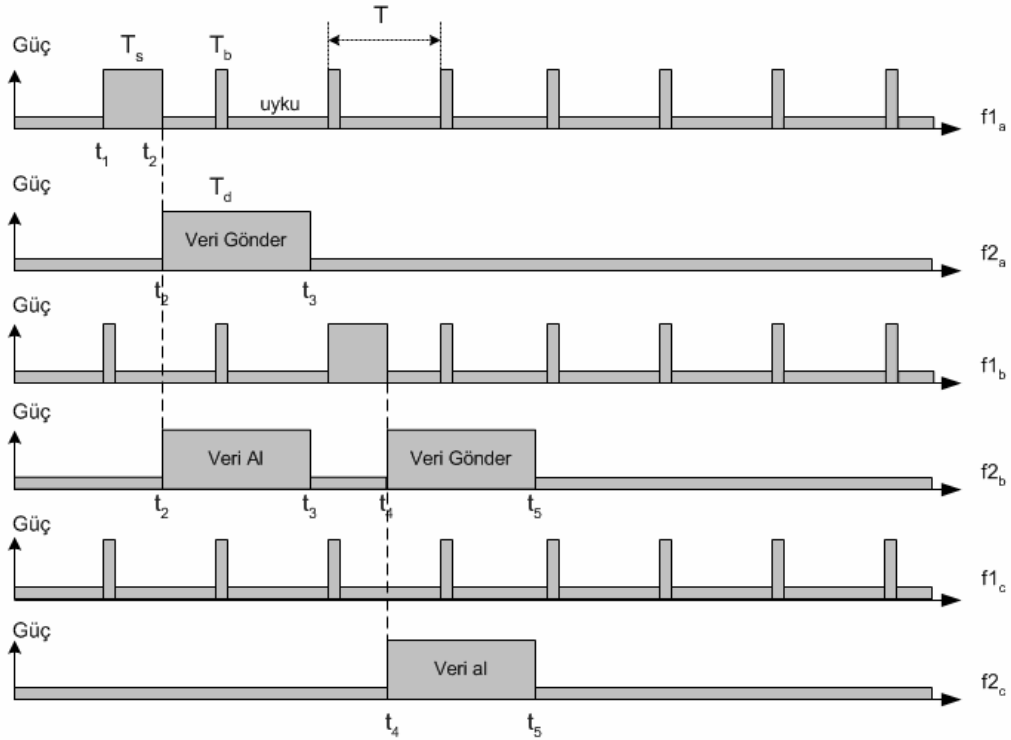
Şekil 3.2: Veri ve kontrol sinyal iletim kanalları.

Düğümler, radyo1 ile  $f_1$  üzerinden, radyo2 ile  $f_2$  frekansı üzerinden haberleşmektedirler. Normal durumda, bütün düğümlerin iki radyosu da kapalı vaziyettedir. Dolayısıyla, düğümler herhangi bir veri iletimi ya da alımı yapamazlar. Düğümler, periyodik olarak kontrol frekansına ( $f_1$ ) ayarlanmış kontrol radyosunu çalışır vaziyete getirerek, kendilerine yönelik iletilmek istenen herhangi bir veri olup olmadığının kontrolünü yaparlar. Eğer böyle bir durum mevcut ise, hemen,  $f_1$  üzerinden, verinin göndericisi olan düğüme bir onay mesajı (ACK) geri gönderirler. Ardından, hemen veri transferinin gerçekleşmesini sağlayabilmek amacıyla  $f_2$  'ye sabitlenmiş veri alım-iletim radyosunu çalışır pozisyona getirerek veri alımına başlar.

STEM çalışmasındaki en önemli dezavantaj, bir düğüm, verisini bir sonraki komşu düğüme iletmek istediği takdirde, hemen gönderim yapamamakta, en yakın uyanma periyodunu beklemek zorunda kalmaktadır. Bu durum da, belli bir miktar gecikmeye sebep olmaktadır. Gecikme konusunda bir iyileştirme çalışması tarafımızdan yapılarak, iş hattı tekniği (pipelining) eklenerek, düğümlerin uyanma zamanı beklenmeden ivedi olarak gönderim işlemine başlanmaktadır [50-52]. STEM ve P-STEM arasındaki farkı

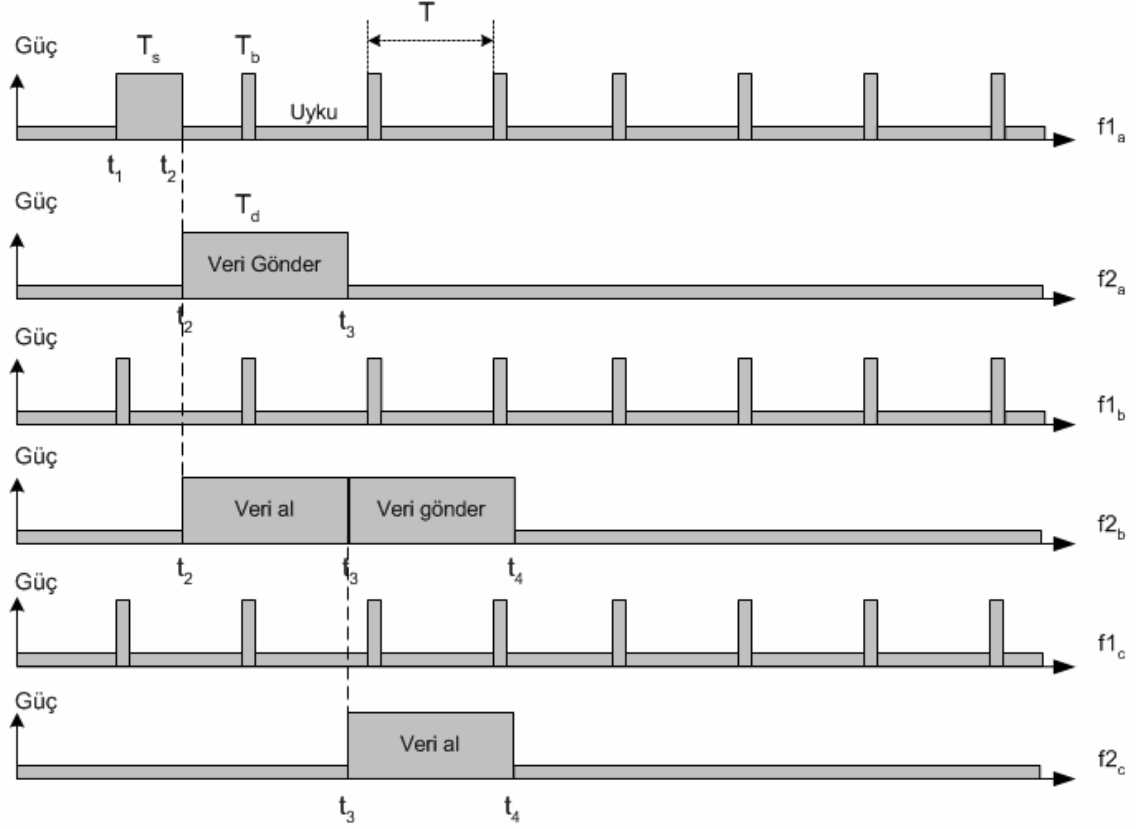
daha iyi anlayabilmek amacıyla, Şekil 3.3 ve 3.4 'ü incelemek faydalı olacaktır. Şekil 3.2 'de, basit bir topoloji örneği gösterilmektedir.

Bu örnekte,  $a$  düğümü tarafından üretilen paket,  $b$  düğümü üzerinden geçerek  $c$  düğümüne iletilecektir.  $a$  düğümü, paketi üretir üretmez,  $b$  düğümüne gönderememektedir.  $b$  düğümünün uyanma vaktini beklemek zorunda kalmaktadır. Uyanma vakti geldiğinde,  $a$  düğümü,  $f_1$  kanalı üzerinden  $b$  düğümüne kontrol sinyali gönderir. Aslında, iletim hattı radyo dalgaları olduğu için, paylaşılan ortak bir alandır. Dolayısıyla,  $a$  düğümünün gönderdiği kontrol sinyali, kapsama alanı içerisindeki bütün komşuları tarafından alınır.  $b$  düğümü haricindeki diğer komşular, kontrol sinyali içerisinde kendi adreslerini göremeyince paketi dikkate almazlar.  $b$  düğümü ise, kendisine iletilmek istenen bir veri olduğunu anlayınca, aynı kanal üzerinden geriye bir onay mesajı (ACK) gönderir. ACK mesajını alan  $a$  düğümü, veri transferine başlar. Bu sırada,  $b$  düğümü de veri radyosunu aktif hale getirerek, transfer işlemi başlar. Veriyi alan  $b$  düğümü, veriyi alır almaz,  $c$  düğümüne gönderemez. Bir sonraki uyanma periyodunu beklemek zorundadır. Uyanma vakti gelince, biraz önceki işlemler, aynen  $b$  ve  $c$  düğümleri arasında da gerçekleşecektir. Şekil 3.3, STEM protokolü uygulandığında paketlerin iletim sürelerini göstermektedir.



Şekil 3.3: STEM yapısında alım ve iletim zamanlamaları .

İş hattı eklenerek geliştirilmiş P-STEM yapısında ise, MAC katmanında kullanılan RTS/CTS mekanizmasından faydalanılmaktadır.  $a$  düğümü, veri göndermeden önce, ortak iletim hattına erişim sırasında oluşabilecek karışıklığı engellemek amacıyla, kontrol kanalı üzerinden RTS paketi gönderir. Tabii ki bu paketi göndermeden önce ilk uyanma periyodunu beklemesi gerekir. Vakit gelince,  $b$  düğümü uyanır ve RTS paketini alır. RTS paketi içerisinde kendi adresini görünce, veri radyosunu aktif hale getirir ve hemen geriye kontrol kanalı üzerinden bir CTS paketi gönderir. CTS paketi vasıtasıyla,  $b$  düğümünün komşuluğunda olan diğer düğümler veri transferinden haberdar olur ve böylece  $b$  düğümü ile bu süre zarfında herhangi bir veri alışveriş işlemine kalkışmazlar. Böylece, kablosuz haberleşmede yaygın bir problem olan “Hidden Terminal” probleminin önüne geçilmiş olur. Bu sistem zaten CSMA/CA MAC protokolü olarak bilinen protokol yapısında uygulanmaktadır.  $b$  düğümü, CTS paketini gönderirken, içerisinde kendisinden bir sonraki durak olan  $c$  düğümünü adresini koyar. CTS paketini alan  $c$  düğümü de kendisine paketin  $b$  düğümü tarafından ne zaman gönderileceğini artık bilir duruma gelir ve o zamanda kontrol radyosunu açık hale getirmiş olur. Böylece,  $b$  düğümü kendisine gelen paketi, bir sonraki uyanma zamanını beklemeden hemen gönderme imkanına sahip olmuş olur. Şekil 3.4, P-STEM protokolü uygulandığında, paketlerin iletim sürelerini göstermektedir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 ‘den de görülebileceği üzere, bu basit senaryoda bile çok önemli miktarda bir gecikme iyileşmesi sağlanmaktadır. STEM protokolünde kontrol sinyallerinin iletimi için kullanılan radyo, daha önce belirttiğimiz şekilde düşük enerjili radyo değildir. Veri iletiminde kullanılan radyo gibi aynı iletim gücüne ve enerji sarfiyatına sahiptir. Dolayısıyla da, bu radyo da devamlı uyku halindedir ve periyodik olarak aktif hale gelmektedir. Kontrol sinyallerinin iletimi için düşük kapasiteli ve düşük enerji sarfiyatlı bir radyo kullanılmasının dezavantajı ise verinin iletilmek istendiği düğüm, iletmek isteyen düğümün veri iletebilme komşuluğunda olsa bile, kontrol radyosunun iletim kapsama alanı düşük olduğu için, hedef düğüm uyandırılmayacaktır.



Şekil 3.4: P-STEM yapısında alım ve iletim zamanlamaları.

Birden fazla radyo kullanmanın avantajı, veri iletimi için kullanılan yüksek enerjili bir radyonun devamlı açık halde tutulmasına gerek kalınmamasıdır. Ayrıca, veri ve kontrol sinyalleri ayrı frekanslar üzerinden ayrı radyolar vasıtasıyla gönderilerek muhtemel çakışmaların önüne geçilmektedir. Dezavantajı ise düşük enerji sarfiyatlı bile olsa, birden fazla radyo kullanınca daha fazla enerji sarfiyatı olmaktadır. Bunun çözüm yöntemlerinden birisi yukarıda bahsettiğimiz gibi, her iki radyonun da uyku durumunda kalıp, periyodik olarak uyanmasıdır. Enerji sarfiyatına önerilen alternatif çözümlerden bir diğeri de, göndericiden gelen uyandırma sinyalinin enerjisi vasıtasıyla tetiklenerek uyanan bir radyo yapısı kullanmaktır. Bunun için, RFID sistemlerinde [53] olduğu gibi, gelen işaretin enerjisini alarak kullanacak ve bunu radyoyu uyandırmak için kullanacak bir radyo tetikleyici devrenin tasarlanması gerekmektedir. Bu yöntemin bir dezavantajı ise, uyandırma mesajı gönderebilme mesafesindeki sınırlamadır. Basit bir devre tasarımıyla, bu mesafe ancak 3m civarındadır [20]. İletim mesafesi kısıtlamasına çözüm için katkıda bulunan çalışmalardan birisi de RTWAC [54] adı verilen ve iletim mesafesini 7,5 m civarlarına çıkartan çalışmadır.



### 3.3. ENERJİ KORUNUMUNDA YÖNLENDİRME KATMANI İLE İLGİLİ TEKNİKLER

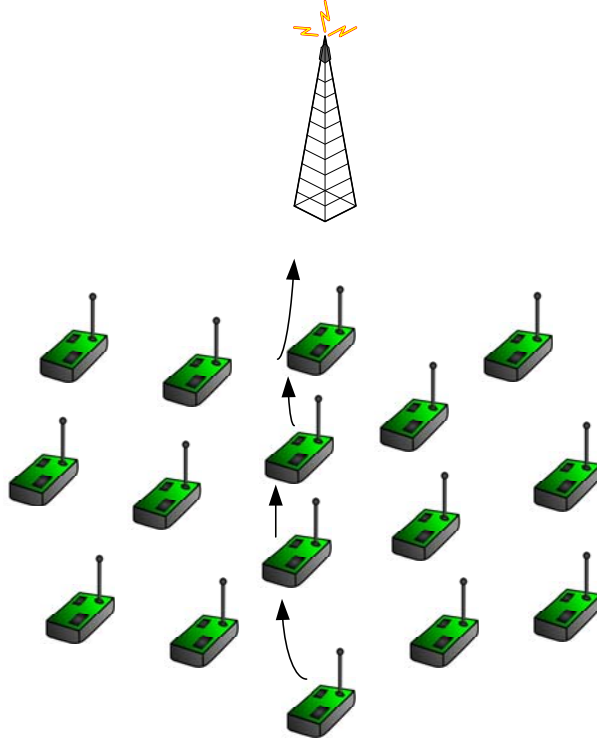
Klasik kablolu ağlar ve diğer geleneksel kablosuz ağlar için uygulanan yönlendirme metotları, Kablosuz Algılayıcı Ağlar için elverişli değildir. Bu ağ yapılarının enerji kısıtları olmadığı için, yönlendirme metotları geliştirirken dikkate alınan en önemli kriterler, verinin mümkün olduğunca kısa zamanda, en kısa yoldan, daha fazla bant genişliğine sahip yolları tercih etmesi vb. Verinin kısa zamanda, gerekli yerlere ulaştırılması, özellikle askeri ve sağlık gibi alanlarda hayati önem taşıyabilmektedir. Ancak, bütün uygulamalar, bunlar gibi veri iletiminde kaynaklanan gecikmelere karşı hassas değildir. Bu tip uygulamalar için, verinin en kısa zamanda iletilmesini sağlayacak yolların tercih edilmesinden ziyade, ağ yapısının ömrünü uzatacak alternatif yolların tercih edilmesi çok daha faydalı olacaktır. Örneğin, bir düğümden çıkan bir paket dizisinin, veri toplama merkezine doğru en kısa yolu tercih etmesi durumunda, bütün paketler, hep aynı düğümler üzerinden geçer. Bu da, hep aynı düğümlerin iletim yükünü üstlenmesine, dolayısıyla da enerji tüketmelerine yol açar. Böylece bu düğümler, diğer düğümlere göre çok daha önce enerjilerini tüketirler ve görev yapamaz hale gelirler. GPSR [55] adı verilen yöntemde, düğümler paketlerini yönlendirirken, veri toplama merkezi ve komşuluğundaki bütün diğer düğümlerin coğrafi pozisyonları hakkında bilgi sahibidirler. Böylece, paket yönlendirmeleri yapılırken düğümlerin konumları çok büyük önem arz etmektedir. Bu yöntemde gönderici düğüm, komşuluğundaki bütün düğümler ile veri toplama merkezi arasındaki fiziksel mesafeyi hesaplayarak, paketini veri toplama merkezine en yakın konumda bulunan düğüme yönlendirir. Ancak, bu yöntemde de görüldüğü üzere, paketlerin mümkün olduğunca en kısa yolu tercih etmesi düşünülmektedir. Halbuki, enerji seviyeleri hiç bir şekilde dikkate alınmamaktadır.

Bu sebeple, Kablosuz Algılayıcı Ağlar için tasarlanan yönlendirme tekniklerinde gözetenilmesi gereken en önemli kriter enerji korunumu olmalıdır. Bunu da sağlamanın en önemli yolu, yük dağılımını mümkün olduğunca dengeli bir şekilde sağlayabilmektir. Diğer bir deyişle, paket iletimi sırasında, mümkün olduğu kadar enerjisi fazla düğümlerin tercih edilmesidir. Tezimizin ikinci aşamasında, bir önceki aşamada anlatılan iş hattı tekniği ile geliştirilmiş olan P-STEM yapısının üzerine, enerji

korunumlu bir yönlendirme metodu geliştirdik. Simülasyon sonuçlarında elde ettiğimiz verilere göre, GPSR yöntemi ile karşılaştırıldığında %40 'a varan bir enerji korunumu, dolayısıyla da ağ ömründe uzama tespit ettik.

### 3.3.1. Önerilen Çoklu Veri Toplama Merkezli Yük Dengeli Enerji Verimli Yönlendirme Algoritması (LEERA-MS)

Kablolu haberleşmede kullanılan klasik *en-kısa-yol (Shortest Path)* gibi algoritmalar, kablosuz algılayıcı ağlar için her zaman uygun olmayabilir. Bunun sebebi, Şekil 3.5 'de de görülebileceği üzere, bir kaynak düğümden çıkan bütün paketler hep aynı yolu takip eder. Dolayısıyla da, hep aynı yol üzerinde yer alan düğümler paket iletim işleminde görev alırlar ve hep aynı düğümler enerji sarf etmek zorunda kalırlar. Bu da, adil bir yük dağılımının önüne geçmiş olur.



Şekil 3.5: En kısa yol örneği.

Şekil 3.5 'de açıkça görüldüğü üzere,  $N_0$  'dan yola çıkan bir paket, en kısa yol algoritmasına göre her zaman  $N_4 \rightarrow N_{15} \rightarrow N_7$  yolunu takip edecektir. Bu sebepten dolayı, yük bu düğümlerin üzerine düşecek ve bu düğümlerin enerjileri bir süre sonra tükenecektir.

Enerji verimli yönlendirme algoritmaları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, genel olarak iki ana grup altında toplanmıştır. Bunlardan ilki, bütün ağ üzerindeki düğümlerin birbirlerinin enerji seviyeleri hakkında bilgi sahibi olmaları ilkesine dayanmaktadır. Bu bilginin bütün düğümlere sağlanabilmesi için büyük miktarda mesajlaşma gerekmektedir. Bu mesajlar ya periyodik olarak, ya da bir enerji değişikliği oluştuğunda gönderilir. Ancak, bu mesajların gönderilmesi işlemi enerji harcanması gerektiren bir işlemdir ve zaten kablosuz algılayıcı düğümlerde çözülmesi gereken problemin kendisidir. İkinci grup altında toplanan çalışmaların temel aldığı mantık ise, paketleri yönlendirme kararı verirken, sahip olunan yerel bilgilere göre karar verilmesidir. Diğer bir deyişle, düğümler, bütün ağdaki düğümlerin enerji seviyelerinin bilmek yerine sadece kendi komşuluğundaki düğümlerin enerji seviyeleri hakkında bilgi sahibidirler. Yerel bilgi ise iki şekilde sağlanabilir. Bunlardan ilki, komşuluk içindeki her düğümün periyodik olarak komşuluğuna, enerji seviyesi hakkındaki bilgiyi yayımlamasıdır. Diğer yöntem ise, bizim bu çalışmada sunduğumuz, RTS/CTS mesajları vasıtasıyla bu bilginin edinilmesidir. İş hatlı STEM çalışmasında, hem gönderici, hem de alıcı düğümün komşuluğundaki düğümler, bu iki düğüm arasında gerçekleşecek iletimin miktarı hakkında bilgiyi zaten RTS/CTS içerisinde yerleştirilmiş olan alanlardan elde edebiliyor. Bu, RTS/CTS mesajının içerisine, gönderici ve alıcı arasındaki mesafe de eklendiği takdirde, bu iki düğümün komşuluğundaki diğer bütün düğümler, gönderici ve alıcıdaki harcanacak enerji miktarını hesaplayabilirler. Gönderici ve alıcı taraflar arasında gerçekleştirilen bu RTS/CTS yayımını alan komşu düğümler, hem alıcı hem göndericinin enerji seviyelerini, kendi sahip oldukları tablolarda, Eşitlik (3.1 –3.4) ‘e göre güncelleyerek, bir sonraki veri iletim işleminde, mümkünse bu düğümleri kullanmama eğilimine giderler.

$$E_{snd}(l,d) = E_{snd-elec}(l) + E_{snd-amp}(l,d) \quad (3.1)$$

$$E_{snd}(l,d) = (l * E_{elec}) + (l * \epsilon_{fs} * d^2) , d < d_o \quad (3.2)$$

$$E_{snd}(l,d) = (l * E_{elec}) + (l * \epsilon_{mp} * d^4) , d \geq d_o \quad (3.3)$$

$$E_{rcv} = l * E_{elec} \quad (3.4)$$

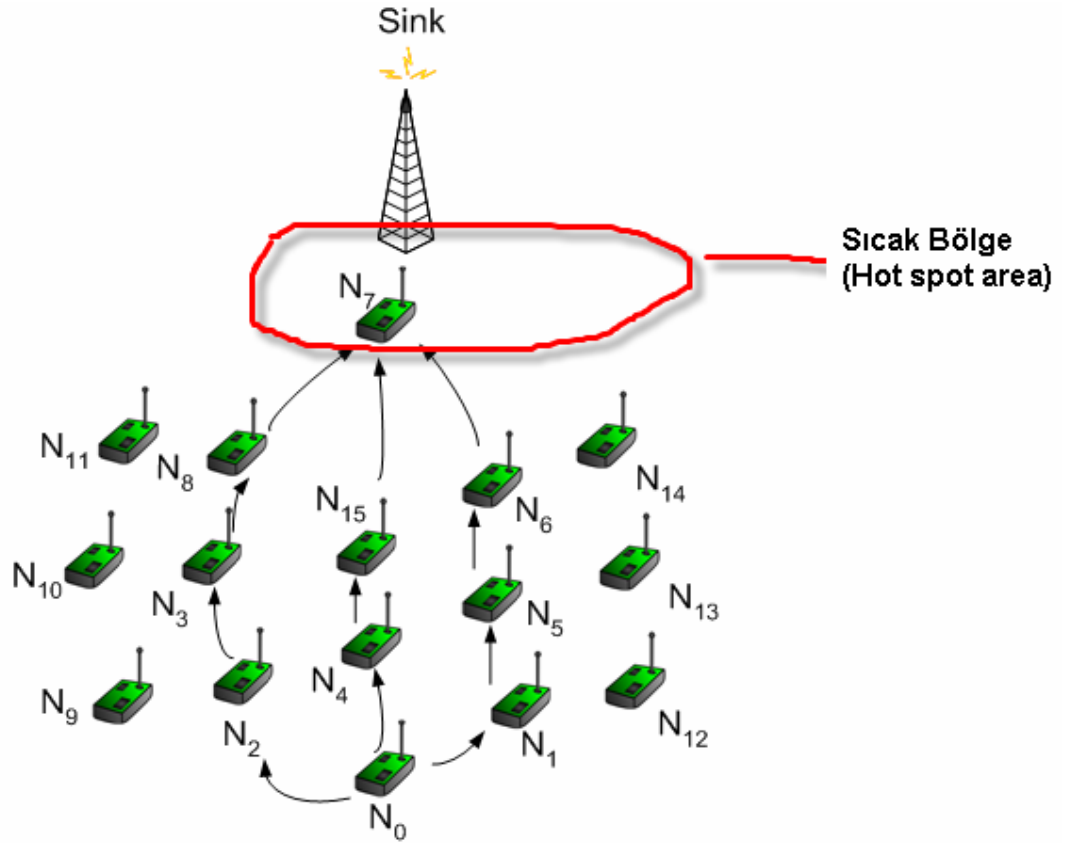
Veri alışı verişi sırasında düğümlerin harcadıkları enerji miktarları literatürde yukarıdaki eşitliklere göre hesap edilmektedir. Eşitliklerdeki  $E_{snd}$  and  $E_{rcv}$  ifadeleri sırasıyla, veri

gönderim ve alım işlemleri sırasında harcanan enerji miktarlarını göstermektedir. Denklemlerde görülen  $l$  ise, iletilen veri miktarının kaç bitten oluştuğunu göstermektedir.  $d$  ise, iki düğüm arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Bilindiği üzere, veri alışverişi yapan iki düğüm arasındaki mesafe eğer yukarıdaki eşitliklerde  $d_0$  ile gösterilen eşik mesafesinden (*threshold distance*) az olduğu takdirde, gönderici düğümün harcadığı enerji miktarı Eşitlik (3.2) 'e göre, fazla olduğu durumda ise Eşitlik (3.3) 'e göre hesaplanmaktadır. Açıkça görüldüğü gibi, iki düğüm arasındaki mesafe arttıkça, harcanan enerji miktarı da üstel orantılı olarak artmaktadır.

Önerdiğimiz yöntemde, ilk aşamada  $N_0$  'ın bütün komşuları aynı enerji seviyesine sahip olduğundan dolayı,  $N_0$  'dan çıkan ilk paket,  $N_4 \rightarrow N_{15} \rightarrow N_7$  üzerinden geçerek veri toplama merkezine ulaşır. İkinci paket için ise aynı düğümler tercih edilmez.  $N_4$ , ilk paketin iletiminde görev aldığı için, bu sefer, diğer komşulardan biri tercih edilmelidir.  $N_4$  haricindeki komşulardan veri toplama merkezine en yakın olanı tercih edilir.  $N_1$  düğümünün, veri toplama merkezine en yakın olduğu varsayımını yapalım.  $N_1$  'den sonraki iletim görevi için ise adaylar  $N_4$ ,  $N_5$  ve  $N_{13}$  düğümleridir.  $N_4$ , ilk paketin iletiminde görev aldığı için, geriye iki alternatif kalmaktadır,  $N_5$  ve  $N_{13}$ .  $N_5$ , veri toplama merkezine,  $N_{13}$  düğümünden daha yakın olduğu için bir sonraki durak olarak seçilir. Bir sonraki iletim durağı için ise adaylar,  $N_{15}$  ve  $N_6$  düğümleridir.  $N_{15}$ , ilk paketin iletiminde görev aldığı için, bu sefer  $N_6$  tercih edilir.  $N_6$ , veri toplama merkezine direkt olarak iletim yapamayacağından, paketi  $N_7$  üzerinden veri toplama merkezine iletir. Aynı strateji izlenerek, üçüncü paket,  $N_2 \rightarrow N_3 \rightarrow N_8 \rightarrow N_7$  düğümleri üzerinden geçerek veri toplama merkezine ulaşır.

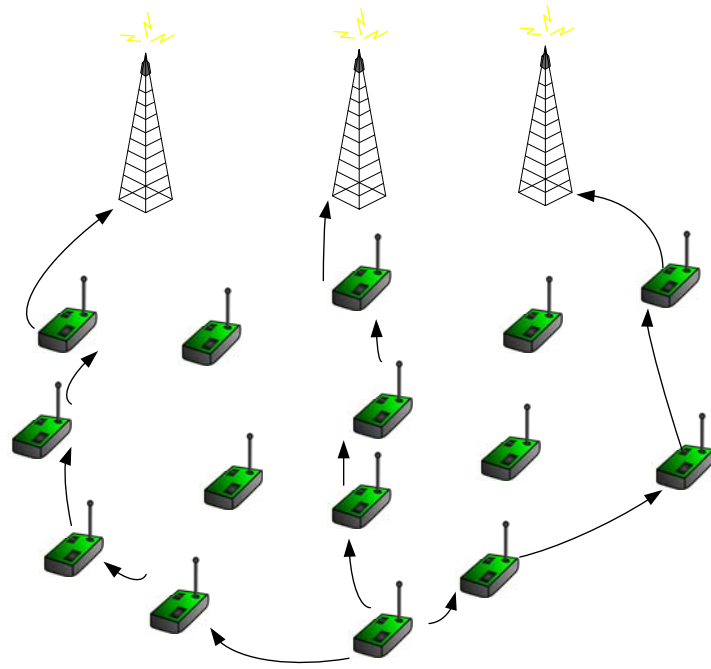
Aynı kaynak düğümden birden fazla paketin ardı ardına veri toplama merkezine doğru yola çıkması durumunda, topolojinin ortalarındaki düğümler üzerindeki ortak hat kullanımından dolayı çakışmalar meydana gelecektir. Paket yoğunluğunun artmayla birlikte oluşacak bu çakışmalardan dolayı paket kayıpları yaşanmaması için, her düğüm, CSMA/CA tarzı bir MAC algoritması uyguladığından, uzun gecikmeler meydana gelebilir. Bir de buna, periyodik uyku-uyanma mekanizmasının bekleme zamanları eklenince, paketlerin veri toplama merkezine ulaşmalarında büyük gecikmeler ortaya çıkabilir.

Bu çalışmada sunulan çözüm ise, birden fazla veri toplama merkezi kullanarak, yükün mümkün olduğunca fazla düğüm üzerine dağıtılmasıdır. Ağda, sadece bir tane veri toplama merkezi kullanılsaydı, Şekil 3.6 'da görüldüğü gibi, veri toplama merkezi ile kaynak düğüm arasındaki doğrultu civarında kalan düğümler üzerinde bütün trafik yoğunlaşmaktadır. Trafik bu doğrultuda yoğunlaştığından dolayı, bu doğrultu etrafında görev alan düğümlerin ömürleri diğerlerine göre daha az olmaktadır. Ayrıca, paket veri toplama merkezine yaklaştıkça, mecburi olarak en son kendisini veri toplama merkezine iletecek düğüme ulaşmak isteyecektir. Bütün paketler için böyle olduğu takdirde, veri toplama merkezi yakınında konumlanmış olan düğümler, ağ üzerinden gelen bütün paketlerin, veri toplama merkezi öncesi son istasyonlarıdır. Dolayısıyla, veri toplama merkezi yakınında konumlandırılmış olan algılayıcı düğümler, enerjisi en hızlı tükenen ve ömrü en kısa olan düğümlerdir. Buna *sıcak bölge (hot-spot)* problemi denmektedir [16]. Şekil 3.7 'de görüldüğü üzere, birden fazla veri toplama merkezi kullanıldığı takdirde, düğümler paketleri iletirken, kendilerine en avantajlı konumda olan veri toplama merkezini seçerek iletim yaparlar. Böylece, Şekil 3.6 'daki gibi  $N_7$  düğümünün bütün yükü çekmesinden ziyade,  $N_{11}$ ,  $N_8$  and  $N_{14}$  bu yükü paylaşacaklardır.



Şekil 3.6: LEERA ile örnek uygulama.

LEERA-MS yapısında, ağ yapısı, dikey olarak parsellere bölünmektedir. Her parsel, bir veri toplama merkezine aittir. Her düğüm, içinde kaldığı parselin ait olduğu veri toplama merkezini referans almaktadır. LEERA-MS yapısında, bir sonraki durak seçilirken, öncelikle enerji seviyeleri göz önüne alınır. Eğer bütün komşuların enerji seviyeleri eşit ise, bu sefer ait olunan veri toplama merkezi ile en uzak açı yapan düğüm seçilir. Daha uzak açı yapan düğümün seçilme sebebi, önceden gönderilen paketler ile aynı doğrultuda bir yol izlenmeyerek, yükün mümkün olduğu kadar ağa yayılmasının amaçlanmasıdır.



Şekil 3.7: LEERA-MS ile örnek uygulama.

**Sink**

İlk paketin iletimi sırasında,  $N_0$  düğümünün bütün komşuları aynı seviyede enerjiye sahip oldukları için, LEERA 'da olduğu gibi ilk paket, veri toplama merkezine en yakın yol olan,  $N_4 \rightarrow N_{15} \rightarrow N_7$  düğümleri üzerinden geçecektir. İkinci paket için ise aynı yol kullanılmayacaktır.  $N_4$ , ilk paketin iletiminde kullanıldığından, ikinci paketin iletiminde  $N_0$  'ın diğer komşuları görev alacaktır. Bu sefer, kaynak düğümün referans veri toplama merkeziyle arasında en fazla açıyı yapan düğüm seçilecektir.  $N_1$  'in kaynak düğüm olan  $N_0$  'ın referans veri toplama merkeziyle en fazla açı yapan düğüm olduğunu kabul edelim.  $N_1$  'den sonraki durak,  $N_4$ ,  $N_5$  ve  $N_{13}$  arasından seçilecektir.  $N_4$ , bir önceki paketin iletiminde görev aldığından, bu defa muaf tutulmalıdır.  $N_5$  ve  $N_{13}$  olmak üzere

$N_{11}$

$N$

iki alternatif kalır.  $N_{13}$ ,  $N_5$  'e göre  $N_0$  'ın referans veri toplama merkezi ile daha büyük açı yaptığından, bir sonraki durak olarak seçilir. Birden fazla veri toplama merkezi olduğundan dolayı,  $N_{13}$  'ün komşuları arasından  $N_{14}$  direkt olarak bir veri toplama merkezine iletim yapabilir ve dolayısıyla da iletim işleminde görev alabilir. Aynı yöntem izlenerek, Şekil 3.7 'de görüldüğü gibi, üçüncü paket,  $N_2 \rightarrow N_9 \rightarrow N_{10} \rightarrow N_{11}$  hattını izleyerek veri toplama merkezine ulaşır.

### 3.3.2. Enerji Eşik Seviyeli Yük Dengeli Enerji Verimli Yönlendirme Algoritması (LEERA-TH)

Diğer bir alternatif yöntem ise, LEERA-MS algoritmasını enerji eşik seviyesi düşüncesi ile birleştirerek, gecikmeyi aza indirmektir. Bu yöntemde, düğümlerin enerji seviyeleri, önceden belirlenmiş olan eşik değerine ininceye kadar en kısa yol algoritması uygulanır. Eğer ki gönderen düğüm, veri toplama merkezine en yakın komşusu olan düğümün enerji seviyesi eşik değerinin altına inmişse, bundan sonra, LEERA-MS algoritmasına göre yönlendirme yapar.

## 3.4. KÜMESEL YAPILI KABLOSUZ AĞLARDA ENERJİ KORUNUMU İLE İLGİLİ TEKNİKLER

Kablosuz algılayıcı ağlarda, enerji sarfiyatını aza indirmek amacıyla sunulmuş en önemli yöntemlerden birisi de, ağ yapısını kümelerle bölme yaklaşımıdır. Daha önceden de bahsedildiği üzere, enerji sarfiyatına sebep olan en büyük etken veri iletim mekanizmasıdır. Bu sebepten dolayı, görevi aksatmadan, iletilen veri miktarını asgariye indirmek çok önemlidir. Bu düşünceden yola çıkarak, ağ üzerindeki bütün düğümleri verilerini merkeze iletmeye yerine, ağ yapısının kümelerle bölünerek, her bir kümede bir lider seçilip, kümedeki diğer düğümlerin verilerini bu lider düğüme iletmeye fikri esas alınmıştır. Lider düğüm de, kendi kümesi içerisindeki diğer sade düğümlerden gelen bu veriyi süzerek ya da özetini çıkararak, sadeleşmiş halini diğer komşu kümelerin lider düğümleri üzerinden veri toplama merkezine gönderir. Şimdiye kadar yapılan kümesel yapıları algılayıcı ağ çalışmalarında, genellikle küme içi haberleşme üzerine odaklanılmıştır. Halbuki, kümeler arası iletişim sırasında daha fazla enerji harcanmaktadır. Biz de tezimizin üçüncü aşamasında, kümesel yapıları, çoklu iletim kanallı bir ağ yapısında, jeton tabanlı bir yönlendirme algoritması üzerinde çalıştık.

Böylece, sadece küme içi iletişimi dikkate almayan, aynı zamanda kümeler arası iletim sırasındaki enerji sarfiyatını da göz önünde bulunduran bir yapı geliştirdik.

LEACH [56-57] adı verilen çalışma, birçok kümesel mantıklı çalışmaya öncülük ederek temel oluşturmuştur. LEACH yapısında, topoloji kümelere bölünmüştür. Her algılayıcı düğüm, sadece ve sadece bir kümeye aittir. Her bir kümenin rasgele seçilen bir küme lideri vardır. Küme liderliği görevi bir tur boyunca geçerlidir. Yeni tur başlama zamanında, küme liderliği görevi, küme içerisindeki başka bir düğüme geçmektedir. Küme lideri olmayan *sade düğüm* diye adlandırılan algılayıcı düğümler, ortamdan elde ettikleri fiziksel verileri, küme lideri olan düğümlere iletirler. Küme lideri, kendi kümesi içerisindeki düğümlerden aldığı bütün verileri kendi içerisinde belirli bir süzgeçten geçirdikten veya veri sıkıştırma işlemine tabi tutuktan sonra veri toplama merkezine iletir. Verinin süzgeçten geçirilmesi ve sıkıştırma gibi işlemler, *Data Aggregation* veya *Data Fusion* adı verilen yöntemler ile yapılmaktadır. Bazı çalışmalarda [58-60], bu yöntemlerden Data Aggregation metodunun enerji korunum performansı incelenmiştir. Veri süzme de adı verilen Data Fusion yöntemi ise uygulama bazlı denilebilecek bir metod olup, birden fazla kaynaktan gelen elektriksel işaretin sinyal işlemeye tabi tutularak, gürültüden arındırılmış, daha doğru işaretin elde edilmesi işlemidir [56].

PEGASIS [61], aslında LEACH 'in biraz daha geliştirilmiş bir halidir ve onu temel almaktadır. Ancak, PEGASIS 'de uygulanan yapı, kümeden ziyade bir zincir yapısıdır.

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda, kümeleme mantığı üzerine yapılan bir diğer çalışma ise HEED [62] adı verilen yöntemdir. Bu yöntemde, küme liderleri periyodik olarak seçilmektedir, ancak her turda değil. Liderlik seçiminde, düğümlerin kalan enerji seviyeleri ile ortalama ulaşılabilme güç miktarları (AMRP) dikkate alınmaktadır. Bir düğümün ortalama ulaşılabilme güç miktarı (AMRP), o düğüm küme lideri olduğu takdirde, küme içerisindeki diğer bütün düğümlerin veri iletişimi sırasında ona ulaşabilmek için harcayacakları enerji miktarıdır.

Diğer bir çalışmada ise [63], topoloji, iki seviyeli bir yapı şekli ile karakterize edilmiştir. Birinci seviye kümelere oluşmaktadır. İkinci seviye ise, kümelere toparlanan verinin çoklu-iletim şeklinde veri toplama merkezine iletilebilmesi için oluşturulan bir omurga



yapısıdır. Veri, birinci seviyelerdeki kümelerdeki sade düğümlerde elde edilerek, zaman paylaşımı mantığıyla küme liderlerine iletilir. Küme lideri ise, bu veriyi gene kendi kümesi içerisinde bulunan ancak omurga içerisinde görevli taşıyıcı düğüme iletir. Taşıyıcı düğüm ise kendisine gelen veriyi, taşıyıcı omurga üzerinde yer alan, veri toplama merkezi yönündeki diğer kümenin taşıyıcı düğüme iletir.

Kümesel ağ mantığına örnek bir diğer çalışmada [64], kümelerin oluşmasını organize eden, veri toplama merkezidir. Küme içi haberleşme LEACH 'dekine benzerdir. Ancak küme lideri periyodik olarak veya tur başına değişmez, sabittir. Lider düğüm, enerji yönünden sıkıntısı olmayan, ağ geçidi (gateway) adı verilen düğümdür. Bu düğümler, küme içinden kendisine iletilen tüm veriyi toplar, LEACH 'teki gibi süzgeçten geçirerek veri toplama merkezine iletirler.

Zigbee / 802.15.4 protokolü [65] üzerine bina edilmiş bir başka çalışmada [66] ise, ağaç yapısındaki ağ topolojisinde oluşturulan kümeler, ZigBee protokolünün ağaç yapısındaki adresleme mantığı kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmanın ana amacı, kümelerin uyuma-uyanma periyotlarını organize edecek ve aynı zamanda da kümeler arası veri çakışmasını engelleyecek bir çizelge tasarlamaktır.

Bir başka çalışmada ise, veri toplama merkezinden başlayarak iteratif bir şekilde bütün topolojinin dolaşılıp, kümelere bölünmesi işlemi gerçekleştirilmiştir [67].

### **3.4.1. Önerilen Çok Kanallı Kümesel Yapılı Kablosuz Algılayıcı Ağ Yapısında Enerji Korunumlu Jeton Tabanlı Yönlendirme**

Küme oluşumu ve düğümlerin küme aidiyet bilgilerinin duyurulması işlemleri, ağın kurulum (setup) aşamasında gerçekleşmektedir. Algılayıcı düğümlerin, coğrafi koordinatlarını, bir coğrafi konumlama sistemi cihazına sahip oldukları varsayımı yapılarak bildikleri varsayımı üzerinde durulmuştur. Bu bilgileri komşuluklarındaki bütün diğer düğümlerle paylaşmaktadırlar. Ayrıca, ağ yapısının etrafında sekiz adet veri toplama merkezi kullanılarak, yük dağılımının eşit bir şekilde yapılması sağlanmıştır.

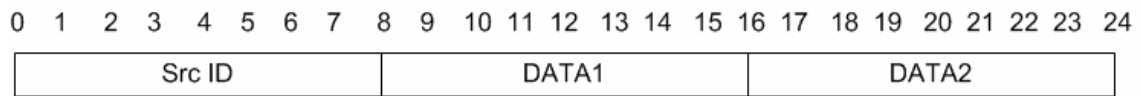
### 3.4.1.1. Küme İçi İletişim

LEACH 'de [56] olduğu gibi, her bir kümede bir lider vardır. Ancak, küme içi iletişim yönteminde LEACH 'e göre bazı farklılıklar uygulanmıştır. LEACH yapısında, çerçeveler zaman tabanında tanımlanmıştır. Yani, her bir iletim periyodu, düğüm sayısına göre alt zaman dilimlerine bölünmüş ve her bir alt dilim de birer düğüme tahsis edilmiştir. Düğümler, topladıkları veriyi küme liderlerine, kendilerine ayrılan alt zaman diliminde gönderirler. Zaman paylaşımli çoklu iletişimin (TDMA) klasik bir örneğidir. Bizim önerdiğimiz çalışmada ise, hücresele ağlarda uygulanan kod paylaşımli çoklu iletim mantığı kullanılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla, küme yapılı Kablosuz Algılayıcı Ağlarda, küme içi iletişim için şimdiye kadar CDMA yöntemi kullanılmadı.

Neredeyse hemen hepsi, ya TDMA, ya da CSMA/CA adı verilen yarışma bazlı rastgele çoklu erişim sistemini kullanmışlardır. Bu çalışmada, küme oluşturma işleminin yapıldığı kurulum aşamasında, her bir düğüme kendi kümesi içerisindeki diğer düğümlerinkiyle dikgen (*orthogonal*) olan kod ataması yapılmaktadır ve ağ yapısının ömrü boyunca bu kodlar sabittir. Ortak iletim alanına erişimde CDMA kullanmamızın sebebi, ihmal edilemeyecek derecedeki kapasite artışıdır.

Yapılan bir çalışmada, CDMA çoklu erişim sistemi, diğer çoklu erişim sistemleriyle karşılaştırılmış ve kapasite kazanımları incelenmiştir [68]. Yapılan araştırma ve deney sonuçlarına göre, FM / FDMA sistemi, 12 MHz 'lik bant genişliğine sahip bir hücrede, en fazla 60 kullanıcıya destek verebilmektedir. CDMA kullanıldığında ise, aynı bant genişliğinin sadece %10 'u kullanılarak 108 kullanıcıya kadar hizmet verilebilmektedir. Zaman paylaşımli çoklu erişim denilen TDMA yöntemi ise FM/FDMA 'e göre 3 katlık bir kapasite artışı sağlamaktadır. Buna rağmen TDMA 'in sağladığı kapasite, CDMA 'in kinin sadece altıda biridir.

Küme içi veri paketinin yapısı Şekil 3.8 'de gösterilmektedir:



Şekil 3.8: Küme İçi Paket Yapısı.

Algılayıcı düğümler verilerini liderlerine iletirken, kimlik numaralarını paketin içerisine koyarlar. Bu kimlik numaraları eşsizdir. Bu eşsizliği sağlamak için kimlik numarası olarak, düğümlerin coğrafi koordinatları kullanılabilir. Simülasyon çalışmalarında, kümelerin içerdiği düğüm sayısı kısıtlı olduğundan, kimlik numaraları için 8 bitlik bir alan yeterli görülmüştür. Data1 ve Data2 ile gösterilen alanlar ise, algılayıcı düğümlerin fiziksel ortamdan elde ettikleri verileri temsil etmektedir. Örneğin, sıcaklık ve nem gibi.

Düğümler, paket oluşturulduktan sonra, kurulum aşamasında kendilerine atanmış olan kodlar ile bu paketi kodlayarak küme liderine yollar. Her düğüm, kendi kümesi içerisindeki diğer düğümlerin kodlarından haberdardır. Dolayısıyla, bir düğüm küme lideri olduğu vakit, kendisine ulaşan toplanmış sinyalden, her bir düğümün verisini ayırt edebilme özelliğine sahiptir. Sade düğümler, verilerini küme liderlerine ilettikten sonra uyanık durumda durmalarına gerek yoktur. Bir daha ki fiziksel ortamdan veri elde etme periyoduna kadar uyku durumuna geçerler. Çünkü veri iletiminin bundan sonraki kısmı küme liderleri üzerinden gerçekleşecektir. Böylece, sade düğümlerin gereksiz yere enerji sarf etmelerinin önüne geçilmiş olunacaktır.

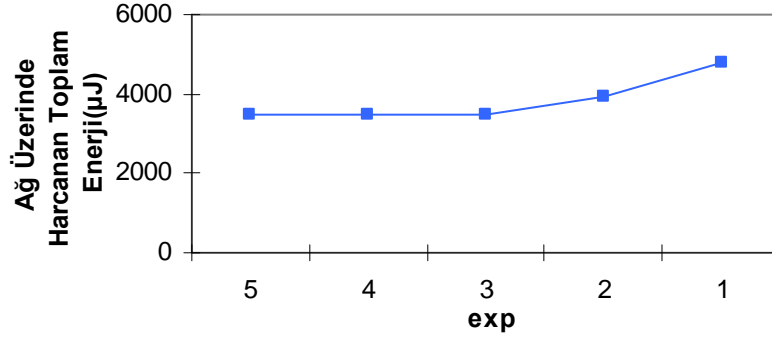
Her bir düğüm, küme liderliği görevini sırasıyla üstlenmektedir. Böylece, veri taşıma yükü, bütün düğümler arasında eşit olarak paylaşılacaktır. Veri toplama merkezlerine yakın bölgelerdeki kümeler, uzaktakilere göre daha büyük olduğundan daha fazla düğüm içermektedir. Böylece, yükü daha fazla olan bu bölgelerdeki düğümlere, küme lideri olma görevi, uzaktakilere göre daha az gelecektir.

Küme liderleri, küme içindeki diğer sade düğümlerden elde ettikleri veriyi, veri süzme yöntemiyle sadeleştirirler. Örneğin, bütün verinin iletilmesi yerine sadece maksimum ve minimum değerleri veya sadece ortalama değerini iletilmesi sağlanmaktadır.

#### 3.4.1.2 Jeton Tabanlı Maliyet Hesaplamalı Yön Bulma Algoritması (EETBR)

Küme liderleri, kendi kümelerinde topladıkları veriyi veri toplama merkezine doğru iletirken bir üst kuşakta yer alan bir sonraki aday kümelerin bilgilerine göre bir maliyet hesaplaması yaparak yönlendirme yapar. Maliyet hesaplaması Eşitlik (3.5) 'de belirtilen formüle göre yapılmaktadır.

$$CostFactor = (RsdEng_{CHi})^{-1} * d^{exp} \quad (3.5)$$



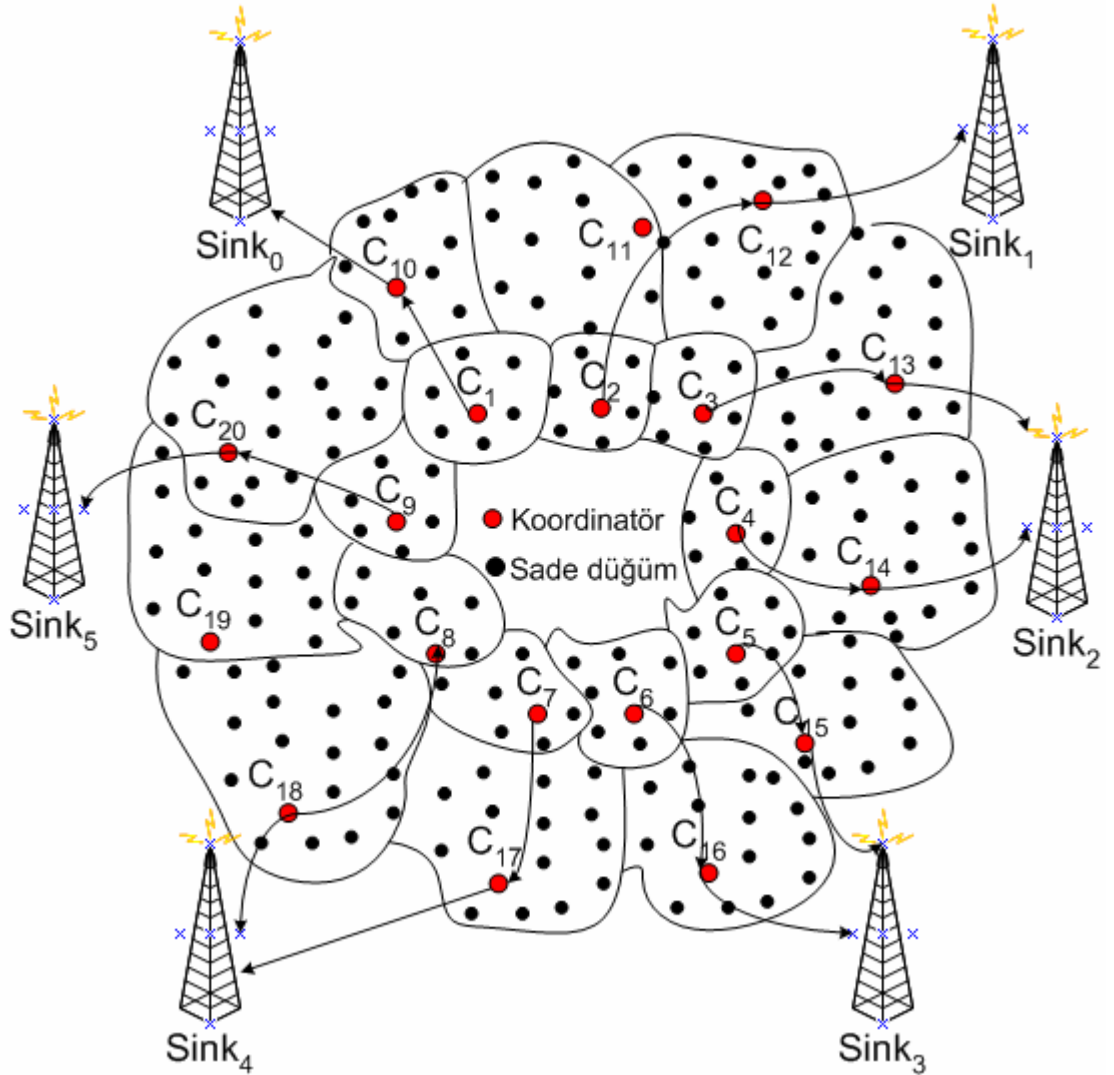
Şekil 3.9: exp değerine bağlı olarak enerji sarfiyatındaki değişim miktarı.

Eşitlik (3.5) 'deki  $RsdEng_{Chi}$ , i numaralı kümenin lider düğümünün kalan enerji seviyesini göstermektedir. Formüldeki  $d$  terimi ise paketi gönderecek lider düğüm ile aday kümedeki lider düğüm arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bir sonraki durak adayı olan kümelerin lider düğümlerinin hepsi için ayrı maliyet hesaplaması yapılarak, en düşük maliyetli olana paket iletilir. Şekil 3.9 'da da görüldüğü üzere  $exp$  için en uygun değer, yapılan simülasyonlar sonucunda 3 olarak belirlenmiştir.

Bir sonraki paket alıcısı yani durak seçiminde ilgilenilmesi gereken bir diğer konu da aynı kuşakta yer alan iki komşu kümedeki lider düğümlerin aynı hedef kümeyi ve lider düğümünü seçme olasılığıdır. İkisi de ayrı maliyet hesaplaması yapıp ve bunun sonucunda da aynı hedef kümeyi seçebilirler. Böylece, hedef kümedeki lider düğüm, bu iki kümeden gelen verilerin ikisini birden iletmek zorunda kalacaktır. Oysa yük dağılımını sağlamak amacıyla, verilerden bir tanesini başka bir lider düğümün iletmesi daha uygun olacaktır. İşte bunu sağlayabilmek amacıyla, diğer bir deyişle, aynı kuşakta yer alan iki komşu kümedeki lider düğümlerin aynı anda, aynı hedef küme liderini seçmesinin önüne geçmek için bir jeton mekanizması uygulanmıştır.

Önerdiğimiz jeton tabanlı hedef durak seçme mekanizmasını, Şekil 3.10 'da gösterilen örnek ağ yapısı üzerinde anlatacak olursak; ilk tur için en içteki kuşakta yer alan kümelerden kimlik numarası en küçük olan kümenin lider düğümü, hedef düğümü seçme önceliğine sahiptir. Bu da  $C_1$  ile gösterilen kümenin lider düğümüdür. Bizim önerdiğimiz maliyet hesaplamalı yönlendirme metoduna göre bir sonraki durak olarak  $C_{10}$  ile gösterilen kümenin lider düğümü hedef durak olarak seçilir. Hedef küme olarak  $C_{10}$  seçildikten sonra,  $C_1$  küme lideri tarafından jeton mesajının içerisine  $C_1$  'in kimlik

bilgisi yazılarak komşulara yayın yapılır. Bu jetonu alan komşu düğümler de ( $C_2$  ve  $C_9$ ), komşularının enerji seviye bilgilerini tuttıkları tablolarındaki ilgili alanları güncelleyerek,  $C_1$  kümesi ile ilgili kalan enerji seviyesi değerini azaltırlar.  $C_2$ , kendi hedef düğümünü seçerken, jetonun içerisindeki listede olmayan kümeyi seçer.  $C_{10}$ ,  $C_1$  tarafından seçilmiş olduğundan, hedef düğümler arasından  $C_{11}$  veya  $C_{12}$  arasından bir seçim yapar. Maliyet hesabı ve jeton bilgilerini dikkate alan  $C_9$  'un lider düğümü de,  $C_{20}$  'nin lider düğümünü hedef durak olarak belirler ve jetonun içerisine ekler. Bunlar da jetonları güncelledikten sonra komşularına yayınlarlar. Bu işlem, jetonlar  $C_5$  ve  $C_6$  'ya ulaşana kadar devam eder.  $C_5$  ve  $C_6$  da aynı işlemleri gerçekleştirdikten sonra jetonlarını yayınlarlar. Ancak, birbirlerinin yayınladıkları jetonları alacaklarından, tur numarası ve sıra numarası bilgilerini kontrol ederler ve jetonu iptal ederek dikkate almazlar.



Şekil 3.10: Çok katmanlı, kümesel yapı bir topoloji örneği

Anlatıldığı üzere, hedef durak seçerken dikkate alınan hususlar, maliyet hesabı ve aynı turda komşularla aynı seçimi yapmamak. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta ise, hedef düğüm seçim önceliğinin hep aynı sırada gitmemesine önem göstermektir. Bunu sağlamanın yolu da, bir turda en önce seçim yapan bir küme lideri, bir sonraki turda en son yapmalıdır. Bu şekilde, sıra mantığıyla yapılan bir uygulama sayesinde adil erişim hakkı sağlanmış olmaktadır.

Jeton yapısı Şekil 3.11 'de gösterilmektedir.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SrcID								RoundNumber								
SequenceNumber								SelectedNextHopClusterID								

Şekil 3.11: Jeton Yapısı.

Her bir düğümde, komşuluğundaki kümelerdeki düğümlerin enerji seviyeleri ve mesafe bilgilerinin tutulduğu *ResidualEnergyTable* tablosu bulunmaktadır. Dolayısıyla, hedef durak seçilirken yapılan ilk iş, öncelikle *ResidualEnergyTable* tablosuna bakarak bir maliyet hesabı çıkarmak ve hedef durak seçimi yapmak. Tabii ki bunu yaparken de komşulardan gelen jetonlar dikkate alınarak aynı hedef kümeler seçilmemelidir.

Küme içi haberleşmede, her küme kurulum aşamasında kendisine atanan frekans bandında haberleşme yapar. Hüresel iletişimde uygulanan frekans yeniden kullanım yaklaşımı burada da kullanılmaktadır. Her bir düğümün iki adet half-duplex radyoya sahip olduğu varsayılmaktadır. Bunlardan birisi sabit olarak küme içi iletişimde sağlamak amacıyla küme içi frekansa ayarlanır. Diğeri ise, veri gönderileceği zaman hedef olarak seçilen kümenin frekansına ayarlanmaktadır. Hedef kümenin hangi frekans bilgisini kullandığı *ResidualEnergyTable* tablosundan elde edilmektedir.

#### 3.4.1.3 Kümeler Arası İletişim

Kümeler arası iletişimde kullanılan paket yapısı, hangi kuşakta oluşturulduğuna göre değişiklik göstermektedir. Diğer bir deyişle, 1. kuşaktaki bir kümede oluşturulan paket ile 2. kuşaktaki bir kümede oluşturulan paket aynı yapıda değildir. Paket yapıları, takip eden bölümde gösterilerek, detayları ile ilgili bilgiler de verilmiştir.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3. ClsID								3. ClsCHID								2. ClsID								
2. ClsCHID								Src ClsID								Src ClsCHID								
Src1 ID								Src2 ID								Data 1.1								
Data 1.2								Data 2.1								Data 2.2								

Şekil 3.12: Birinci kuşaktaki bir kümede oluşturulan kümeler arası iletişim paket yapısı.

Şekil 3.12 'de görüldüğü üzere bir paket, veri toplama merkezine kadar olan yolculuğunda geçtiği her durak küme ve kümenin lider düğümünün kimlik bilgilerini içerir. Her durak düğüm, kendisine gelen paketi iletirken, kendisinin de bu iletim görevinde bulunduğunu ve enerji harcadığını belirtmek amacıyla kendisinin ve ait olduğu kümenin kimlik bilgilerini paketin içerisine koyar. Veri toplama merkezi, paket kendisine ulaştığında, paketin hangi duraklardan geçtiği bilgisini alır ve bu düğümlerin coğrafi konumları kendisinde kayıtlı olduğundan harcadıkları enerjileri hesaplar. Bu bilgiyi daha sonra tüm ağ yapısına yayım (broadcast) yaparak tüm düğümlerle paylaşır. Böylece, bütün düğümler, ağdaki bütün lider düğümlerde meydana gelen enerji değişiklikleriyle ilgili bilgi sahibi olur ve kendi *ResidualEnergyTable* tablosunu günceller. Hatırlanacağı üzere bu tablo, hedef durak belirlenirken eşit yük dağılımını sağlayabilmek amacıyla başvuru tablosu idi. Şekil 3.13 ve 3.14 'de sırasıyla 2. ve 3. kuşaklardan yola çıkan paketlerin yapıları gösterilmektedir.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3. ClsID								3. ClsCHID								Src ClsID								
Src ClsCHID								Src1 ID								Src2 ID								
Data 1.1								Data 1.2								Data 2.1								
Data 2.2																								

Şekil 3.13: İkinci kuşaktaki bir kümede oluşturulan kümeler arası iletişim paket yapısı

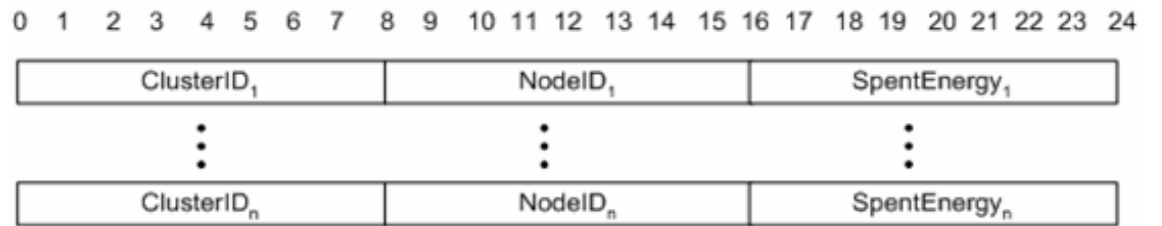
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Src ClsID								Src ClsCHID								Src1 ID								
Src2 ID								Data 1.1								Data 1.2								
Data 2.1								Data 2.2																

Şekil 3.14: Üçüncü kuşaktaki bir kümede oluşturulan kümeler arası iletişim paket yapısı

3. kuşaktaki bir kümede oluşturulan pakette, hedef durak bilgisiyle ilgili herhangi bir alan bulunmamaktadır. Bunun sebebi, bu kuşaktaki herhangi bir kümede oluşan paketin bir sonraki durağı, direkt olarak veri toplama merkezlerinden birinin olmasıdır.

#### 3.4.1.4. Harcanan Enerji Miktarlarının Veri Toplama Merkezleri Tarafından Yayınlanması

Bütün veri toplama merkezleri, ağ yapısı üzerindeki bütün düğümlerin coğrafi koordinatları hakkında bilgi sahibidir. Böylece, kendilerine gelen paketlerin üzerinden geçtikleri durakların ne kadar enerji harcadıklarını hesaplayabilirler. Ancak, enerji sarfiyatlarıyla ilgili ağı bilgilendirme görevi sadece bir veri toplama merkezine aittir. Her veri toplama merkezinin bunu yapmasına gerek yoktur. Bizim çalışmamızda da 1 numaralı veri toplama merkezi bu konuyla ilgili görevlidir. Farklı kuşaklardaki farklı kümelerden çıkan paketler, farklı veri toplama merkezlerine ulaşırlar. Bu sebeple, bir veri toplama merkezi, kendisine ulaşan paketlerle ilgili, 1 numaralı veri toplama merkezini bilgilendirmek zorundadır. Her turun başında, veri toplama merkezleri bir zamanlayıcı başlatır. Bu zamanlayıcı sona erdiğinde, her veri toplama merkezi, kendisindeki bilgileri 1 numaralı veri toplama merkezine gönderir. Çakışmayı engellemek amacıyla, CDMA uygulanarak, bütün veri toplama merkezlerinin aynı anda veri iletimini yapmaları söz konusudur. 1 numaralı düğüm de kendisine ulaşan veri paketlerindeki bilgileri ve diğer veri toplam a merkezlerinden ulaşanları toparlayarak nihai bir mesaj oluşturur ve bunu bütün ağa yayımlar. Veri toplama merkezi tarafından yayımlanan bilgilendirme mesajının yapısı Şekil 3.15 'de verilmiştir.



Şekil 3.15: Bilgilendirme mesaj yapısı



### 3.5. ÇOKLU ORTAM KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

Teknolojideki gelişmelere bağlı olarak algılayıcı düğümlerin yapılarında, kabiliyetlerinde ve bunların uygulama alanlarının çeşitliliğinde de büyük değişiklikler oldu. Çoğunlukla gerçek zamanlı olmayan veri ileten bu küçük, enerji kısıtlı cihazlar, daha fazla enerji kaynaklarına sahip olan, kamera ve mikrofon ekipmanına sahip, gerçek zamanlı veri iletimi yapabilen bir yapıya sahip olmuşlardır. Sahip oldukları kameralar ve mikrofonlar sayesinde, görüntü ve ses gibi çoklu ortam verilerini de iletme kapasitesine sahip olan bu yeni tip, gelişmiş algılayıcı düğümler, bu düğümlerin veri iletişimini düzenleyen protokoller ve yapının tümüne Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlar denmektedir.

Çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlardaki düğümlerin kavuştukları bu yeni imkan, kabiliyet ve uygulama alanları, bazı problemleri de beraberinde getirmiştir (Örneğin, zaman kısıtlı veri transferi, yeterli servis kalitesinin sağlanması vb). Tezimizin son aşamasında, çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar, bunların genel sorunları ve bu konularda önerilmiş çalışmalar incelenmiştir. Bununla birlikte, çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlarda, yeterli servis kalitesiyle birlikte enerji korunumunu sağlama amaçlı eşit yük dağılımı gerçekleştiren bir yapı geliştirildi.

Çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağları geleneksel kablosuz algılayıcı ağlardan ayırt eden en önemli farklılıkları, donanım ve taşıdıkları verinin özellikleridir. Normal kablosuz algılayıcı ağlardaki düğümler, fiziksel ortamdan sıcaklık, nem gibi sayısal değerleri elde ederek, kendine has iletişim protokollerini kullanarak, gecikme toleranslı bu veriyi, veri toplama merkezine iletirler [69]. Geleneksel kablosuz algılayıcı ağların kullandığı protokoller, enerji korunumu üzerine yoğunlaşmışlardır. Diğer bir deyişle, normal kablosuz algılayıcı ağlar için protokoller tasarlanırken öncelikli hedef, ağın ömrünü mümkün olduğunca uzatabilmektir. Halbu ki, çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar ile ilgilenilmesi gereken çok daha fazla problem vardır. Bu problemler, ortamdan elde edilip iletilmesi gereken verinin karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Normal kablosuz algılayıcı ağlar, bir boyutlu sayısal verileri fiziksel ortamdan elde edip iletimini yaparken, çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar ise görüntü dediğimiz, iki boyutlu veriyi ortamdan elde edip iletimini yapabilmektedir. Veri boyutundaki bu artış,

ilgilenilmesi gereken bazı sorunlar ortaya çıkarmıştır. Öncelikli olarak, ortamdan elde edilen verinin bir şekilde işlenip süzülerek, miktarının düşürülmesi gerekir. Böylece, daha az miktarda veri iletimi yapıp, daha az enerji harcanacaktır. Uygulama türüne bağlı olarak, değişik görüntü işleme algoritmaları uygulanabilir [70]. Veri işleme algoritması ne kadar kompleks olursa, o kadar fazla enerji sarfiyatına sebep olur. Çoklu ortam verisinin iletimiyle ilgili halledilmesi gereken diğer bir mesele ise yüksek veri iletim bant genişliği gereksinimidir. Bununlar birlikte, çoklu ortam veri iletiminde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, verinin gerçek zamanlı ve güvenli bir şekilde iletiminin sağlanmasıdır. Çoklu ortam uygulamalarında, verinin az gecikme sürelerinde iletilmesi gerekir ki, uygulama için bir anlam ifade etsin. Son olarak, elde edilen bir video paket katarı, ağ üzerine sürekli şekilde gönderildiğinde, ağ üzerinde meydana gelebilecek tıkanıklık ve çakışmaları önlemek amacıyla, veriler belirli bir süreliğine düğümlerde bekletilmelidir; diğer bir deyişle depolanmalıdırlar. Bu da halledilmesi gereken diğer bir meseledir. Çünkü algılayıcı düğümler çok küçük ebatlarda olduğundan, veri depolama kaynakları da sınırlıdır [71].

Yukarıda bahsedilen meseleler, bilim adamlarının çözüm önerileri sundukları genel konulardır. Yaptığımız araştırmalara dayanarak ve de bildiğimiz kadarıyla, şimdiye dek yapılan çalışmalar, çoğunlukla az gecikmeli ve güvenilir veri iletimi gibi servis kalitesi parametreleri üzerine odaklanmıştır. Tezimizin son aşamasında yaptığımız bu çalışmada, servis kalitesi ile birlikte enerji korunumunu da gözeten katmanlar arası etkileşimli bir yapı sunduk.

### **3.5.1. ÇOKLU ORTAM KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Önceki bölümde bahsedildiği üzere, geleneksel kablosuz algılayıcı ağlar için tasarlanan protokoller ve yöntemler genelde enerji sarfiyatı konusuna odaklandıkları için, çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlara uygun değildir. Çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar, henüz yeni bir konu olmasına rağmen, daha önceki bölümde bahsedilen ve halledilmesi gereken meseleler üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu bölümde, yapılan bu çalışmaları inceleyeceğiz.

Margi ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada [72], hizmet çevrimi mekanizmasının, veri iletim süresindeki gecikme ve enerji korunumu konseptleri açısından etkilerini incelemişlerdir. Hizmet çevrimi mekanizmasını alt görevlere bölerek, her bir görev yapısının ayrı ayrı enerji sarfiyatlarını analiz etmişlerdir. Bunun yanında, değişik hizmet çevrimi konfigürasyonları test edilmiş ve sonuçları belirtilmiştir. Her bir alt görevin enerji sarfiyatı bireysel olarak belirlendiği takdirde, tüm mekanizmanın enerji sarfiyatı da ortaya çıkacak. Böylece, ağ yapısının ömrü hakkın bir fikir sahibi olunabilecektir.

Çoklu ortam algılayıcı ağlar ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada [73], iki ayrı yönlendirme metodu önerilmiştir. Bu çalışmalarda, yük dağılımında dengeyi sağlamak, dolayısıyla da muhtemel tıkanıklıkların önüne geçmek hedeflenmiştir. Olası tıkanıklıkların önüne geçmek, güvenilir veri iletimini de beraberinde sağlar. Sundukları ilk metot, LBRF adı verilen yöntemdir. Bu yöntemde, veri iletimi yapılırken göz önüne alınan husus, komşu düğümlerin tampon doluluk oranlarıdır. Komşu düğümlerden tampon alanı en müsait olanı, bir sonraki durak olarak tercih edilir. Öne sürülen ikinci yöntem ise DLBS 'dir. DLBS yöntemi, LBRF ve DGR [74] metotlarının birleşiminden oluşmaktadır. DGR yönteminde, bir video paket katarı, birden çok alt katara bölünerek, birden fazla ayrık yol üzerinden veri toplama merkezine iletilir. Ancak, bu yollar belirlenirken, servis kalitesi ile ilgili herhangi bir kriter göz önüne alınmamaktadır. Yaptıkları simülasyon çalışmalarında ise genelde veri iletim süresindeki gecikme üzerinde durmuşlardır. Oysa kurulan yollardaki çok sekmeli iletim yapılacak düğüm sayısı ise, veri toplama merkezi ile yapılan açığa göre sadece tahmin edilmektedir. Bu fikir, her zaman doğru sonucu vermeyebilir. Bununla birlikte, düğümlerin, video katarını, alt katarlara bölerken takip ettiği metodolojinin detaylarından bahsedilmemiştir.

Ayrıştırılmış servis modelinin sunulduğu bir başka çalışmada ise [75] paketler, gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan paketler olarak iki kategori altında sınıflandırılmaktadırlar. Gerçek zamanlı olmayan paketler de kendi içinde kaynak gereksinimlerine göre alt gruplara ayrılmaktadırlar. Bu servis modeline göre, değişik alt gruplar altında sınıflandırılan paketler, değişik kuyruklar da tutulmaktadırlar. Gerçek zamanlı kuyruklarda tutulan paketler için öncelik sırasına dayanan bir kuyruklama modeli, gerçek zamanlı olmayan paketlerin tutulduğu kuyruklarda ise çevrimsel sıralı (round robin) bir kuyruklama modeli uygulanmaktadır.

Çoklu iletim kanallı bir modelin sunulduğu diğer bir çalışmada [76], çakışmayı önlemek amacıyla birbirinden bağımsız iki ayrı veri iletim rotasının kurulması sağlanmaktadır.

MMSPEED [77]'in yapısı SPEED [78] adı verilen çalışma temel alınarak geliştirilmiştir. Servis kalitesi, güvenilirlik ve gecikme kategorilerinde sağlanmaya çalışılmıştır. Yönlendirme işlemleri yerel olarak ve düğümlerin coğrafi pozisyonları dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, değişik servis kalitesi gereksinimleri olan değişik kategorilerdeki paketler için ayrı rotalar bulunmaktadır. SPEED' de tek bir rota bulunmaktadır. MMSPEED 'de ise birden çok SPEED katmanı sanal olarak kurulmakta. Her bir SPEED katmanı da değişik kategorilerdeki paketlerin iletimi için kullanılmaktadır. Verinin üretildiği kaynak düğüm tarafından belirlenen gecikme servis kalitesi parametresinin değeri dinamik olarak, ara geçiş düğümlerinde güncellenerek, kaynak düğüm tarafından belirlenen ortalama değer tutturulmaya çalışılmaktadır. Güvenilirliği sağlamak amacıyla da aynı paketin iletimi birden fazla güzargah üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu güzargahların sayısı, paket kayıp oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kayıp oranı ve de paketlerin güvenilirlik talepleri arttığı takdirde, güzargah sayısı da atmaktadır. Ancak, çalışmayı yapan yazarlarının da belirttiği üzere, bu çalışma uygulamaya özel bir yapı sunmaktadır. Özellikle de ömrü kısa, en fazla birkaç gün olan kablosuz ağ yapıları için sunulmuş bir yapıdır. Çünkü bu çalışmada, enerji korunumu ile ilgili önerilmiş hiçbir fikir yoktur. Halledilmesi gereken mesele olarak görülen tek konu servis kalitesi olarak belirlenmiş ve çalışmayı bunun üzerine yapılandırmışlardır.

Mao ve arkadaşlarının sunduğu MRTP [79] adlı çalışmada, refakatçi protokolü olan MRTCP ile birlikte çoklu akışlı gerçek zamanlı bir veri iletimi sağlanmaktadır. Bu çalışma özellikle, verisi alt akışlara paylaştırılarak gönderilebilen uygulamalar için uygundur. Böylece, her alt akışın altında gruplandırılan paketler, kendileri için ayrılmış güzargahı takip ederek iletilirler. MRTCP 'nin buradaki görevi, servis kalitesi geribildirimi, oturum ve akış kontrollerinin sağlanması gibi görevlerin gerçekleştirilmesidir.

Servis kalitesinin dikkate alındığı bir başka yaklaşımda [80-82] ise düğümlere, kendi kapsama alanlarında, veri toplama merkezine yakınlık derecelerine göre öncelik

değerleri verilmektedir. Veri toplama merkezine yakın olan düğümlere daha yüksek öncelik değerleri, uzak olanlara ise daha düşük öncelik değerleri verilmektedir. Paket üretim hızı belirli bir eşik değerinin altında gerçekleştiği durumlarda GPSR [55] yönlendirme metodu uygulanmaktadır. Diğer durumda, paketlere, servis kalitesi gereksinimlerine göre öncelik sırası verilmektedir. Yüksek öncelikli paketler, en yüksek öncelikli düğümler üzerinde gönderilirken, düşük öncelikli paketler ise düşük öncelikli diğer düğümlere adil bir şekilde dağıtılmaktadır.

Enerji korunumu ve aynı zamanda servis kalitesini gözetilen bir MAC protokolünde [83] ise düğümler, yarışma pencere boyutlarını, iletmekte oldukları paketin servis kalitesine göre ayarlamaktadırlar. Yüksek önceliğe sahip paket taşıyan düğümler, yarışma pencere boyutlarını daha aza indirgeyecekler, böylece, çoklu erişim ortamına daha önce sahip olma hakkı olasılıkları artacaktır. Ayrıca, düğümlerin hizmet çevrimi mekanizmaları da servis kalitesi gereksinimlerine bağlı olarak adapte edilebilmektedir. Gecikme toleranslı gerçek zamanlı olmayan paketlerin iletimi sırasında düğümler, daha uzun uyku durumuna geçerek, daha fazla enerji tasarrufu sağlayabilirler.

Kablosuz algılayıcı ağlar üzerinde video transferi için önerilen bir başka çalışmada ise [84] yine enerji tasarruflu, çoklu güzargahlı bir yönlendirme metodu sunulmuştur. Bu çalışmada, iki farklı zamanlama algoritması önerilmiştir. Birinci yöntem olan *Baseline Zamanlama Algoritması*, servis kalitesi gereksinimlerini sağlayan birden fazla güzargah tespit etmektedir. Belirlenen güzargahların toplam servis kalitesi sağlayıcılarının belirlenen servis kalitesini karşılayamama olasılığına karşı önem derecelerine göre bazı paketlerin gözden çıkarılması mekanizması uygulanmaktadır. İkinci yöntem olan güç farkındalı zamanlama algoritması ise, ağdaki düğümlerin kalan enerji seviyelerini tahminsel olarak hesaplayarak paket eliminasyonunu, servis kalitesi gereksinimlerine ve de düğümlerin kalan enerji seviyelerine göre yapar.

AGEM yönlendirme protokolü [85], GPSR yönteminin, belirli bir servis kalitesi gerektiren çoklu ortam verilerinin iletimi için geliştirilmiş halidir. Geliştirme işlemi, GPSR metoduna, eşit yük dağılım mekanizması eklenerek gerçekleştirilmiştir. GPSR yönteminde, bir düğümden çıkan bütün paketler, hep aynı güzargahı takip etmektedirler. Buna karşın, AGEM protokolünde, paketler, bir sonraki düğüm seçiminde belirli bir

politika izlenmektedir. Bu politika çerçevesinde, paket iletiminde göz önünde bulundurulan hususlar şu şekildedir:

- düğümlerin kalan enerji seviyeleri
- o an ki düğüme kadar ziyaret edilen düğüm sayısı
- düğümler arası mesafe
- aynı akışa ait istatistikler

Görüldüğü üzere, yapılan çalışmaların birçoğunda çoklu güzargah tespiti ve paketlerin bu güzargahların üzerinde iletilmesi söz konusudur. Buna örnek verilebilecek diğer bir çalışmada [86], buluşsal (heuristic) bir yöntem izlenerek, kaynak düğüm tarafından talep edilen servis kalitesini sağlayabilecek birden fazla güzargahın tespiti söz konusudur. Yaptıkları simülasyon sonuçlarına göre, talep edilen servis kalitesini sağlama olasılığı, en kısa yol algoritmasına göre daha yüksektir. Bu çalışmanın önerdiği diğer bir yöntem ise video veri katarının kesimlenerek, her bir kesimin, buluşsal metotla belirlenen güzargahlar üzerinden gönderilmesidir.

### **3.5.2. Önerilen Çok Kanallı Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Katmanlar Arası Etkileşimli Mimari Yapısı**

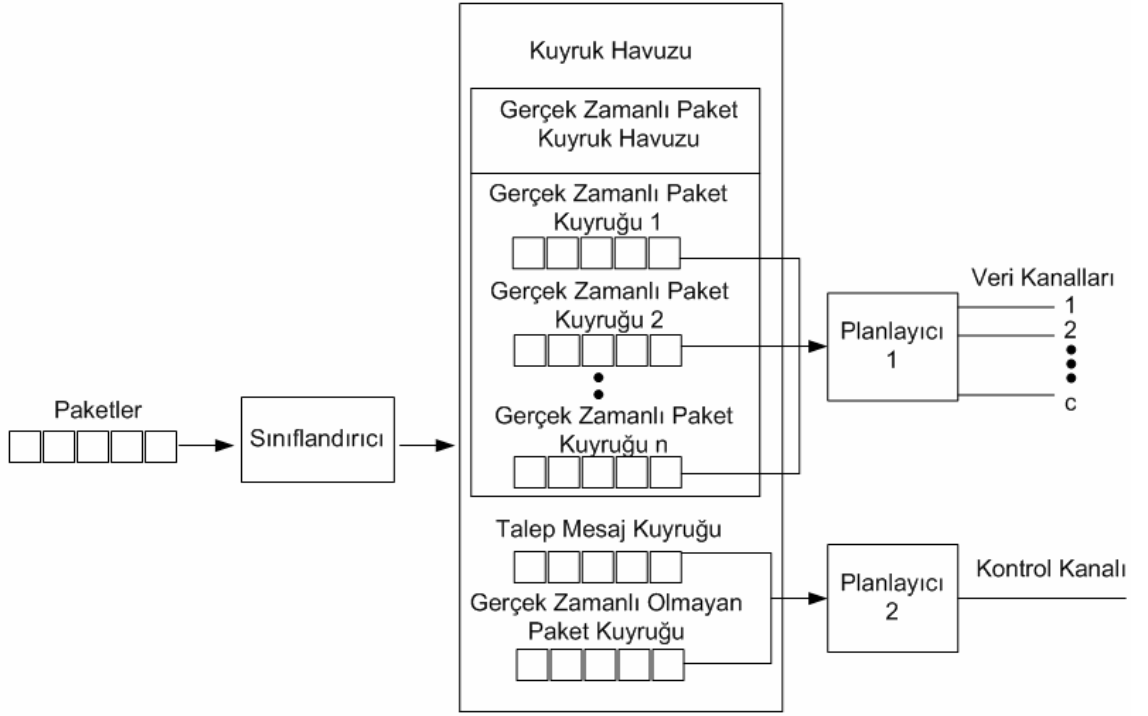
Önerdiğimiz yapı, her biri ağ yapısının ömrünü uzatmayı ve de istenen servis kalitesini sağlamayı hedefleyen beş ana bileşenden oluşmaktadır. Her bir bileşen, takip eden bölümlerde detaylıca açıklanmaktadır.

#### *3.5.2.1. Zaman Planı Uygulayıcısı ve Sınıflandırıcı (Scheduler & Classifier)*

Günümüz algılayıcı düğümleri, sayısal ve görsel gibi değişik formattaki verileri ortamdan elde etme imkanına sahiptirler. Böylece, değişik tipteki veriler de değişik servis kalitesine gereksinim duyarlar. Önerdiğimiz yapıda, her düğüm, bir sınıflandırıcıya sahiptir. Bu sınıflandırıcı, kaynak düğümden başka düğümlere iletilecek paketleri, gerçek zamanlı olup olmama gibi belirli özelliklerine göre öncelik değeri vermekte ve bu öncelik değerlerine göre de ilgili kuyruklara atamaktadır. Yine, atanan bu öncelik değerlerine göre kuyruklardan çekilmektedirler.

Sistemde üç tip paket bulunmaktadır. Bunlardan birincisi *RouteRequestMessage* adı verilen, kaynak düğüm tarafından talep edilen servis kalitesini sağlayabilecek güzargahları belirleme ve de belirlenen güzargahlar üzerindeki kaynakların rezervasyonunu sağlama amaçlı paketlerdir. Bu paketler, sistemdeki en yüksek önceliğe

sahip paketlerdir. Bunun sebebi, güzargahın bir an önce belirlenip, gerçek zamanlı paketlerin iletimine hemen başlanabilmesidir. İkinci tip paket ise *RealTimePacket* olarak adlandırdığımız gerçek zamanlı verileri taşıyan paketlerdir. Gözetleme uygulamalarındaki gibi, periyodik olarak değil de beklenmedik durumlar sonucunda elde edilen ve bir an önce veri toplama merkezine iletilmesi gereken veri tipidir. Bu paketlerin öncelik sırası, hiyerarşide ortada durmaktadır. Sistemdeki en düşük önceliğe sahip paketler, gerçek zamanlı olmayan sayısal verileri taşıyan *NonRealTimePacket* adı verilen paketlerdir. Dolayısıyla, bu paketler, kuyruklarda maruz kalacakları gecikmelere katlanmak zorundadırlar. Zaman planı uygulayıcı ve sınıflandırıcı yapısı Şekil 3.16 'da gösterilmektedir.



Şekil 3.16: Düğümlerde bulunan sınıflandırıcı ve zaman planı uygulayıcıları

Şekil 3.16 'da da görüldüğü üzere, her düğümde bir adet sınıflandırıcı ve iki adet zaman planı uygulayıcısı mevcuttur. Sınıflandırıcı, üst katmanlardan ulaşan paketleri, gerçek zamanlı olup olmamasına göre kuyruklara yerleştirir. Veri iletimi sırasında, bu gerçek zamanlı paketler, veri kanalları üzerinden gönderilir. Bu gerçek zamanlı veri paketleri de tek bir akış içerisinde ve de tek bir güzargah üzerinden değil de çoklu akışlar oluşturularak, çoklu güzargahlar üzerinden iletilmesi hedeflenir. Dolayısıyla, her bir akış için bir güzargah belirlemek amacıyla, bir RouteRequestMessage oluşturulur ve

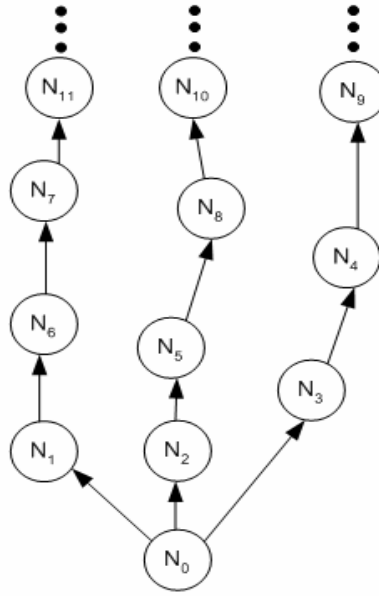
kuyruğa atanır. Request mesajları ve de gerçek zamanlı olmayan verileri taşıyan NonRealTimePacket 'ler ise kontrol kanalı üzerinden taşınmaktadır. Bir numaralı zaman planı uygulayıcısı olan Scheduler1 sadece gerçek zamanlı kuyruklardan verilerin iletim hattına konmasından sorumludur. Gerçek zamanlı paketler, bu kuyruklardan çevrimsel sıralı (round robin) mantığıyla çekilmektedir. İki numaralı zaman planı uygulayıcısı Scheduler2, NonRealTimePacket ve RouteRequestMessage 'ların iletiminde görevlidir. Öncelikle, RequestQueue 'da hiç bir paket kalmayınca kadar bütün Request mesajları çekilir ve sonrasında sırasıyla gerçek zamanlı olmayan paketlerin tutulduğu NonRealTimePckQueue 'dan paketler çekilmeye başlanır.

### 3.5.2.2 Uyarlanabilir Alt-Akış Oluşum Mekanizması

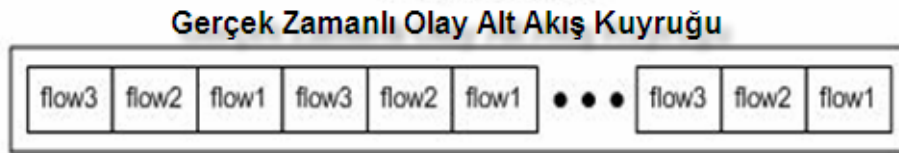
Güvenlik ile ilgili saha gözetlemesinin yapıldığı çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarında beklenmedik bir olay vuku bulduğu anda, birçok paketten oluşan bir veri katarı oluşur. Eğer bu serideki tüm paketler, veri toplama merkezine tek bir yol üzerinden iletilirse, bu güzargah üzerindeki düğümlerin enerjisi kısa zamanda tükenir. Buna çözüm olarak, eşit yük dağılımını sağlayabilmek amacıyla, talep edilen servis kalitesi sağlanmak şartıyla, paket serisi birden fazla alt akışa altında gruplandırılarak, her bir alt-akış için ayrı bir güzargah belirlenerek, paketler ait oldukları alt-akışın belirlenen güzargahı üzerinden gönderilebilir. Alt-akış sayısı, güzargah belirleme ve kaynak rezervasyonu işlemi sonrasında belirlenir. Servis kalitesini sağlayabilen ne kadar güzargah bulunabilirse, o kadar adet alt-akış sayısı oluşur. Gerçek zamanlı paketlerin tutulduğu, bir olaya ait kuyruktaki paketler, çevrimsel sıralı olarak bu alt-akış numaralarıyla etiketlenilerek, belirlenen güzargahlar üzerinden gönderilmeye başlanır.

Şekil 3.17 'de görüldüğü gibi, eğer servis kalitesini sağlayabilen üç adet güzargah belirlenmişse, o zaman, olaya ait gerçek zamanlı verilerin tutulduğu kuyruktaki paketler, Şekil 3.18 'de gösterildiği şekilde etiketlenilecektir.





Şekil 3.17: Örnek senaryo

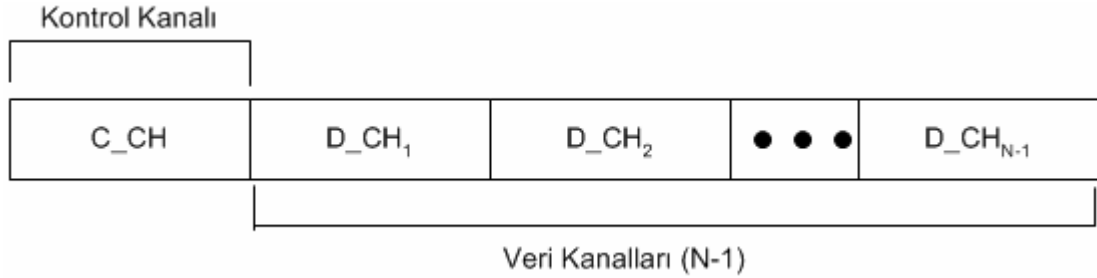


Şekil 3.18: Alt-akış oluşumu

### 3.5.2.3 Çok Kanallı Yapı

Tek kanallı yapılar, çok kanallı yapıların sağladığı kanal faydalanma oranlarını sağlayamamaktadır. Kablosuz ortam, bir yayım ortamı olduğundan dolayı, iki düğüm arasında meydana gelen iletişim sırasında, kapsama alanı içerisindeki diğer düğümler, herhangi bir veri alışverişi içerisinde bulunamazlar. Bunu sağlayan mekanizmaya CSMA/CA denmektedir. CSMA/CA gibi yarışma bazlı çoklu ortam erişimi protokolleri, statik ağ yapıları üzerinden çoklu ortam verisi taşımak için elverişli değildir. Paket katarının her bir üyesi, belirli bir gecikme zamanı içerisinde veri toplama merkezine iletebilirse bir anlam teşkil eder. Dolayısıyla, bu gecikme zamanını sağlayacak şekilde, belirli miktardaki kaynakların rezerve edilmesi gerekir. Kaynakların paralel olarak birçok aktif düğüm tarafından eş zamanlı olarak paylaşılması, birim zamanda yapılan işlem hacmini artırarak, gecikmeyi de azaltır [87-90]. Bizim önerdiğimiz yapıda, toplam bant genişliği, birbiriyle örtüşmeyen N tane alt kanala bölünmüştür. Bu kanallardan bir tanesi, kontrol mesajları ile gerçek zamanlı olmayan verilerin iletiminde, geri kalan N-1 adedi ise gerçek zamanlı veri paketlerinin iletiminde kullanılmaktadır. Böylece, Şekil

3.19 'da gösterildiği gibi, her alt kanala toplam bantgenişliğinin  $N$  'de biri kadar bir kapasite düşer. Ayrıca, her bir düğümde de bu  $N$  adet kanala sabitlenmiş, aynı anda tek yönlü veri alışverişi yapabilen  $N$  adet radyo mevcuttur.



Şekil 3.19: Toplam bant genişliğinin  $N$  adet alt kanala bölümü

#### 3.5.2.4 Güzargah Tespiti ve Kaynak Rezervasyonu

İlk çok kanallı uygulamalar, servis kalitesiyle çok fazla ilgilenmeden, veri iletimini sanki tek başına bağımsız bir görev işlem olarak algılamışlardır. Bu sebeple, kanal bölüştürme işlemini paket başına yapmışlardır. Oysa çoklu ortam verileri gibi bir paket katarından oluşan veri dizisinin tümü iletilinceye kadar bir rezervasyon yapılması daha uygun olur. Böylece, her iletim işlemi öncesinde gerçekleşen el sıkışma mekanizması sonucu maruz kalınan fazladan yükün miktarı azaltılmış olunur [91].

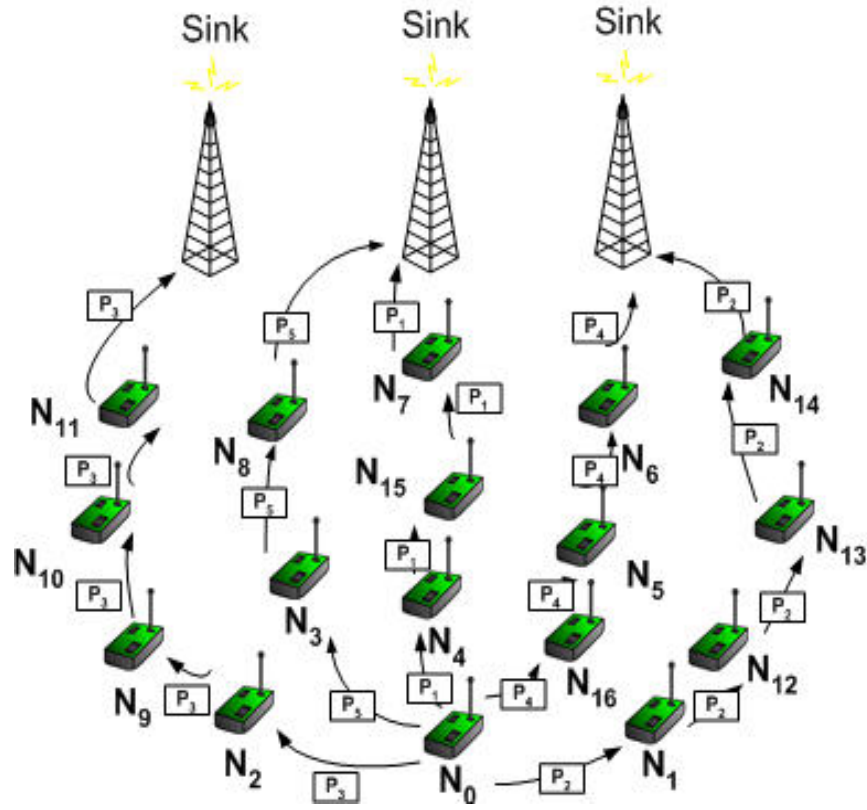
Paket katarı, öncelikle, sistemde var olan kanal sayısına göre alt akışlara ayrılır. Bütün kanalların müsait olduğu ve mevcut kanal sayısı kadar da servis kalitesini sağlayan güzargah var olduğu varsayımı yapılır. Böylece, kanal sayısı kadar oluşturulan alt-akışların her biri için bir RouteRequest mesajı oluşturularak yola çıkartılır. RouteRequest mesajlarının hangi rotayı takip edeceği ise yönlendirme algoritmasına göre tespit edilmektedir.

Bizim sunduğumuz yapıda, kaynak rezervasyonu, güzargah tespiti sırasında yapılmaktadır. Güzargahlar, AODV [92] benzeri bir algoritma uygulanarak tespit edilmektedir. Ancak, AODV 'nin aksine, güzargah talep mesajları bütün düğümlere gönderilmek yerine yük dengeli bir yönlendirme algoritmasına göre seçilen komşu düğüme iletilir. Servis kalitesi (QoS) parametresi olarak güzargah talep mesajlarının üzerinden geçtikleri düğüm sayısı belirlenmiştir. Kaynak rezervasyonu, her bir alt akış için ayrı yapılmaktadır. Böylece, bir alt paket akışı için bir güzargah ve bu güzargah

boyunca kullanılacak bir kanal rezerve edildiği takdirde, o alt akışa ait bütün paketler, belirlenen bu kanal ve güzargahı kullanacaklardır. Güzargah talep mesajı kendisine ulaşan düğüm, servis kalitesi parametresi olarak belirlenen *Dolaşılan Düğüm Sayısı* 'na bakarak, kaynaktan çıkarken bu alan için tanımlanmış değer ile karşılaştırmaktadır. Eğer, istenen değer aşılmışsa, talep mesajını ileten bir önceki düğüme, talep edilen servis kalitesinde bir iletişimin bu güzargah takip edilirse sağlanamayacağı anlamına gelen *NackForRouteRequest* mesajı döndürülür. *NackForRouteRequest* mesajını alan düğüm de kendisine güzargah talep mesajını ileten bir önceki düğümüne bu mesajı iletir ve bu işlem, mesaj kaynak düğüme ulaşınca kadar devam eder. Eğer ki talep edilen QoS değeri henüz aşılmamışsa, alıcı düğüm, paketin içerisindeki o ana kadar dolaşılan düğüm sayısını ifade eden *NUM\_OF\_HOPS\_TRAVELED* alanının içeriğini bir artırarak, talep mesajını yönlendirme algoritmasına göre seçilen bir sonraki komşusuna iletir.

### 3.5.2.5 Talep Edilen Servis Kalitesini Gözetilen Yük Dengeli Yön Bulma Algoritması

Önceki bölümde de ifade edildiği gibi, güzargah tespiti, AODV benzeri bir yöntemle yapılmaktadır. Ancak, aralarındaki en temel fark, talep mesajının bütün komşulara gönderilmesi yerine, daha önceden geliştirdiğimiz yöntem olan LEERA-MS 'in biraz daha geliştirilmiş hali olan QS-LEERA-MS metoduna göre yapılmaktadır. LEERA-MS algoritmasını, sayısal veri elde edilmesi ve iletimi ile ilgilenen geleneksel kablosuz algılayıcı ağlar için geliştirmiştik. İletilmek istenen veri, gerçek zamanlı olmadığından, veri iletiminde gözetilen yegane kriter, yük dengesinin sağlanarak ağın ömrünü mümkün olduğunca uzatmaktır. Bu yüzden, paket iletilirken yapılan bir sonraki durak seçiminde bakılan ilk şey, düğümlerin kalan enerji seviyeleridir. Eğer, hepsi aynı seviyede enerji seviyelerine sahipse, ait olunan veri toplama merkezine yakınlık derecelerine göre tercih yapılır. Şekil 3.20 'deki örnek senaryoda, ilk paket iletimi sırasında bütün komşu düğümlerin enerji seviyeleri eşit kabul edildiği takdirde, en kısa yol algoritması mantığıyla, 2. veri toplama merkezine en yakın düğüm olan  $N_4$  seçilir. Daha sonraki paketlerin iletiminde ise, bu sefer aynı doğrultuda bulunan veri toplama merkezine en uzak olan düğüm seçilir. Böylece, mümkün olduğunca, paket iletimi işlemi için topolojinin kenarlarındaki güzargahlar takip edilerek, iç taraftaki düğümler üzerindeki olası veri çakışmalarının ve yoğunlaşmalarının önüne geçilerek, mümkün olduğunca farklı güzargahlar üzerinden paket iletimi yapılarak dengeli yük dağılımının da sağlanması hedeflenmektedir.



Şekil 3.20: LEERA-MS yönteminde paket iletimi

Şekil 3.20 'de görüldüğü üzere,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ , ve  $P_5$  paketlerinin iletiminde, sırasıyla

$(N_4 \rightarrow N_{15} \rightarrow N_7)$ ,

$(N_1 \rightarrow N_{12} \rightarrow N_{13} \rightarrow N_{14})$ ,

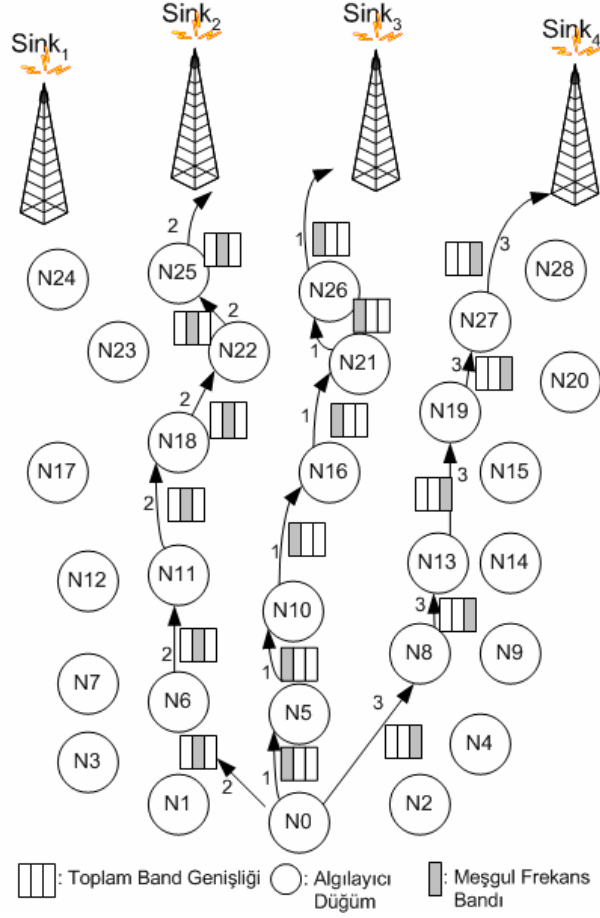
$(N_2 \rightarrow N_9 \rightarrow N_{10} \rightarrow N_{11})$ ,

$(N_{16} \rightarrow N_5 \rightarrow N_6)$ ,

$(N_3 \rightarrow N_8)$

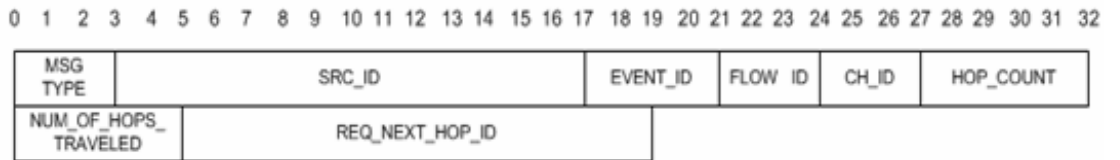
güzargahları kullanılmaktadır.

QS-LEERA-MS yönteminde ise, güzargahlar belirlenirken, gönderilecek paketin türü esas alınır. Gerçek zamanlı olmayan paketlerin iletiminde LEERA-MS 'deki yöntem uygulanmaktadır. Gerçek zamanlı paketlerin iletiminde ise öncelikle bir güzargah belirlenmeli ve bu güzargah üzerindeki kaynakların rezerve edilmesi gerekmektedir. LEERA-MS 'deki dıştan içeri doğru güzargah seçimi mantığı yerine, diğer bir deyişle, trafiğin kenarlara yayılması yerine, merkezdekilerin öncelikle kullanılması esas alınmaktadır. Servis kalitesini sağladıkları takdirde, daha kenarlardaki güzargahlar da kullanılabilir. Şekil 3.21, QS-LEERA-MS 'deki yönlendirme mekanizmasını örnek bir topoloji üzerinde göstermektedir.



Şekil 3.21: Senaryo 1- Gerçek zamanlı paket iletimi,  
Örtüşmeyen kanal sayısı = 3,  
Maksimum dolaşılacak düğüm sayısı (QoS parametresi) = 6,  
Paket sayısı = 3.

Şekil 3.21 'de gösterildiği üzere, N0 düğümünden 3 adet gerçek zamanlı paket iletimi gerçekleştirilmektedir. Bu paketlerini iletiminde kullanılacak güzargahların kaynak hariç en çok 6 düğümünden oluşması istenmektedir. Toplam bant genişliği 3 adet birbiriyle örtüşmeyen alt banda bölünmüştür. Güzargah tespit ve kaynak rezervasyon talep mesajının yapısı Şekil 3.22 'de belirtilmiştir.

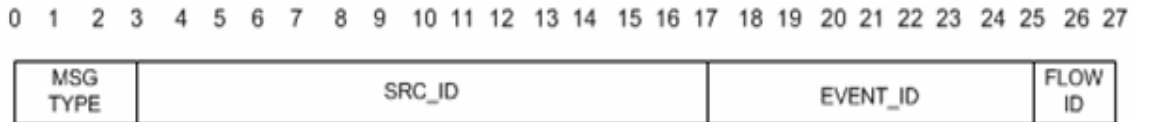


Şekil 3.22: Güzargah tespit ve kaynak rezervasyon talep mesajı

*SRC\_ID* ile ifade edilen alan, kaynak düğümü göstermektedir. Sistemde, her düğümün birden fazla olayı tespit ederek, buna ait verileri merkeze iletebildiği varsayımı

yapılmıştır. Bu sebeple, her bir ayrı olayı kimlikleyebilmek adına *EVENT\_ID* ile gösterilen alan ayrılmıştır. *FLOW\_ID* ile gösterilen alan, belirtilen kimlik numaralı olayın hangi alt akışı için bir talep olduğunu belirtir. *HOP\_COUNT* ise, mesajın o ana kadar dolaştığı düğüm sayısını ifade eder. *NUM\_OF\_HOPS\_TRAVELED* ile gösterilen alan ise daha önceden de belirttiğimiz üzere servis kalitesi parametresidir. Paketler, veri toplama merkezine kadar en çok ne kadar düğüm dolaşabilir kısıtının ifadesidir. Talep mesajının bir sonraki durağı, QS-LEERA-MS 'e göre belirlendikten sonra, seçilen düğümün kimlik numarası *REQ\_NEXT\_HOP\_ID* ile gösterilen kısma yazılır.

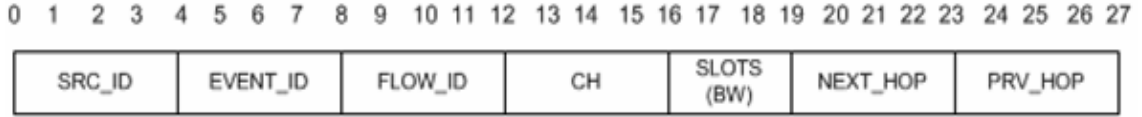
Talep mesajlarının iletimi, kontrol kanalı üzerinden yapılmaktadır. QS-LEERA-MS yöntemine göre, bütün düğümler ilk aşamada eşit enerji seviyesine sahip olduğu düşünüldüğü takdirde, ilk talep mesajı, N5 ile başlayan en kısa yol üzerinden gönderilmektedir. N5, kendisine gelen bu talep mesajını aldıktan sonra, ilk olarak *NUM\_OF\_HOPS\_TRAVELED* ve *HOP\_COUNT* alanlarına bakar. *HOP\_COUNT* alanındaki değeri 1 artırarak, *NUM\_OF\_HOPS\_TRAVELED* alanındaki değer ile karşılaştırır. Bu değeri aşıyorsa, talebi kendisine ileten düğüm olan N0 'a NackForRouteRequest mesajı ile olumsuz cevabını bildirir. Eğer istenen değer aşılmıyorsa ve de bir sonraki hedef düğüm için aday komşuların hepsinin enerjileri eşit olduğu ise, en kısa yol kriterine göre N10 seçilir ve talep mesajı kendisine iletilir. Bunu yaparken de (*SRC\_ID*, *EVENT\_ID*, *FLOW\_ID*) üçlemesine dair güzargah ile ilgili, yönlendirme tablosuna kayıt ekler ve kaynak rezervasyonunun gerçekleştirir. Bu işlem, talep mesajı Sink3 'e ulaşıncaya kadar devam eder. Sink3, talep mesajını alır almaz bir mesaj yayımlayarak (broadcast), talebi aldığını ve de paketin üzerinden geçtiği güzargahtaki tüm düğümlerin kaynak rezervasyonlarını kesinleştirmeleri gerektiğini belirtir. Bu yayım mesajının yapısı, Şekil 3.23 'de görülmektedir.



Şekil 3.23: Yayımlanan güzargah tespit ve kaynak rezervasyon talep raporu

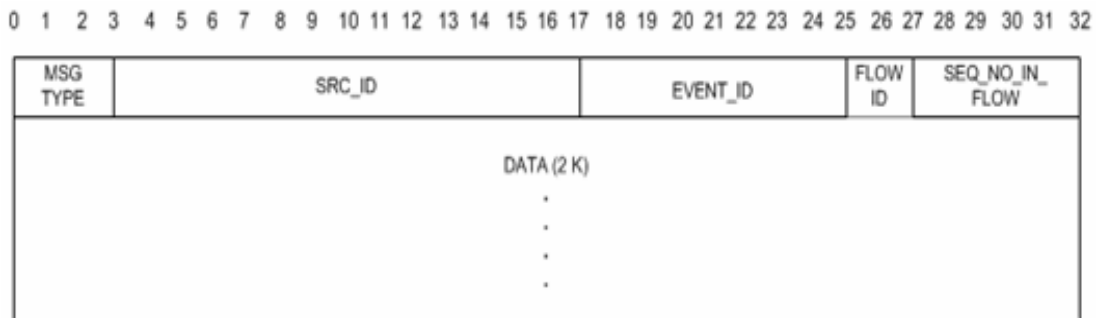
Aslında bu mesaj, ağdaki bütün düğümlere, (*SRC\_ID*, *EVENT\_ID*, *FLOW\_ID*) üçlemesine dair güzargahın başarıyla kurulduğunu belirtmektedir. Güzargah üzerindeki bütün düğümler, bu mesajı aldıktan sonra, yönlendirme tablolarında bu güzargah ile

ilgili bilgileri tutan kayıtlarını ve de talep mesajını iletirken yapmış oldukları rezervasyon işlemini onaylamış olurlar. Eğer ki, belirli bir süre zarfında bu rapor mesajı alınmazsa, yapılan rezervasyonlar ve de tablolarda oluşturulan kayıtlar silinir. Yönlendirme tablosunda tutulan kayıt bilgisinin yapısı Şekil 3.24 'de gösterilmektedir.

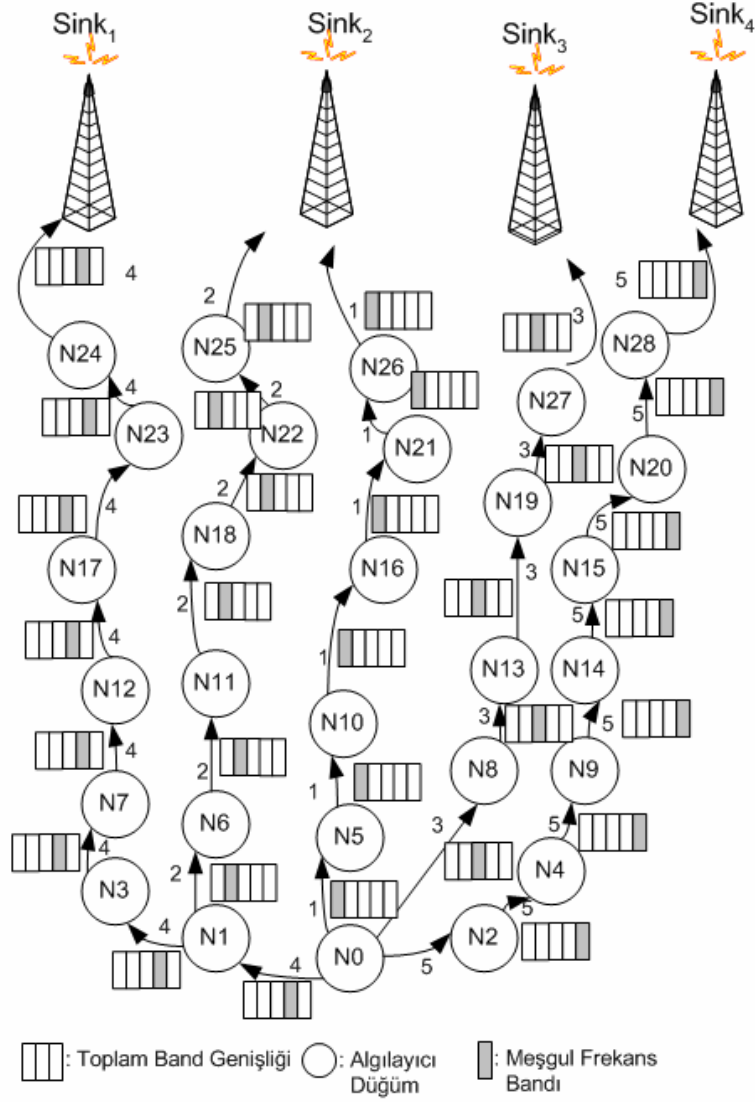


Şekil 3.24: Yönlendirme tablosundaki kayıtların yapısı

Kaynak düğüm, talep mesajına karşılık gelen olumlu onay raposunu alır almaz, yapısı Şekil 3.25 'de gösterildiği şekilde olan, ilk gerçek zamanlı veri paketini, belirlenen güzargah üzerindeki ilk düğüme doğru yola koyar. Yola çıkarılan paket, ait olduğu akış içerisindeki ilk paket olduğundan, bunu ifade eden alan olan *SEQ\_NO\_IN\_FLOW* 'a yazılan değer de 1 'dir. Şekil 3.26 'daki senaryoya göre paket, katmanlar arası iletişimli yönlendirme algoritmasının belirlediği düğüm olan N5 ' e, gene algoritma tarafından belirlenen kanal 1 rezerve edilerek gönderilir. İkinci güzargah tespit işlemi için hemen ikinci bir talep mesajı yola konur. Veri taşıma kanallarından kanal numarasına göre ilk müsait olanı, yani 2 numaralı kanal belirlenir. Bu sefer, talep mesajı, N1 düğümüne yönlendirilir. İkinci talep mesajı da, aynı birinci de olduğu gibi aynı işlemleri takip eder. Son olarak, üçüncü talep mesajı da N8 düğümüne, 3 numaralı kanal rezerve edilerek yola çıkarılır. Kaç adet servis kalitesini sağlayabilen güzargah tespiti yapıldıysa, gerçek zamanlı veri paket katarı da o kadar adet alt akış paket katarına ayrılır.



Şekil 3.25: Gerçek zamanlı paket yapısı

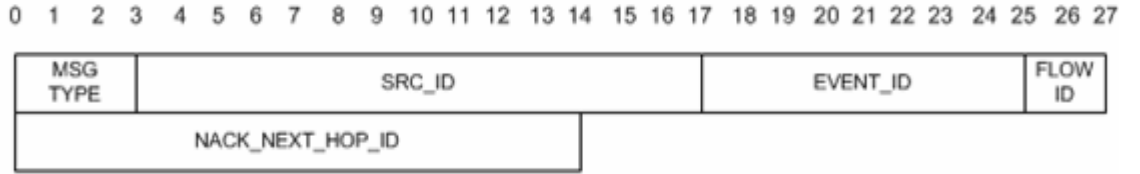


şekil 3.26: Senaryo 2: Gerçek zamanlı paket iletimi,  
Örtüşmeyen kanal sayısı = 5,  
Maksimum dolaşılacak düğüm sayısı (QoS parametresi)= 7,  
Paket sayısı = 5.

şekil 3.26, başka bir senaryo örneğini göstermektedir. Bu örnekte, servis kalitesini ifade eden *NUM\_OF\_HOPS\_TRAVELED* (Maksimum dolaşılacak düğüm sayısı) parametresi, daha bir gecikme toleransıya, 7 olarak belirlenmiş. Dolayısıyla, bir önceki senaryoya göre iki adet daha fazla güzargah mevcuttur. Ayrık yolların fazlalığı, veri iletim bandından yeterince istifade edebilme oranını artırmaktadır. Bununla birlikte, daha fazla güzargah demek, veri iletim yükünün daha fazla düğüm üzerine paylaştırılması, böylece de ağın ömrünün uzatılması anlamına gelmektedir.



Bir başka senaryoda ise, Şekil 3.25 ve 3.26 ‘dakilere benzer olarak, beklenmedik bir olay sonrasında 5 adet gerçek zamanlı paketin oluştuğunu varsayalım. Bu sefer ki QoS parametresi olan *NUM\_OF\_HOPS\_TRAVELED* için 6 değeri belirlensin. 5 adet birbiriyle örtüşmeyen kanal olsa bile Şekil 3.26 ‘da belirlenen 5 adet güzargah, bu senaryo için mümkün olmaz. Çünkü kenarlardaki güzargahlar üzerinden gönderilecek paketler, 7 adet düğüm üzerinden geçeceğinden dolayı, başta belirtilen servis kalitesi değerini aşacaktır. Bu sebeple, talep mesajları N23 ve N20 ‘ye ulaştığında, bu düğümler tarafından kendilerine talebi ileten bir önceki düğümler olan N17 ve N15 düğümleri üzerinden kaynağa doğru NACK mesajı yola çıkartılır. NACK mesajını alan her düğüm, daha önceden talep mesajını iletirken ayırmış olduğu kaynakları ve de tablosuna eklediği kayıtları iptal eder. NACK mesaj yapısı Şekil 3.27 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 3.27: NACK mesaj yapısı

## 4. BULGULAR

### 4.1. İŞ HATTI EKLENEREK GELİŞTİRİLMİŞ STEM YAPISI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR

STEM ve iş hattı ekleyerek geliştirdiğimiz P-STEM yapısını, JAVA ortamında yaptığımız simülasyonlar ile karşılaştırdık. Bu iki yapıyı, değişik yönlendirme algoritmaları üzerinde kullanarak gecikme yönünden mukayeselerini yaptık. Bu yönlendirme algoritmaları sırasıyla şu şekildedir [93]:

- En yakın komşuyu seçme (Nearest Neighbor - NN)
- En uzak komşuyu seçme (Furthest Neighbor - FN)
- En yakın açıyı yapan komşuyu seçme (Closest Angled Neighbor - CAN)
- Veri toplama merkezine en yakın komşuyu seçme (Closest To The Sink - CTTS)

Simülasyonlar sırasında kullanılan parametrelerin açıklamaları ise aşağıdaki gibidir:

$T_d$ : Veri iletim süresi (Bütün paketlerin eşit uzunlukta olduğu varsayılıyor).

$T_s$ : İletişim öncesi, el sıkışma mekanizmasının süresi.

$T_b$ : Düğümlerin,  $f_1$  frekansı üzerine sabitlenmiş radyolarını açarak kendilerine yönlendirilmiş herhangi bir paketin olup olmadığının kontrolünü yaptıkları süre.

$T$ : Düğümün uyanma süresi

$B_1$ : Uyarı sinyali (beacon) gönderme süresi

$B_2$ : İki uyarı sinyali arası geçen süre

$T_s$  için hesaplanan ortalama değer, STEM [27] protokolünde olduğu gibi Eşitlik (4.1) 'e göre hesaplanmıştır.

$$T_s = (T + B_1 + B_2) / 2. \quad (4.1)$$

Diğer parametrelerin değerleri de yine STEM uygulaması ile bir başka makale çalışmasından [94] alıntı yapılarak uygulanmıştır:

Tablo 4.1: Simülasyonda kullanılan parametrelerin değerleri

$B_1 + B_2$	150 ms
$T_d$	400 ms
$T_b$	225 ms
$T$	600 ms
$P_{İletim}$	14.88 mW
$P_{Alım}$	12.5 mW
$P_{Boş}$	12.36 mW
$P_{Uyku}$	0.016 mW

Tablo 4.1 'de radyoların enerji sarfiyatı ile ilgili parametrelerinin açıklaması aşağıdaki gibidir:

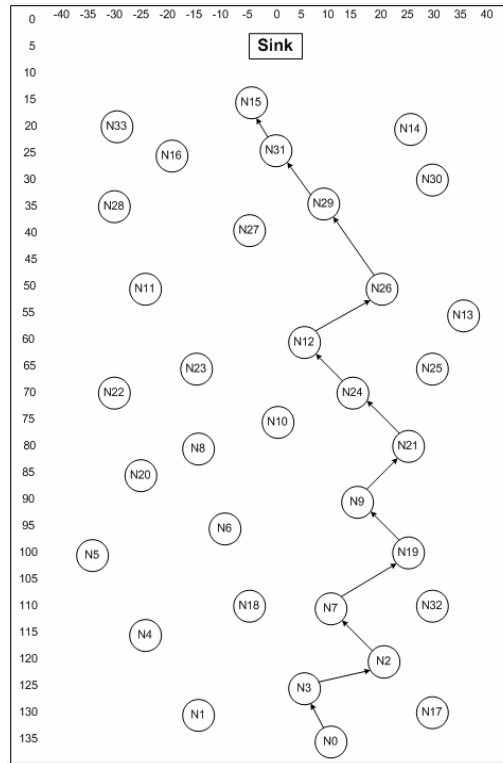
$P_{İletim}$ : Radyonun veri iletimi sırasında harcadığı enerji miktarı

$P_{Alım}$ : Radyonun veri alımı sırasında harcadığı enerji miktarı

$P_{Boş}$ : Radyonun boştayken harcadığı enerji miktarı

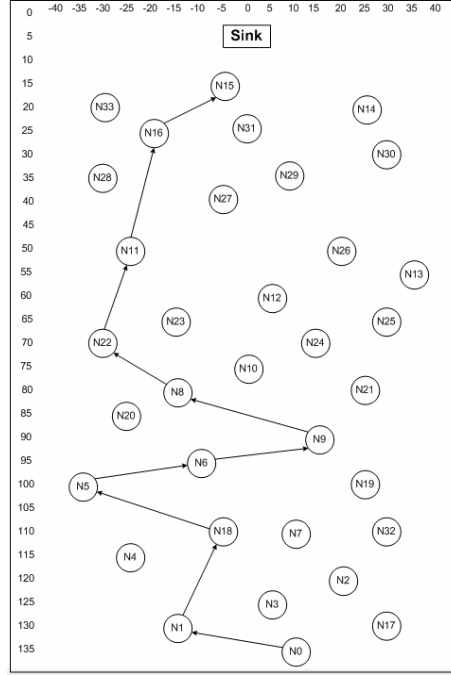
$P_{Uyku}$ : Radyonun uyku durumunda harcadığı enerji miktarı

Düğüm arasındaki mesafeler, Öklid uzaklığı olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.1 'de, en yakın komşuyu seçme (NN) yönlendirme metodu uygulandığında N0 'dan çıkan bir paketin, veri toplama merkezine kadar ulaşım şekli görülmektedir.



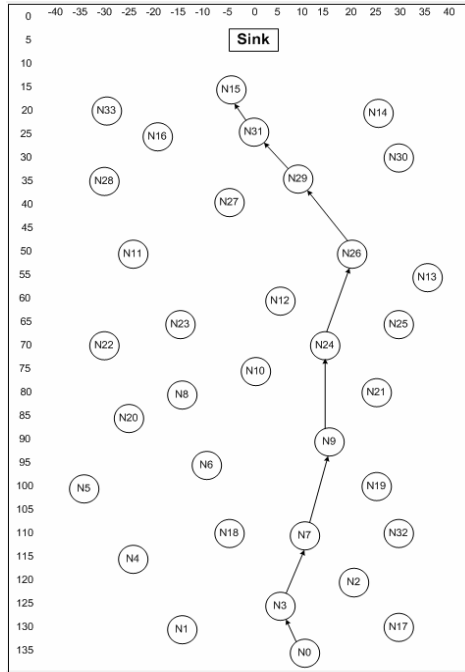
Şekil 4.1. NN metodu ile paket iletimi

Şekil 4.2 'de ise, en uzak komşuyu seçme (FN) yönlendirme metodu uygulandığında N0 'dan çıkan bir paketin, veri toplama merkezine kadar ulaşım şekli görülmektedir.



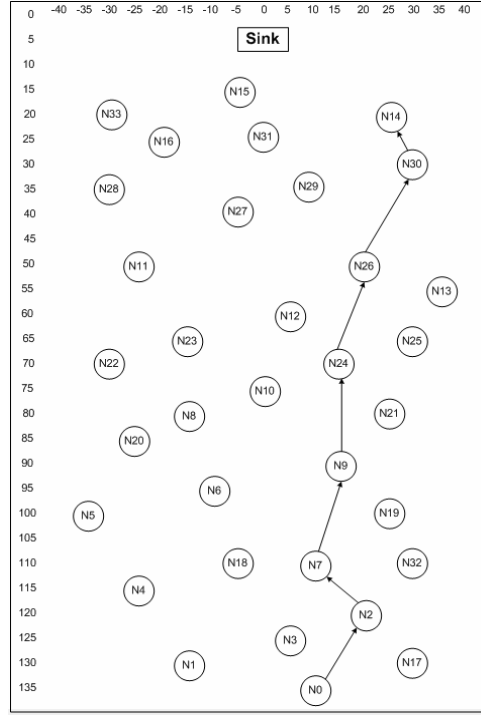
Şekil 4.2. FN metodu ile paket iletimi

Diğer bir yöntem olan, en yakın açığı yapan komşuyu seçme (CAN) metodu uygulandığındaki durum ise Şekil 4.3. 'de gösterilmektedir.

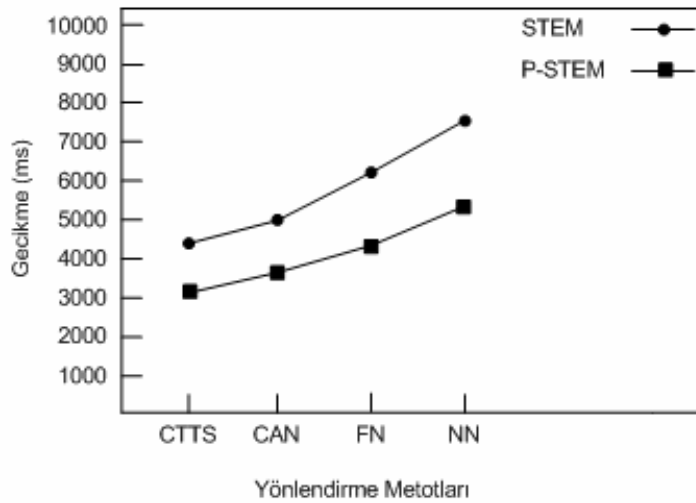


Şekil 4.3. CAN metodu ile paket iletimi.

Şekil 4.4, veri toplama merkezine en yakın olan komşuyu seçme (CTTS) yönlendirme metodu uygulandığında, N0 'dan çıkan bir paketin, veri toplama merkezine kadar olan yolculuğunda takip ettiği yolu göstermektedir. STEM yapısı ile iş hattı tekniği ekleyerek geliştirmiş olduğumuz P-STEM (STEM-with-pipelining) yaklaşımının gecikme yönünden performans mukayesesi, yukarıda bahsedilen dört ayrı yönlendirme metodu kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. CTTS metodu ile paket iletimi



Şekil 4.5. STEM ve P-STEM yapılarının gecikme yönünden mukayesesi

Tablo 4.2 'de ise, uygulanan dört ayrı yönlendirme metodunun her biri için ağ üzerinde harcanan toplam enerji miktarları ve N0 'dan yola çıkan paketin veri toplama merkezine ulaşmaya kadar üzerinden geçtiği düğüm sayısı belirtilmektedir.

Tablo 4.2: Harcanan toplam enerji miktarları ve dolaşılan düğüm sayısı

Yönlendirme Metodu	Toplam Harcanan Enerji (Joule)	Ziyaret Edilen Düğüm Sayısı
NN	4.9587	12
FN	4.9220	10
CAN	4.8852	8
CTTS	4.8667	7

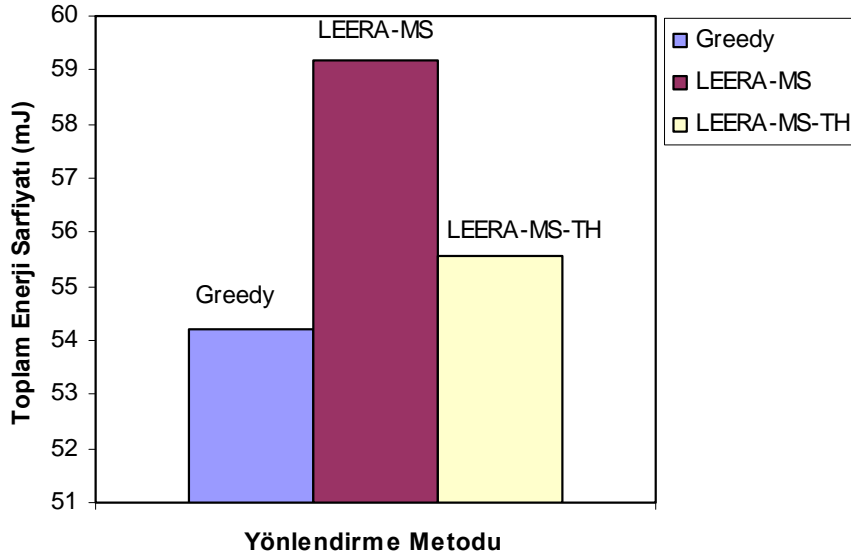
#### 4.2. ÇOKLU VERİ TOPLAMA MERKEZLİ YÜK DENGELİ ENERJİ VERİMLİ YÖNLENDİRME ALGORİTMASI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR

Önerilen LEERA-MS ve LEERA-MS-TH yöntemleri simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Ortak hat erişimde çakışmaları engellemek amacıyla, 802.11 CSMA/CA MAC protokolü kullanılmıştır. Radyo enerji sarfiyat parametreleri daha önceden yapılan bir makale çalışmasından [94] alıntı yapılmıştır:

$$P_{\text{iletim}} = 14.88 \text{ mW}, \quad P_{\text{Alım}} = 12.50 \text{ mW}, \quad P_{\text{Boş}} = 12.36 \text{ mW}, \quad P_{\text{Uyku}} = 0.016 \text{ mW}.$$

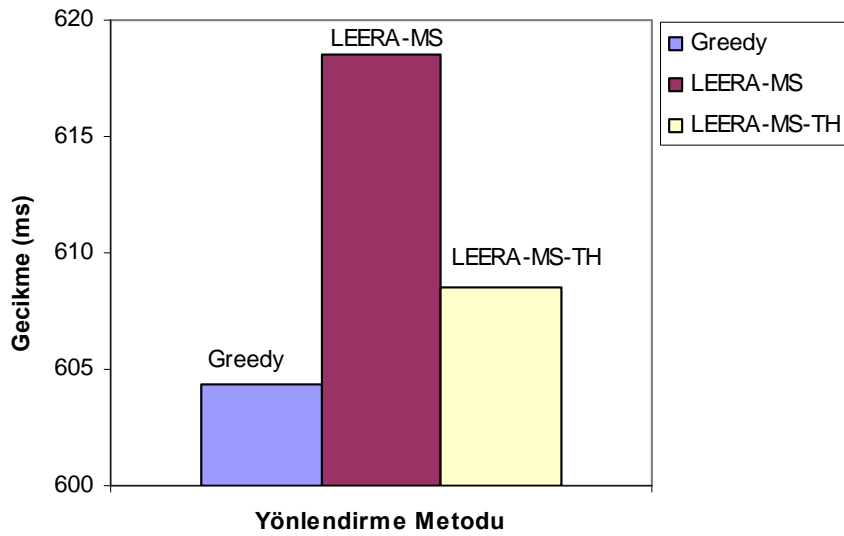
Bütün diğer gecikmeler ihmal edilerek, 176 düğüm ve 10 adet veri toplama merkezinin olduğu bir topolojide simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısı, parsellere bölünmüş ve her düğüm, coğrafi pozisyonuna bağlı olarak bir veri toplama merkezini kendisine referans edinmiştir. Her birinin iletim süresi 0.2 ms olan 50 adet paket, 0.1 ms aralıklarla  $N_0$  düğümünden yola çıkarılmıştır.

Üç değişik yönlendirme algoritması karşılaştırılmaktadır. Bunlardan ilki, en kısa yol algoritmasıdır (Shortest Path). İkinci yöntem ise, bizim önerdiğimiz çoklu veri toplama merkezli yük dengeli yönlendirme algoritmaları yapı olan LEERA-MS 'dir. Diğer yöntem de, LEERA-MS yapısının enerji eşik seviye mantığı eklenmiş hali olan LEERA-TH yöntemidir. Ağdaki bütün düğümlerin harcadığı toplam enerji seviyelerinin, her yöntem için gösterimi Şekil 4.6 'da ifade edilmiştir.



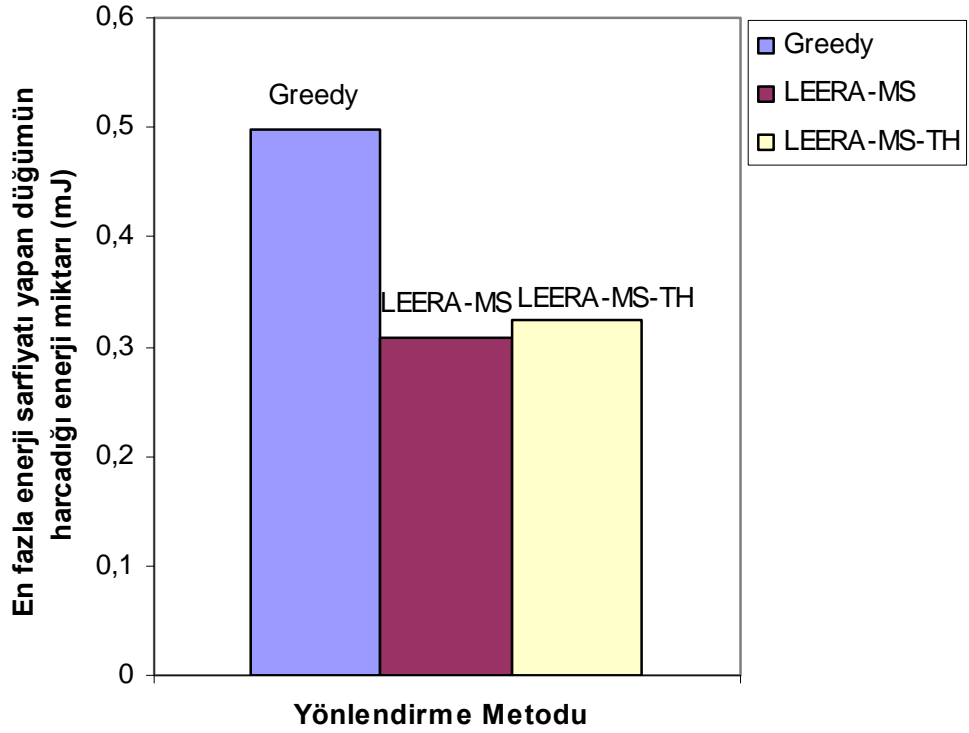
Şekil 4.6. Toplam harcanan enerji miktarlarının karşılaştırılması

Şekil 4.6 'da görüldüğü üzere, LEERA-MS yöntemi kullanıldığı vakit, toplam harcanan enerji miktarı daha fazladır. İlk bakışta bu biraz garip gelebilir. Çünkü önerilen yöntemin, ağ yapısının ömrünü uzattığını söylemiştik. Toplamda daha fazla enerji harcanmasının nedeni, paketlerin daha fazla düğüm üzerinden geçerek veri toplama merkezine ulaşmalarıdır. En kısa yol algoritmasının toplamda daha az enerji sarfiyatına yol açtığı görülmektedir. Toplam harcanan enerji sarfiyatını daha aza indirmenin yolu, LEERA-MS yapısına enerji eşik seviyesini eklenmiş hali olan LEERA-TH yöntemini uygulamaktır.



Şekil 4.7. Paket iletim sürelerinin karşılaştırılması

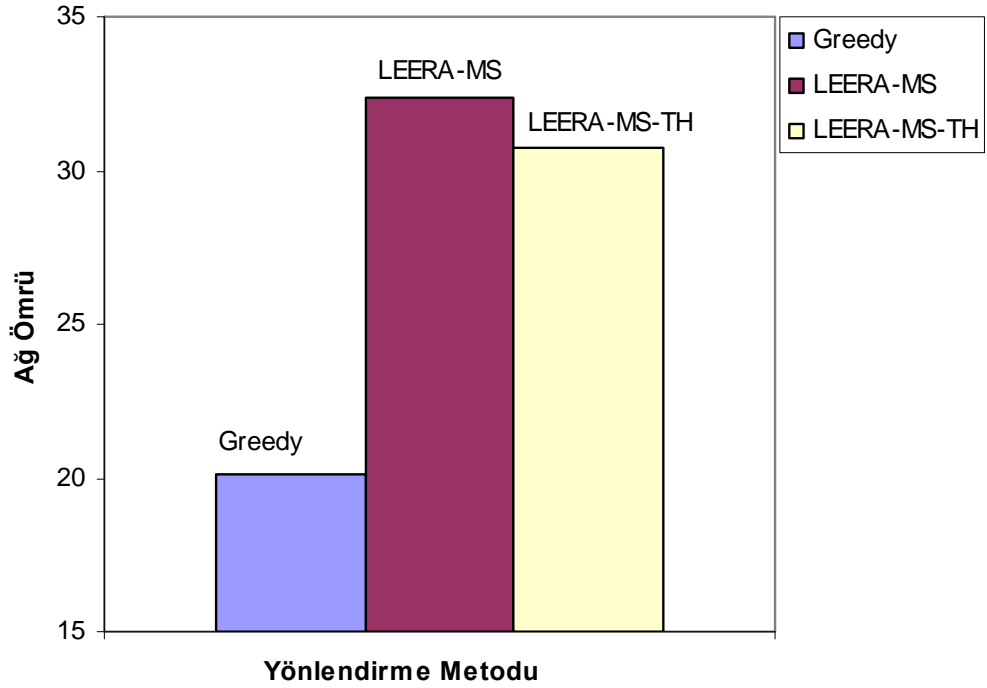
Şekil 4.7 'de,  $N_0$  'dan çıkan paketlerin, veri toplama merkezine ulaşma süreleri görülmektedir. LEERA-MS ve LEERA-TH yöntemlerinde, veri toplama merkezine yakınlık yerine, düğümlerin kalan enerji seviyeleri dikkate alındığından, paketlerin veri toplama merkezine ulaşma süreleri, en kısa yol algoritmasına göre daha fazladır. Şekil 4.8, ağ içinde en fazla enerji sarfiyatı yapan düğümün harcadığı enerji miktarını göstermektedir.



Şekil 4.8. En fazla enerji sarfiyatı yapan düğümün harcadığı enerji miktarı

Şekil 4.8 'de açıkça görüldüğü üzere, LEERA-MS ve LEERA-TH yöntemleri kullanıldığında, yük paylaşımı daha adil olacağından, düğüm başına harcanan enerji miktarı daha az olacaktır. LEERA-MS, Şekil 4.9 'da da görüleceği üzere, diğer yöntemlerden en kısa yol algoritmasına göre %40, LEERA-TH metoduna göre ise %5 daha iyi bir performans sergilemektedir.





Şekil 4.9. Ağ ömrünün karşılaştırılması

### 4.3. ÇOK KANALLI KÜMESEL YAPILI KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ YAPISINDA ENERJİ KORUNUMLU JETON TABANLI YÖNLENDİRME ALGORİTMASI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR

Önerdiğimiz yapının performansını test etmek amacıyla, çok katmanlı bir ağ yapısı kurulmuş ve her bir katmanda kümeler oluşturulmuştur. Simülasyon kolaylığı açısından, küme yapısı ve topoloji üzerindeki dağılımları düzgün olarak ayarlanmıştır. Her bir düğümün iki adet radyoya sahip olduğu kabul edilmiştir. Radyolardan bir tanesi küme içi iletişim ve kümeler arası gönderme işlemi için, diğeri ise iç kuşaktaki kümelerden gelen verileri almak üzere görevlendirilmiştir. Tablo 4.3 'de görüldüğü üzere, radyo bit iletim hızı 30 Kbps olarak kabul edilmiştir.  $E_{elec}$ ,  $\varepsilon_{fs}$ ,  $\varepsilon_{mp}$  parametreleri için de literatürde uygulanan, tabloda görülen değerler uygulanarak enerji sarfiyatı hesaplamalarında kullanılmışlardır. Simülasyonların yapıldığı ağ topolojisi üç katmandan oluşmaktadır. Yine simülasyon kolaylığı açısından, her katmandaki küme sayısı  $4*n$  formülüne göre ayarlanmıştır. Bu ifadede ki  $n$  terimi, katman numarasını göstermektedir. Buna göre, 1,2 ve 3 numaralı katmanlar sırasıyla 4, 8 ve 12 'şer adet

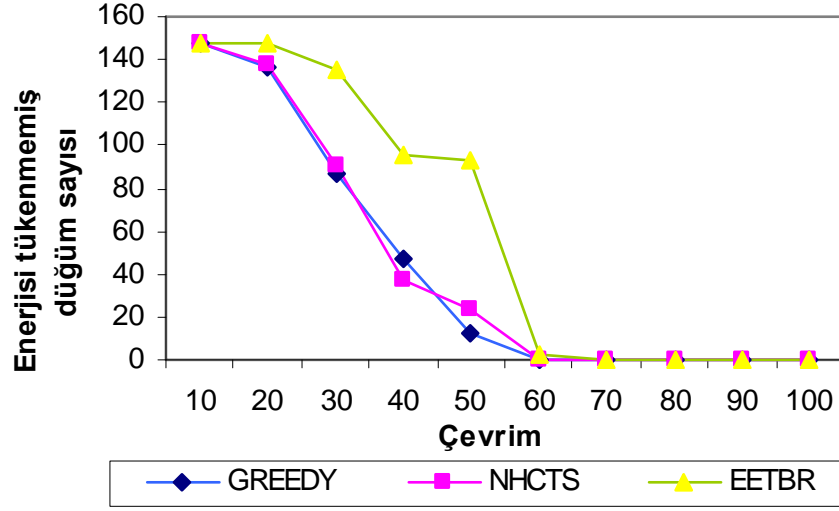
küme içermektedirler. Her bir kümenin dairesel bir şekle sahip olup, yarıçapı da  $R_0 * n$  ifadesine göre ayarlanmıştır. Bunun sebebi, *Sıcak Bölge (Hot Region)* probleminin etkisini azaltmak amacıyla veri toplama merkezlerine daha yakın olan, diğer bir deyişle dış katmanlarda yer alan kümelerin yarıçaplarının büyük olarak daha fazla düğüm içermesidir.  $R_0$ , en içteki katmanda yer alan kümelerin yarıçapı olup 16 m olarak kabul edilmiştir. Böylece, ikinci katmanda yer alan bir kümenin yarıçapı 32 m olacaktır. Yarıçapı ve büyüklüğü, bulunduğu katmana göre değişen kümelerin, içerdikleri düğüm sayısı da değişecektir. Katman numarası  $n$  olan bir kümenin içinde barındırdığı düğüm sayısı  $(n^2 + n + 4)/2$  ifadesine göre belirlenmektedir. Dolayısıyla, üç numaralı katmanda, diğer bir deyişle en dış katmanda yer alan bir küme 8 adet düğüm içerecektir. Topoloji üç katmandan oluşmakta ve toplamda 148 adet düğüm bulunmaktadır. Ağ yaşam süresi, her biri 18.5 ms olan raundlardan oluşmaktadır.

Tablo 4.3: Simülasyon parametreleri

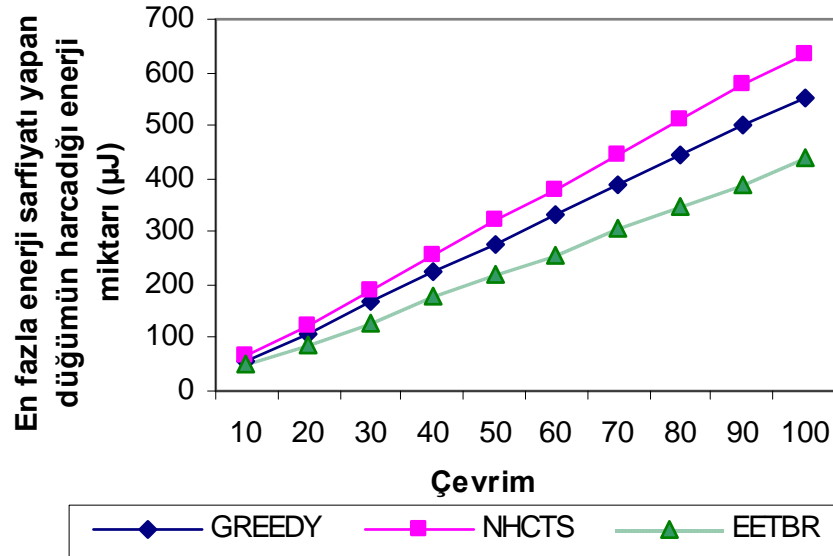
Radyo veri iletim hızı	30 Kbps
Jeton uzunluğu	5 B
1. kuşaktan doğan kümeler arası iletim paket yapısı	12 B
2. kuşaktan doğan kümeler arası iletim paket yapısı	10 B
3. kuşaktan doğan kümeler arası iletim paket yapısı	8 B
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$E_f$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
$E_{mp}$	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>
Kuşak sayısı	3
Ağdaki toplam düğüm sayısı	148
$n$ . kuşakta yer alan küme sayısı	$4 * n$
$n$ . kuşakta yer alan bir kümenin içerdiği düğüm sayısı	$(n^2 + n + 1) / 2$
Periyot uzunluğu	18.5 ms

Her bir raundun uzunluğu 18.5 ms olacak şekilde, 100 raund için deney yapılmıştır. Önerdiğimiz maliyet formülüne göre sonraki durak seçimi yöntemini, diğer iki metotla karşılaştırdık. Bizim önerdiğimiz yöntemde, küme liderleri, daha az enerji harcayabilmek amacıyla, verilerini en yakın veri toplama merkezlerine yönlendirmek isterler. Dolayısıyla, en yakın veri toplama merkezi doğrultusundaki dış katman kümelerinden birisi bir sonraki durak olarak seçilir. Karşılaştırma yaptığımız metotlardan birisi, en yakın toplama merkezine en yakın olan dış katman küme liderinin seçildiği GPSR [55] yöntemidir. Diğer yöntem ise, gönderici düğüme en yakın olan küme liderinin seçildiği NHCTS 'dir. Şekiller 4.10-4.12 'de görüldüğü üzere, GPSR ve NHCTS yöntemleri birbirine yakın performanslar göstermektedirler. Ancak, Şekil 4.13

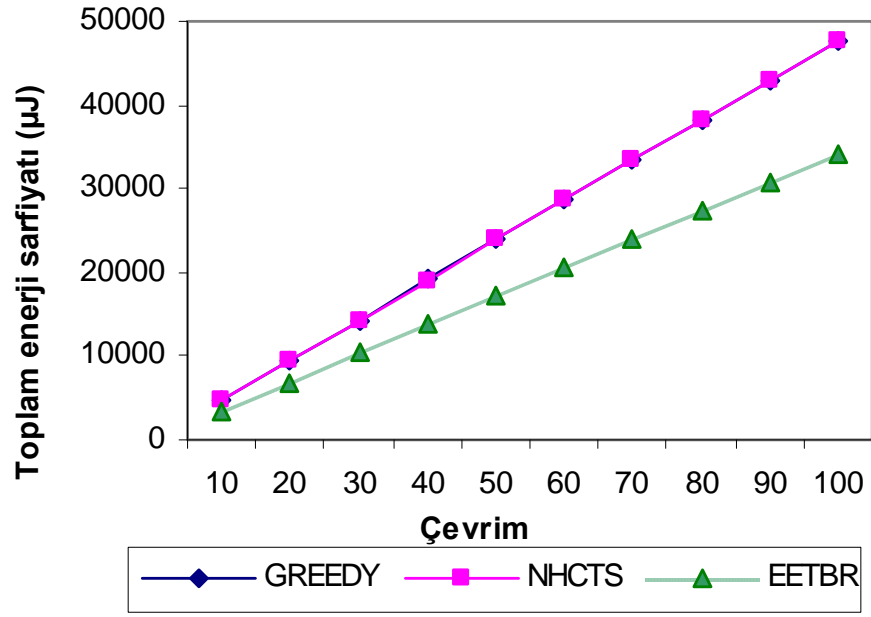
'de ifade edildiği gibi bizim önerdiğimiz maliyet hesaplı yönlendirme metodu uygulandığında, ağın ömrünün uzadığı tespit edilmiştir. 60 çevrim sonunda, diğer iki yöntemli ağ yapılarında düğümlerin enerjileri tükenirken, bizim önerdiğimiz metodu kullanan ağ yapısında 70 çevrimden sonra bile enerjisi tükenmemiş düğümler bulunmaktadır.



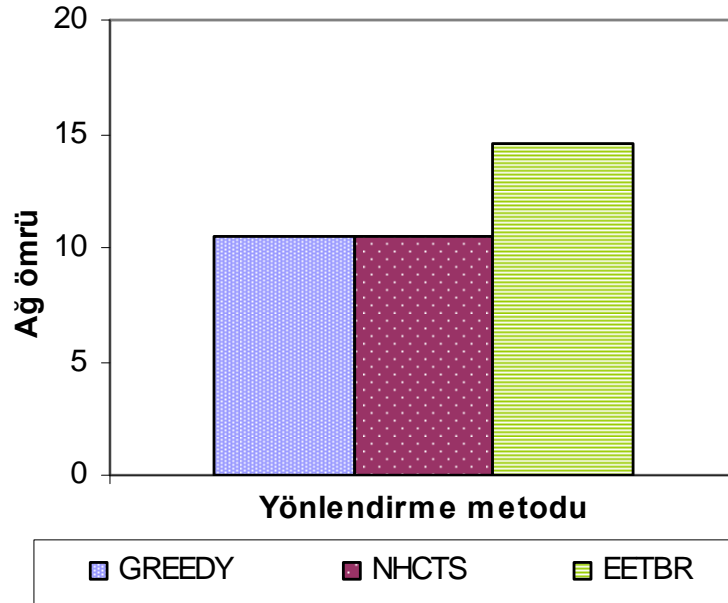
Şekil 4.10. Ağ üzerinde enerjisi tükenmemiş düğüm sayısı



Şekil 4.11. En fazla enerji sarfiyatı yapan düğümün harcadığı enerji miktarı



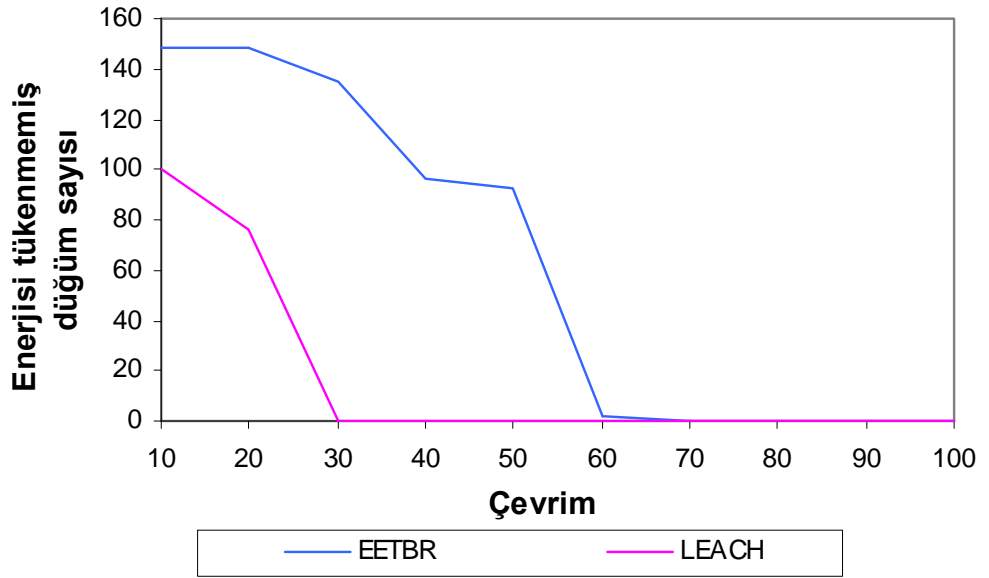
Şekil 4.12. Ağ üzerindeki düğümler tarafından harcanan toplam enerji miktarı



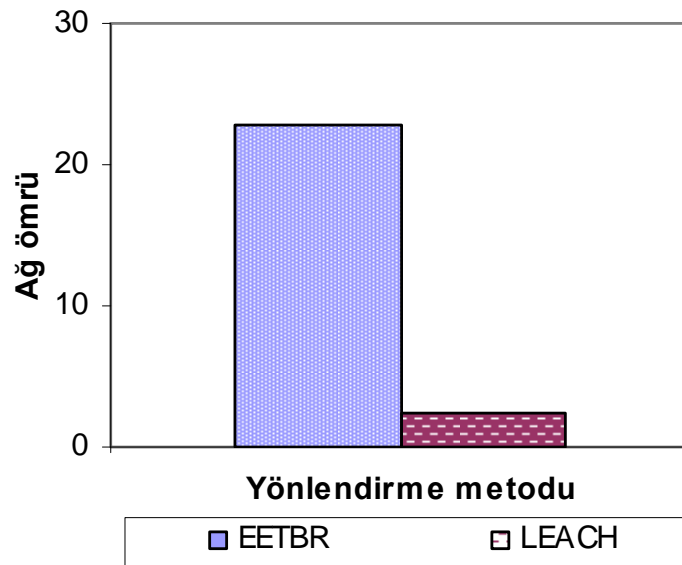
Şekil 4.13. Ağ ömrü

Veri iletimi sırasında harcanan enerjinin miktarı, gönderici ile alıcı arasındaki mesafe ile orantılıdır. Bizim önerdiğimiz metotta da bir sonraki düğüm seçilirken dikkate alınan diğer bir faktör de yönlendirme yaparken, her düğüm kendisine en yakın olan veri toplama merkezini hedef olarak seçer. Bunun yanında, enerji korunumunu etkileyen diğer bir faktör de, direkt olarak veri toplama merkezine iletim yapmak yerine çok

sekmeli iletim tercih edildiğinden, çok daha fazla enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Eğer küme liderleri, kendi kümeleri içinde topladıkları veriyi direkt olarak veri toplama merkezine iletme yöntemini seçerlerse, Şekil 4.14 'de de görüldüğü gibi, 30 çevrim sonunda ağdaki bütün düğümlerin enerjisi tükenmektedir. Direkt iletim yerine çok sekmeli iletim tercih edildiğinde ağ yapısının ömründeki uzama miktarı Şekil 4.15 'de gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Enerjisi tükenmemiş düğüm sayısı



Şekil 4.15. Ağ ömrü

#### 4.4. ÇOK KANALLI ÇOKLU ORTAM KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KATMANLAR ARASI ETKİLEŞİMLİ MİMARİ YAPISI İLE İLGİLİ YAPILAN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI VE ELDE EDİLEN BULGULAR

Önerdiğimiz katmanlar arası etkileşimli, çok kanallı, yük dengeli yönlendirme algoritmasını, Greedy (Greedy Perimeter Stateless Routing) [55] ve tezimizin daha önceki aşamasında sunduğumuz LEERA-MS [30] yöntemi ile karşılaştırdık. Bildiğimiz kadarıyla, çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar için önerilen yöntemlerde, servis kalitesi parametresi olarak genelde, güvenilirlik ve gecikme kavramları göz önünde bulundurulmuştur. Ancak, her ne kadar, algılayıcı düğümlerin kabiliyetleri ve de enerji kaynaklarının kapasiteleri gelişmiş olsa da, enerji korunumu ilkesi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple, önerdiğimiz bu yöntemde, belirtilen gecikme servis kalitesi ile birlikte, paket iletiminde mümkün olduğunca fazla düğümün görev alması sağlanmaktadır.

Deneyle, JAVA dili ile yazılan bir simülatör üzerinde Tablo 4.4 'de belirtilen değerler referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

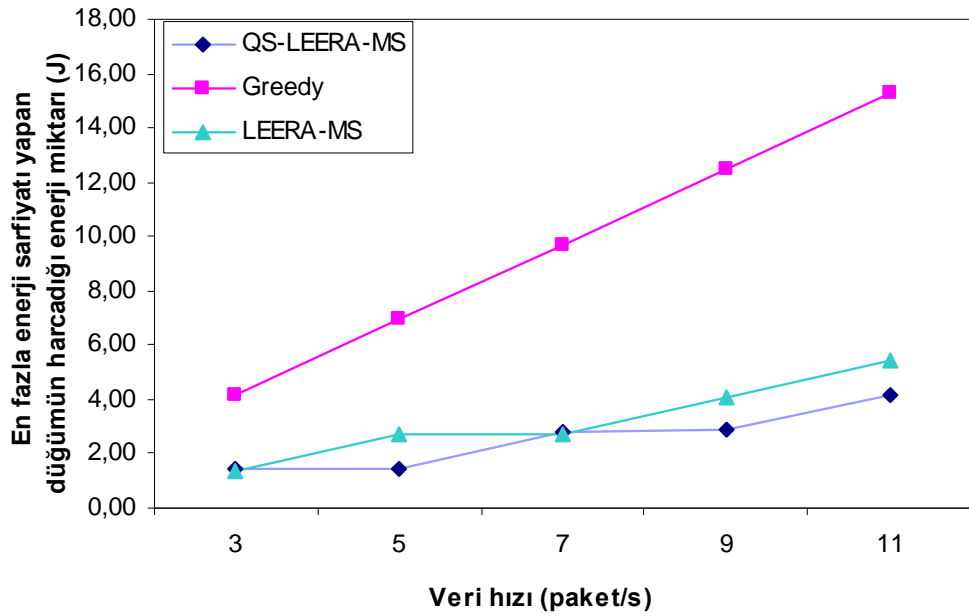
Tablo 4.4: Simülasyon parametreleri

Kontrol radyosu iletim hızı	30 kbps
Veri radyosu iletim hızı	250 kbps
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$E_f$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
$E_m$	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>
Gerçek zamanlı veri üretim hızı	~80 Kbits/s
$d_0$ (eşik uzaklık değeri)	30 m
Talep mesaj boyutu	51 bit
Video çerçeve boyutu	16424 bit
Gerçek zamanlı olmayan paket boyutu	350 bit
Güzargah talep raporu boyutu	27 bit
NACK mesaj boyutu	41 bit

Sistemde  $n$  adet örtüşmeyen kanal olduğu varsayımı yapılmıştır. Her bir düğümün, kanal sayısı kadar,  $n$  adet yarı-çift yönlü radyoya sahip olduğu kabul edilmektedir. Düşük hızlı ve de düşük enerji sarfiyatına sahip olan radyo, statik olarak kontrol kanalına sabitlenmiştir. Kontrol radyosuna göre daha yüksek iletim hızına sahip veri iletim radyolarından biri ise, güzargah talebi onaylandığı takdirde, belirlenen veri kanalına ayarlanarak, bağlantı işlemi sona erene kadar bu kanal üzerinde çalışır. Ayrıca,

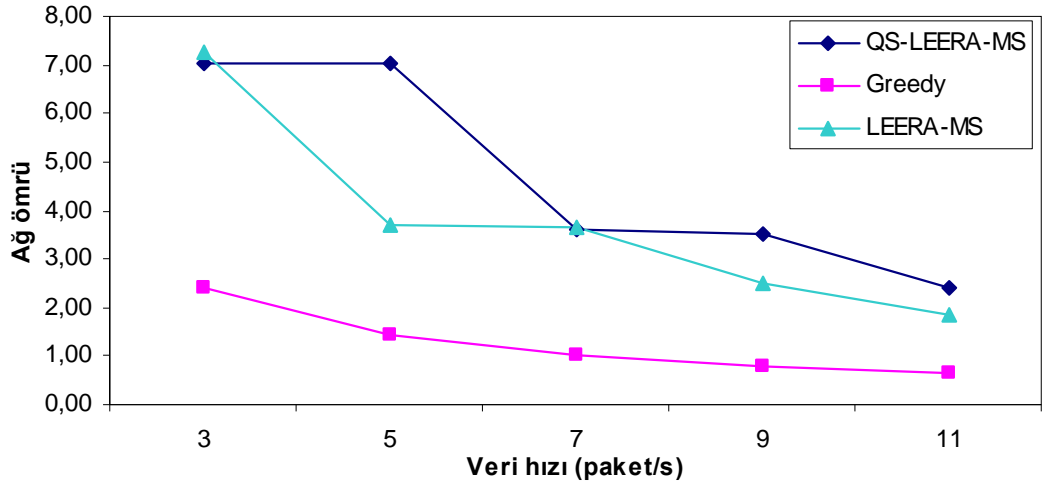
algılayıcı düğümler, hem skalar hem de çoklu ortam verisi elde etme ve iletme kabiliyetine sahiptir. Böylece, sistemde temel olarak, gerçek zamanlı olmayan skalar ve gerçek zamanlı olan çoklu ortam verilerinin iletimi söz konusudur.

Şekil 4.16 'da gösterildiği üzere, tezimizin bu aşamasında önerdiğimiz QS-LEERA-MS metodu, Greedy ve daha önce önerdiğimiz LEERA-MS yöntemleri ile enerji sarfiyatı yönünden karşılaştırılmıştır. Ağ yapısının ömrünü veri üretim hızı etkilemektedir. Veri iletim bandından istifade edebilme oranı ile gecikme gibi faktörler ile adil yük dağılımı ise veri üretim hızından etkilenmemektedir.



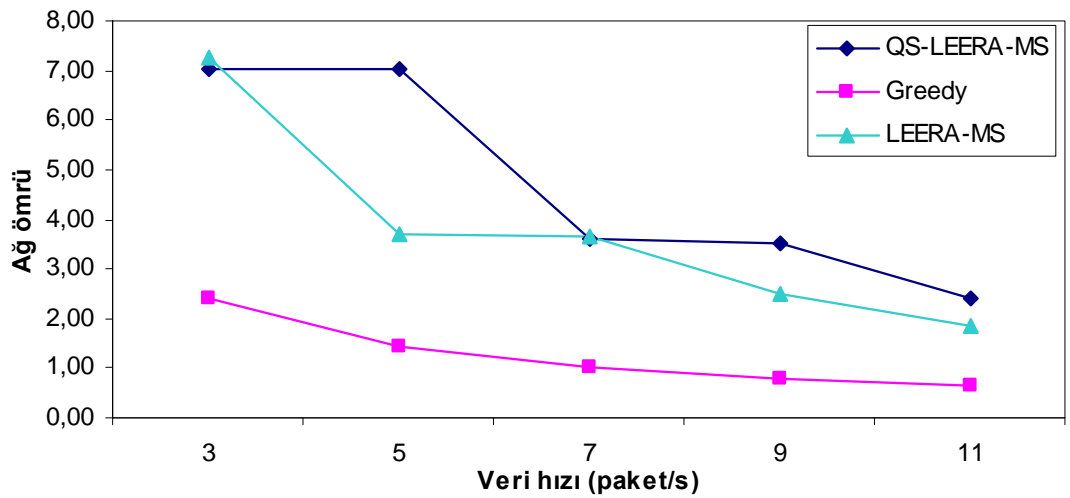
Şekil 4.16. Metotların enerji sarfiyatı yönünden mukayeseleri

Şekil 4.16 'dan anlaşılacağı üzere, ağ üzerinde en fazla enerji harcayan düğümün harcadığı enerji miktarının en az olduğu yöntem QS-LEERA-MS metodudur. Bu da ağ ömrünün daha uzun olmasını sağlamaktadır. Greedy yönteminde ağ ömrünün kısa olmasının sebebi, paket serisinin iletiminde, birinci paketin iletimin kullanılan güzargahın, geriye kalan diğer paketlerinin de iletiminde kullanılmasıdır. Halbu ki, LEERA-MS ve QS-LEERA-MS yöntemlerinde paketler, baz istasyonuna ulaşmak için değişik güzargahlar takip ederler. Bu üç yöntemin ağ ömür sürelerinin mukayeseleri Şekil 4.17 'de yapılmıştır.



Şekil 4.17. Metotların ağ ömrünün süresi yönünden mukayeseleri

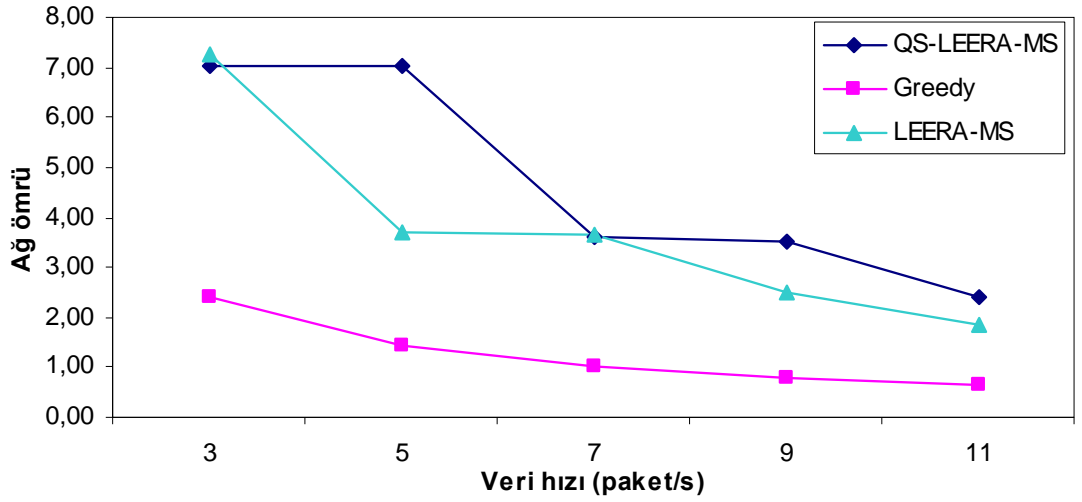
Daha önce de belirtildiği gibi, örtüşmeyen kanal sayısı arttıkça, yük dengesinin daha adil dağılmasını sağlayacak güzergahların sayısı artacaktır. Bununla birlikte, aynı anda ortak iletim hattına erişim imkanı sağlanacağından, veri iletim bandından istifade edebilme oranı da artmış olacaktır. Çok kanallı mekanizma sayesinde, gerçek zamanlı paket serisi, birden fazla alt serilere bölüştürülerek, servi kalitesi de gözetilerek, bunların değişik yollar üzerinden veri toplama merkezine iletilmeleri imkanı doğacaktır. Şekil 4.18 'de görüldüğü gibi, kanal sayısı arttıkça yük dengesinin daha güzel dağıldığını görmekteyiz. Bunun sebebi, daha önceden de belirttiğimiz üzere, veri iletiminde daha fazla düğümün görev almasıdır.



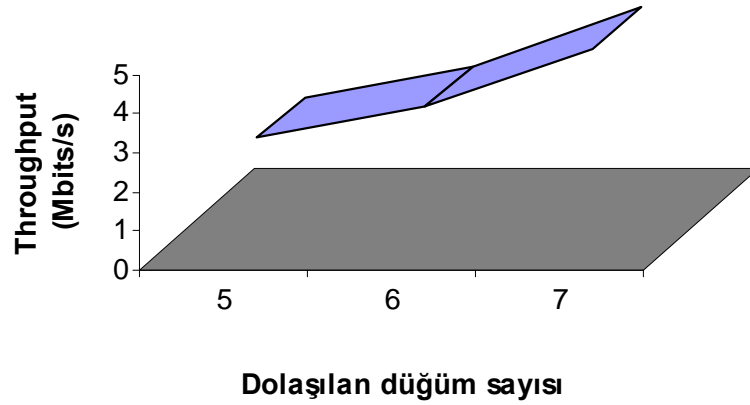
Şekil 4.18. Kanal sayısının enerji sarfiyatına etkisi



Ağ ömrünü etkileyen diğer bir faktör ise, talep edilen servis kalitesidir. Şekil 4.19 'da da görüldüğü üzere, talep edilen servis kalitesindeki azalma, ağ ömrünün uzamasını sağlamaktadır. Aynı zamanda birim zamanda iletilen veri miktarı da artmaktadır. Çünkü daha fazla kanal ile daha fazla güzargah kullanılarak, daha fazla verinin aynı anda iletim hattına konması sağlanabilmektedir. Şekil 4.20, talep edilen servis kalitesinin, birim zamanda iletilen veri miktarına etkisini sergilemektedir.



Şekil 4.19. Talep edilen servis kalitesinin enerji sarfiyatına etkisi



Şekil 4.20. Talep edilen servis kalitesinin birim saniyede iletilen veri miktarına etkisi

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, Kablosuz Algılayıcı Ağların en önemli problemi, düğümlerin küçük ebatlarda olmasından dolayı, sınırlı sayıda enerji miktarına sahip olmalarıdır. Küçük ebatlarda üretilmenin getirdiği diğer bir dezavantaj, radyolarının da iletim güçlerinin sınırlı olmasıdır. Bu nedenle, klasik bir tasarsız ağ yapısı örneği olarak, çok sekmeli iletişim mantığını uygularlar. Zaten düğümlerin, direkt olarak veri toplama merkezine verilerini ulaştırmaya güçleri yetse bile, bunu tercih etmek pek de faydalı olmayacaktır. Bunun sebebi, veri iletirken harcanan enerji miktarının uzaklıkla orantılı biçimde artmasıdır. Dolayısıyla, veri ne kadar uzak bir mesafeye iletilmek istenirse, harcanması gereken enerji miktarı da o kadar fazla olacaktır.

Algılayıcı düğümlerin en fazla enerji sarfiyatına sebep olan alt birimlerinden birisinin de haberleşme üniteleri olduğunu daha önceden belirtmiştik. Yapılan çalışmalar, açık durumda ancak veri iletmiyorken, diğer bir deyişle boşa bir radyonun harcadığı enerji miktarının, veri alış verişi sırasında harcanan enerji miktarına yakın bir enerji sarfiyatına sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, veri iletimi yapmıyorken, bir radyonun boşu boşuna açık durumda tutularak enerji harcamasına gerek yoktur. Bunun yerine, radyoların uyku durumunda tutularak, diğer bir deyişle kapatılarak, periyodik olarak uyandırılması ve kendilerine iletilmek istenen bir veri olup olmadığının kontrolünü yapması çok daha mantıklı olacaktır. Buna hizmet çevrimi(duty-cycling) adı verildiğini önceki bölümlerde ifade etmiştik.

Biz de tezimizin ilk aşamasında, bahsi geçen hizmet çevrimi metodolojisini uygulayan bir yapı olan STEM yaklaşımını inceledik. Yaptığımız incelemeler sonucunda, STEM yapısının gecikme yönünden bazı eksik tarafları bulunduğunu tespit ettik ve bunu iyileştirmenin yollarını aradık. Sonuç olarak, iş hattı (pipelining) yaklaşımı eklenerek, STEM-with-pipelining yapısını sunduk. STEM yapısında, iki düğüm haberleşirken, diğer bir deyişle, gönderici düğüm verisini iletirken, alıcı düğüm bir sonraki düğümüne veriyi alır almaz iletmez. Çünkü bu üçüncü düğüm henüz uyku halindedir ve uyanma

periyodunu bekleyecektir. Dolayısıyla, 2. düğüm veriyi alsa bile anında 3. düğüme iletim yapamayacak, mecburen 3. düğümün uyanmasını bekleyecektir. Bu da, gereksiz bir gecikmeye sebep olacaktır. Halbu ki, 1. ve 2. düğümlerin veri iletim öncesi el sıkışma mekanizmasında, zaten gerçekleşecek iletişim hakkındaki bilgi mevcuttur. Bu bilgiyi 3. düğüm de zaten elde etmektedir. Bu bilgiye dayanarak, 3. düğüm, uyanma periyodunu beklemek yerine, uyanma zamanını, 2. düğümün veriyi alma süresinin bitimine ayarlarsa, 2. düğüm, boşu boşuna, uyanma periyodunu beklemek zorunda kalmayacaktır. P-STEM yapısıyla, bu gecikmedeki iyileştirmeyi gerçekleştirdik.

Tezin ikinci aşamasında, ilk bölümde anlatılan iş-hattı tekniği eklenerek geliştirilmiş olan P-STEM hizmet çevrimi üzerine kurulu, çoklu veri toplama merkezli bir yapı üzerinde, enerji korunumlu, dengeli yük dağılımlı bir yönlendirme algoritması geliştirdik. Önceki bölümlerde, kablolu ve diğer kablosuz ağlarda uygulanan klasik yönlendirme tekniklerinin, Kablosuz Algılayıcı Ağlar için pek uygun olmadığını belirtmiştik. Sebebinin ise, bu algoritmaların, enerji faktöründen ziyade, veri iletim süresi, hızı, kaybı gibi faktörleri dikkate aldıklarını ifade etmiştik.

Kablosuz Algılayıcı Ağlar için geliştirilen tekniklerde ise enerji faktörü göz önünde bulundurulmaktadır. Yönlendirme katmanında çalışan algoritmanın, enerji faktörünü göz önüne alarak verileri yönlendirme yapabilmesi için, ağ üzerindeki düğümlerin enerji seviyeleri hakkında bilgi sahibi olmaları gerekir. Bu değişik şekillerde sağlanabilir. Ya merkezi bir düzenleyici, örneğin veri toplama merkezi, düğümler üzerinde meydana gelen değişiklikleri bir şekilde hesaplayıp bütün ağa yayım yapabilir; ya düğümler, periyodik olarak veya talep gelmesi durumunda (on-demand) enerji seviyelerini komşuluklarına yayım yapabilir ve bu bilgiler bütün ağa yayılır; ya da bizim burada uyguladığımız şekilde, hiçbir bilgilendirme mesajlarına gerek kalmadan, veri iletim öncesi yapılan el sıkışma mekanizmasında paylaşılan bilgilere dayanarak, veri alışverişini yapan düğümlerin komşuları, bu iki düğümün enerji seviyeleri hakkında tuttıkları bilgileri güncellerler. İlk iki yöntemi tercih etmememizin sebebi, zaten enerji sıkıntısı olan düğümlerin, bilgilendirme mesajlarını alıp iletme yoluyla daha fazla enerji sarfiyatı yapmalarına engel olmaktır.

Ardı ardına iletilmesi gereken veri paketlerini, mümkün olduğu kadar, değişik yollar üzerinden göndererek, hem veri iletim yükünü mümkün olduğunca fazla düğümün üzerine yaydık ve böylece de *Sıcak Bölge (Hot-Spot Region)* problemine bir nebze olsun çözüm üretmiş olduk. Uyguladığımız yöntem (LEERA-MS) ile ağın ömründe %40 civarında bir iyileştirme tespit ettik.

Tezin üçüncü aşamasında, çok katmanlı, kümesel yapılı bir ağ yapısı üzerinde, maliyet hesaplamalı, jeton tabanlı yönlendirme algoritması geliştirilmiştir. Eşit yük dağılımını sağlamak dolayısıyla da ağ ömrünü uzatmak amacıyla, bir sonraki durak seçimi maliyet hesaplı bir denkleme göre yapılmaktadır. Kümesel yapılı ağların yapılarının diğer ağ çeşitlerine göre daha fazla enerji korunumlu olduğu, yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere, veri toplama merkezi yakınlarında konumlanmış düğümler, veri toplama merkezine uzak olan ve verilerini direkt olarak ulaştıramayan düğümlerin verilerini iletmek üzere alırlar ve gönderirler. Dolayısıyla da en fazla enerji sarfiyatına maruz kalan düğümler, bu Sıcak Bölge (Hot Spot Area) adı verilen kısımda konumlanmış düğümlerdir. Bu yüzden, çok katmanlı bir yapı uygulanarak, veri toplama merkezi yakınında bulunan katmandaki kümeler daha büyük ebatlı olup, daha fazla düğüm içermektedir. Böylece, sıcak bölgede yer alan düğümlere, küme lideri olma görevi daha az sıklıkta gelecektir.

Yük dağılımına katkıda bulunan diğer bir faktör ise çoklu veri toplama merkezi kullanılmasıdır. Sadece bir adet veri toplama merkezini topolojinin bir tarafına yerleştirirsek, ağ üzerindeki bütün veri trafiği tek bir tarafa doğru akar. Dolayısıyla da, veri toplama merkezi tarafında bulunan düğümlerin enerjileri en önce tükenir. Oysa ki, çoklu veri toplama merkezi uygulamasıyla, ağdaki düğümler verilerini tek bir noktadaki veri toplama merkezine göndermek yerine, kendilerine en yakın olan veri toplama merkezine iletirler.

Bunların da ötesinde, en yakın veri toplama merkezine doğru veri iletimi yapılırken, bir sonraki durak seçiminde de enerji gözetimli bir maliyet formülüne göre seçim yapılmaktadır. Uygulanan enerji gözetimli maliyet formülü sayesinde % 50 'ye yakın bir ağ ömründe uzama tespit edilmiştir.

Klasik kablosuz algılayıcı ağların, çoklu ortam verilerini elde etme ve iletebilme kabiliyetine ulaşmasıyla birlikte çözülmesi gereken yeni problemler ortaya çıkmıştır. Çoklu ortam verisini ortamdaki elde eden algılayıcı düğümler, elde ettikleri bu veriyi makul gecikmeler içerisinde veri toplama merkezine iletmek zorundadır. Bu sebeple, çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar için bir protokol tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken husus sadece enerji korunumu değildir, aynı zamanda servis kalitesi de dikkate alınmalıdır.

Biz de tezimizin son aşamasında, hem servis kalitesini hem de enerji korunumunu göz önünde tutan, çok kanallı, katmanlar arası etkileşimli, yük dengeli yönlendirme algoritması içeren bir yapı üzerinde çalıştık. Bu yapının en önemli özelliği, çok kanallı iletim vasıtasıyla, verilen birden fazla güzergah üzerinden veri toplama merkezine iletebilmesidir. Algılanan bir olay sonucunda üretilen çoklu ortam paket serisi, talep edilen servis kalitesine sadık kalınarak kurulan güzergah sayısına bağlı olarak birden fazla alt paket serisine bölüştürülerek, kurulan bu yollar üzerinden gönderilir. Buradaki önemli nokta, güzergahlar belirlenirken, servis kalitesi parametresi olarak gecikmeyi temsil eden dolaşım süresi sayısının başta belirlenen değeri aşmamasıdır. Çünkü, paketlerin iletiminde ne kadar fazla düğüm rol alırsa, paketler o kadar fazla gecikmeye maruz kalırlar.

Önerdiğimiz yapıyı (QS-LEERA-MS), Greedy yöntemi ve de daha önceki aşamada sunmuş olduğumuz LEERA-MS ile karşılaştırdık. Simülasyon sonuçlarından da görülebileceği üzere, QS-LEERA-MS 'yi uygulayan bir ağın ömrü, Greedy ve LEERA-MS 'yi uygulayan bir ağın ömrüne göre daha uzun olmaktadır. Çok kanallı bir yapı kullanarak istifade edebildiğimiz çok güzergahlı yaklaşım sayesinde, tek güzergah-tek kanal yaklaşımıyla ortaya çıkabilecek olası tıkanıklıkların ve veri kayıplarının da önüne geçilmiş olmaktadır. Böylece, birim zamanda iletilen veri miktarı da artmaktadır.

Çalışmamızın son aşaması olan çoklu ortam kablosuz algılayıcı ağlar ile ilgili önerdiğimiz mantığı, küme yapılı kablosuz algılayıcı ağlar için de uygulayarak, daha güzel bir performans başarımı sağlamayı hedeflemekteyiz.

## KAYNAKLAR

1. SOHRABY, K., MINOLI, D., ZNATI, T., 2007, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*, Wiley, USA, 9780471743002.
2. KUROSE, J., LESSER, V., DE SOUSA E SILVA, E., JAYASUMANA, A., LIU, B., 2003, *Sensor Networks Seminar*, University of Massachusetts, USA.
3. WHITEHOUSE, K., JIANG, X., *Calamari: a sensor field localization system*, <http://www.cs.berkeley.edu/~kamin/calamari/> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2010].
4. WHITEHOUSE, K., SHARP, C., BREWER, E., CULLER, D., Hood: A neighborhood abstraction for sensor networks, *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'04)*, 6-9 June 2004 Boston, 99-110.
5. WHITEHOUSE, K., KARLOF, C., CULLER, D., 2004, Getting ad-hoc signal strength localization to work, *Technical Report*, University of California-Berkeley, USA.
6. MALAN, D., FULFORD-JONES, T., WELSH, M., MOULTON, S., CodeBlue: an ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care, *Proceedings of the Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems (WAMES 2004)*, 6-9 June 2004 Boston, 12-15.
7. LORINCZ, K., MALAN, D., FULFORD-JONES, T., NAWOJ, A., CLAVEL, A., SHNAYDER, V., MAINLAND, G., MOULTON, S., WELSH, M., 2004, Sensor networks for emergency response: challenges and opportunities, *IEEE Pervasive Computing*, 3 (4), 16-23.
8. TOLLEFSEN, W., PEPE, M., MYUNG, D., GAYNOR, M., WELSH, M., MOULTON, S., 2005, iRevive, a Pre-hospital Mobile Database for Emergency Medical Services, *International Journal of Healthcare Technology and Management (IJHTM)*, 6 (4), 454-469.
9. FULFORD-JONES, T., WEI, G. Y., WELSH, M., A portable, low-power, wireless two-lead EKG system, *Proceedings of the 26th IEEE EMBS Annual International Conference*, 1-5 September 2004, California, 2141 – 2144.

10. WELSH, M., MALAN, D., DUNCAN, B., FULFORD-JONES, T., MOULTON, S., Wireless sensor networks for emergency medical care, *GE Global Research Conference*, Harvard University and Boston University School of Medicine, Boston, MA, March 2004, 13-15.
11. MYUNG, D., DUNCAN, B., MALAN, D., WELSH, M., GAYNOR, M., MOULTON, S., Vital dust: wireless sensors and a sensor network for real-time patient monitoring, *Proceedings of the 8 th Annual New England Regional Trauma Conference*, November 2003, Burlington, MA.
12. WELSH, M., MYUNG, D., GAYNOR, M., MOULTON, S., Resuscitation monitoring with a wireless sensor network, *Abstract and poster session, American Heart Association, Resuscitation Science Symposium, Abstract, in Supplement to Circulation: Journal of the American Heart Association*, October 2003.
13. [http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue\\_number=08.12.01&article=links](http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=08.12.01&article=links) [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2010].
14. <http://www.defence-industries.com/contractors/army/base-camp-protection/genet/> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2010].
15. [www.infotech.oulu.fi/Annual/2007/pics/opme\\_19.jpg](http://www.infotech.oulu.fi/Annual/2007/pics/opme_19.jpg) [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2010].
16. <http://www.wsn-security.info> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2010].
17. <http://www.npl.co.uk/electromagnetics/wireless-communications/research/wireless-sensor-networks> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2010].
18. AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., CAYIRCI, E., 2002, A survey on Sensor Networks, *IEEE Communications Magazine*, 40 (8), 102-114.
19. <http://fiji.eecs.harvard.edu/Volcano> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2010].
20. ANASTASI, G., CONTI, M., FRANCESCO, M. D., PASSARELLA, A., 2009, Energy conservation in wireless sensor Networks: A survey, *Elsevier Ad Hoc Networks*, 7 (3), 537-568.
21. WANT, R., FARKAS, K. I., NARAYANASWAMI, C., 2005, Energy Harvesting and Conservation, *IEEE Pervasive Computing*, 4 (1), 14-17.
22. RAGHUNATHAN, V., SCHURGERS, C., SUNG, P., SRIVASTAVA, M. B., 2002, Energy-aware Wireless Microsensor Networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, 19 (2), 40-50.

23. G. Pottie, W. Kaiser, 2000, Wireless integrated network sensors, *Communication of ACM*, 43 (5), 51-58.
24. SOHRABI, K., GAO, J., AILAWADHI, V., POTTIE, G., 2000, Protocols for self-organization of a wireless sensor network, *IEEE Personal Communications Magazine*, 7 (5), 16-27.
25. ESTRIN, D., GOVINDAN, R., Next century challenges: scalable coordination in sensor networks, *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, 17-20 August 1999, Seattle, USA, 263-270.
26. SAWIDE, A., HAN, C.C., SRIVASTAVA, M.B., Dynamic finegrained localizadon in ad-hoc networks of sensors, *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)*, July 2001, Rome, Italy, 166 - 179.
27. SCHURGERS, C., TSIATSI, V., SRIVASTAVA, M.B., STEM: Topology Management for Energy Efficient Sensor Networks, *Proceedings of the Aerospace Conference*, March 2002, Los Angeles, USA, 1099-1108.
28. WHITEHOUSE, K., 2002, The Design of Calamari: An Ad-Hoc Localization System for Sensor Networks, *Master's Thesis*, University of California at Berkeley, USA.
29. CEVIK, T., ZAIM, A.H., YILTAS, D., (To Appear), Localized Power Aware Routing with an Energy Efficient Pipelined Wakeup Schedule for Wireless Sensor Networks, *Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*.
30. ZHENG, J., JAMALIPOUR, A., 2009, *WIRELESS SENSOR NETWORKS A Networking Perspective*, Wiley, 978-0-470-16763-2.
31. ROY, R.R., 2011, *Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Models*, Springer, 978-1-4419-6048-1.
32. HEKMAT, R., 2006, *Ad-hoc Networks: Fundamental Properties and Network Topologies*, Springer, 978-1-4020-5165-4.
33. MOHAPATRA, P., KRISHNAMURTHY, S.V., 2005, *AD HOC NETWORKS Technologies and Protocols*, Springer, 978-0-387226893.
34. <http://www.krazytech.com/technical-papers/computer-science-technical-papers-technical-papers/security-aspects-in-mobile-ad-hoc-network-manets> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2011].
35. MUNOZ, D., LARA, F. B., VARGAS, C., CALDERA, R.E., 2009, *Position Location Techniques and Applications*, Elsevier, 978-0-12-374353-4.



36. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, *IEEE Std. 802.11-1999 edition*.
37. YE, W., HEIDEMANN, J., ESTRIN, D., 2004, Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 12 (3), 493-506.
38. KARN, P., MACA-a new channel access method for packet radio, *Proceedings of the 9th ARRL Computer Networking Conference*, 1999, London, Ontario, Canada, 1-5.
39. BHARGHAVAN, V., DEMERS, A., SHENKER, S., ZHANG, L., MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's, *Proceedings of the ACM SIGCOMM '94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, August 31 - September 2, 1994, London, UK, 212-225.
40. Xu, K., GERLA, M., BAE, S., How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '02)*, 17-21 November 2002, Los Angeles, USA, 72-76.
41. GANESAN, D., CERPA, A., YE, W., YU, Y., ZHAO, J., ESTRIN, D., 2004, Networking issues in wireless sensor networks, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64 (7), 799-814.
42. MAINWARING, A., POLASTRE, J., SZEWCZYK, R., CULLER, D., ANDERSON, J., Wireless sensor Networks for habitat monitoring, *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (WSNA '02)*, 2002, New York, USA, 88-97.
43. WARRIER, A., PARK, S., MINA, J., RHEEA, I., 2007, How much energy saving does topology control offer for wireless sensor Networks? – a practical study, *Elsevier/ACM Computer Communications*, 30 (14-15), 2867-2879.
44. XU, Y., HEIDEMANN, J., ESTRIN, D., Geography-informed energy conservation for ad hoc networks, *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (ACM MobiCom '01)*, 2001, Rome, Italy, 70-84.
45. CASARI, P., MARCUCCI, A., NATI, M., PETRIOLI, C., ZORZI, M., A detailed simulation study of geographic random forwarding (GeRaF) in wireless sensor networks, *Military Communications Conference (MILCOM 05)*, 17-20 October 2005, Atlantic City, New Jersey, 59-68.

46. ZORZI, M., Rao, R.R., 2003, Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor Networks: multihop performance, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2 (4), 337-348.
47. ZORZI, M., Rao, R.R., 2003, Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor Networks: multihop performance, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2 (4), 349-365.
48. CHEN, B., JAMIESON, K., BALAKRISHNAN, MORRIS, R., 2002, Span: an energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks, *ACM Wireless Networks*, 8 (5), 481-494.
49. CERPA, A., ESTRIN, D., 2004, Ascent: adaptive self-configuring sensor network topologies, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3 (3), 272-285.
50. CEVIK, T., YILTAS, D., ZAIM, A.H., Delay efficient STEM by pipelining, *Proceedings of the International World Conference on Information Technology*, 2010, Istanbul, Turkey, 96-103.
51. CEVIK, T., YILTAS, D., ZAIM, A.H., A pipelining model in STEM protocol for Sensor Networks, *Proceedings of the International Symposium on Computing in Science & Engineering*, 3-5 June 2010, Izmir, Turkey, 42-46.
52. CEVIK, T., YILTAS, D., ZAIM, A.H., 2011, Delay efficient STEM by pipelining, *Procedia-Computer Science Journal*, 1877-0509, 3 (1), 96-103.
53. SHIH, E., BAHL, P., SINCLAIR, M., Wake on wireless: an event driven energy saving strategy for battery operated devices, *Proceedings of the Eighth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'02)*, 2002, Atlanta, USA, 160-171.
54. GU, L., STANKOVIC, J., 2005, Radio-triggered wake-up for wireless sensor Networks, *Real-Time Systems Journal*, 29 (2-3), 157-182.
55. KARP, B., KUNG, H.T., GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks, *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM '00)*, August 2000, Boston, USA, 243-254.
56. HEINZELMAN, W., CHANDRAKASAN, A., BLAKRISHNAN, H., Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *roceedings of the 33rd International Conference on System Sciences (HICSS '00)*, January, 2000, USA, 1-10.

57. HEINZELMAN, W., CHANDRAKASAN, A., BLAKRISHNAN, H., 2002, An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1 (4), 660-670.
58. Krishnamachari, B., ESTRIN, D., WICKER, S., Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 23-27 June 2002, New York, USA.
59. HEIDEMANN, J., SILVA, F., INTANAGONWIWAT, C., GOVINDAN, R., ESTRIN, D., GANESAN, D., Building Efficient Wireless Sensor Networks with Low-Level Naming, *Proceedings of the 18<sup>th</sup> ACM Symposium on Operating Systems Principles*, 21-24 October 2001, Chateau Lake Louise, Banff, Canada, 146-159.
60. INTANAGONWIWAT, C., GOVINDAN, R., ESTRIN, D., Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks, *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> International Conference on System Sciences (HICSS '00)*, 6-11 August 2000, Boston, USA, 56-67.
61. LINDSEY, S., RAGHAVENDRA, C. S., PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems, *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, 9-16 March 2002, Big Sky, Montana, 1125-1130.
62. YOUNIS, O., FAHMY, S., 2004, HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3 (4), 366-379.
63. TOSCANO, E., BELLO, L.L., A topology management protocol with bounded delay for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the IEEE Emerging Technologies and Factory Automation Conference*, 15-18 September 2008, Hamburg, Germany, 942-951.
64. YOUNIS, M., YOUSSEF, M., ARISHA, K., Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2002, 129-136.
65. IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks: Proposal for Factory Automation, *Working Draft Proposed Standard*, 2009.

66. HANZALEK, Z., JURCIK, P., 2010, Energy Efficient Scheduling for Cluster-Tree Wireless Sensor Networks With Time-Bounded Data Flows: Application to IEEE 802.15.4/ZigBee, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 438-450.
67. SAGLAM, O., DALKILIC, M.E., A Self Organizing Multihop Clustering Protocol For Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, 14-16 December 2009, China, 33-40.
68. GILHOUSEN, K.S., JACOBS, I.M., PADOVANI, R., VITERBI, A.J., WEAVER, L.A., WHEATLEY, C.E., 1991, On the Capacity of a Cellular CDMA System, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 303-312.
69. AKYILDIZ, I.F., MELODIA, T., CHOWDHURY, K. R., 2007, A survey on wireless multimedia sensor networks, *Computer Network*, 14 (6), 32-39.
70. HNEGSTLER, S., PRASHNATH, D., FONG, S., AGHAJAN, H., Mesh-Eye: a hybrid-resolution smart camera mote for applications in distributed intelligent surveillance, *Proceedings of the 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '07)*, 25-27 April 2007, Boston, USA, 360-369.
71. SORO, S., HEINZELMAN, W., 2009, A survey of Visual Sensor Networks, *Advances in Multimedia*, 1-22,.
72. MAGRI, C.B., MANDUCHI, R., OBRACZKA, K., Energy Consumption Tradeoffs in Visual Sensor Networks, *Proceedings of the 24th Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC '06)*, 29 May-2 June 2006, Brasil.
73. ISIK, S., DONMEZ, M.Y., ERSOY, C., 2011, Cross layer load balanced forwarding schemes for video sensor networks, *Ad Hoc Networks*, 265-284.
74. CHEN, M., LEUNG, V.C.M., MAO, S., YUAN, Y., 2007, Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks, *Computer Communications*, 30 (17), 3368-3383.
75. YAGHMAEE, M.H., ADJEROH, D., A Model for Differentiated Service Support in Wireless Multimedia Sensor Networks, *Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks ( ICCCN '08)*, 2008, St. Thomas, US Virgin Islands, 1-6.
76. VALENZUELA, S.G., CAO, H., LEUNG, V.C.M., A Multi-Channel Approach for Video Forwarding in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 7th IEEE*

- Consumer Communications and Networking Conference(CCNC '07)*, 9-12 January 2010, Nevada, USA, 549-553.
77. FELEMBAN, E., LEE, C.G., EKICI, E., 2006, MMSPEED: Multipath Multi\_SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5 (6), 738-754.
  78. HE, T., STANKOVIC, J., LU, C., ABDELZAHER, T., SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks, *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2003)*, 19-22 May 2003, Providence, RI, USA, 46-55.
  79. MAO, S., BUSHMITCH, D., NARAYANAN, S., PANWAR, S.S., 2006, MRTP: A Multiflow Real-Time Transport Protocol for Ad Hoc Networks, *IEEE Transactions on Multimedia*, 8 (2), 356-369.
  80. GELENBE, E., NGAI, E.C.-H., Adaptive QoS Routing for Significant Events in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS'08)*, 29 September – 02 October 2008, Atlanta, Georgia, USA, 410-415.
  81. HEY, L., GELENBE, E., Adaptive Packet Prioritisation for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the Next Generation Internet Networks Conference (NGI '09)*, 1-3 July 2009, Aveiro, Portugal, 1-7.
  82. GELENBE, E., NGAI, E.C.-H., 2010, Adaptive Random Re-Routing for Differentiated QoS in Sensor Networks, *The Computer Journal*, 53 (7), 1052-1061.
  83. SAXENA, N., ROY, A., SHIN, J., 2008, Dynamic Duty Cycle and Adaptive Contention Window Based QoS-MAC Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks, *Computer Networks*, 2532-2542.
  84. POLITIS, I., TSAGKAROPOULOS, M., DAGIUKLAS, T., KOTSOPOULOS, S., 2008, Power efficient video multipath transmission over wireless multimedia sensor networks, *Mobile Networks and Applications*, 2008, 274-284.
  85. MEDJIAH, S., AHMED, T., KRIEF, F., AGEM: Adaptive greedy-compass energy-aware multipath routing protocol for WMSNs, *Proceedings of the 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference(CCNC '07)*, 9-12 January 2010, Las Vegas, USA, 1-6.

86. CHEN, J., CHAN, S.-H.G., LI, V.O.K., 2004, Multipath routing for video delivery over bandwidth-limited networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22 (10), 1920-1932.
87. MO, J., SO, H-S.W., WALRAND, J., 2008, Comparison of Multichannel MAC Protocols, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7 (1), 50-65.
88. WU, S.-L., TSENG, Y.-C., LIN, C.-Y., SHEU, J.-P., 2002, A multi-channel MAC protocol for multi-hop mobile ad hoc networks, *The Computer Journal*, 45 (1), 101-110.
89. NASIPURI, A., ZHUANG, J., DAS, S.R., A multichannel CSMA MAC protocol for multihop wireless networks, *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '99)*, 21-24 September 1999, New Orleans, USA, 1402-1406.
90. MARSAN, M.A., ROFFINELLA, D., 1983, Multichannel local area networks protocols, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 885-897.
91. WU, P.-J., LEE, C.-N., 2009, Connection-oriented multi-channel MAC protocol for ad-hoc networks, *Computer Communications*, 169-178.
92. PERKINS, C.E., ROYER, E.M., Ad-hoc on-demand distance vector routing, *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99)*, 25-26 February 1999, New Orleans, Louisiana, USA, 90-100.
93. STOJIMENOVIC, I., LIN, X., GEDIR: loop-free location based routing in wireless Networks, *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (IASTED '99)*, 1999, Boston, USA, 1025-1028.
94. YANG, X., VAIDYA, N.H., A Wakeup Scheme for Sensor networks: Achieving Balance between Energy Saving and End-to-end Delay, *Proceedings of Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 25-28 May 2004, Toronto, Canada, 19-26.

## ÖZGEÇMİŞ

Taner Çevik, 1980 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini, Avcılar 'daki Ömer Seyfettin İlkokulu 'nda tamamladı. Ardından, ortaöğrenimine Bahçelievler Gürsoy Koleji 'nde başladı. Lise öğrenimini ise, Bayrampaşa 'daki İ.T.O. Anadolu Teknik Lisesi 'nde tamamladı. Üniversite hayatına, 1997 yılında Ege Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 'nde başladı. 1998 yılında, İ.T.Ü. Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 'ne yatay geçiş yaparak, yüksek öğrenimini 2001 yılında başarıyla tamamladı. Üniversite hayatının ardından, on altı aylık vatani görevini tamamladıktan sonra, üç senelik bir piyasa deneyimi yaşadı. 2006 yılında, Fatih Ünivesitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 'nde yüksek lisans eğitime, aynı zamanda da araştırma görevliliğine başladı. 2008 yılında, yüksek lisans eğitimini tamamladı ve İstanbul Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 'nde doktora eğitimine başladı. Evli ve bir çocuk babası olan Taner Çevik, halen Fatih Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.