

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN
ANALİTİK MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman ÇAKICI

Anabilim Dalı: Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi

Danışman: Doç. Dr. İsmail ERTÜRK

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN
ANALİTİK MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Süleyman ÇAKICI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 22 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 26 Haziran 2009


Tez Danışmanı

Doç.Dr.İsmail ERTÜRK


Doç.Dr.

Doç.Dr.Celal ÇEKEN


Yrd.

Yrd.Doç.Dr.A.Turan ÖZCERİT

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Kablosuz algılayıcı ağ teknolojilerinde son yıllarda önemli gelişmeler oldu. Yüksek maliyetli uygulamalar için daha ucuz cihazlar üretmenin yanında, uygulama daha tasarım aşamasındayken geçerli başarımların kontrolü, bir takım muhtemel problemlerin tespit edilmesi ve giderilmesi için modelleme konusu büyük önem kazanmıştır. Bu noktadan hareketle kablosuz algılayıcı ağların analitik modellemesi üzerine ciddi çalışmalar yapılmaktadır.

Yüksek lisans eğitimim süresince değerli birikimlerini bana aktaran, tezimin başlangıcından bitimine kadar her aşamasında sorunlarımı dinleyen, çalışmalarımı yön veren ve değerli zamanını sorunlarımın çözümüne ayıran tez danışmanım sayın Doç. Dr. İsmail ERTÜRK'e; tez ile ilgili araştırmaların yapılmasında, çalışmalarım ve tezimin yazımında birikimlerini ve zamanını paylaşan, maddi ve manevi desteğini hiç eksik etmeyen hocam Dr. Sedat ATMACA'ya ve değerli arkadaşlarım Alper KARAHAN ve Ergin ERYILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan anneme, babama ve her konuda yardımcı olan yakınlarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER.....	vi
ÖZET	x
İNGİLİZCE ÖZET	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatürde Yapılan Çalışmaların Özetleri.....	2
1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve İlk Başlatılma Sebepleri.....	5
1.3. Tez Organizasyonu	5
2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR.....	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağlar	7
2.3. Kablosuz Algılayıcı Ağların Çalışma Esasları.....	8
2.4. Kablosuz Algılayıcı Ağların Olumlu ve Olumsuz Yönleri.....	9
2.5. Akıllı Algılayıcılar ve IEEE 1451.....	10
2.6. Bir Algılayıcı Düğümün İşlevsel Bileşenleri	11
2.6.1. Algılama birimi ve algılayıcı türleri.....	12
2.6.1.1. Güç çeviriciler.....	12
2.6.1.2. Algılayıcılar	12
2.6.2. İşlem birimi	13
2.6.3. Güç birimi	14
2.6.3.1. Pil	14
2.6.3.2. Enerji yönetim teknikleri	14
2.6.4. Haberleşme birimi.....	15
2.6.4.1. KAA OSI referans modeli.....	15
2.6.4.1.1. Fiziksel katman	16
2.6.4.1.2. Veri bağı katmanı.....	17
2.6.4.1.3. Ağ katmanı	17
2.6.4.2. OEK (Ortama Erişim Kontrolü).....	18
2.6.4.3. Yönlendirme.....	20
2.6.4.3.1. Veri merkezli yönlendirme teknikleri	21
2.6.4.3.2. Aşamalı yönlendirme teknikleri.....	22
2.6.4.3.3. Konum tabanlı yönlendirme teknikleri	24
2.6.4.4. Fiziksel ortam özellikleri	25
2.6.4.5. Enerji	26
2.6.4.6. Güvenlik.....	27
2.7. Kablosuz Algılayıcı Ağların Kullanım Alanları	28
2.7.1. Çevresel veri toplama.....	28
2.7.2. Güvenlik izleme	29
2.7.3. Düğümlerin izlenmesi	29

2.8. Kablosuz algılayıcı ağ uygulamaları.....	30
2.8.1. Askeri araçların izlenmesi uygulaması	30
2.8.2. Kendilerini tekrar yapılandıran mayın tarlası uygulaması.....	30
2.8.3. Büyük ördek adasındaki kuş gözlemeleme uygulaması	31
2.8.4. Tarım izleme uygulaması.....	31
2.8.5. Yaşamsal işaret izleme uygulaması	32
2.9. Sonuç.....	33
3. HABERLEŞME AĞLARININ ANALİTİK MODELLENMESİ.....	34
3.1. Giriş.....	34
3.2. Haberleşme Ağlarını Modelleme Yöntemleri.....	35
3.3. Haberleşme Ağlarının Analitik Modellemesi	36
3.4. KAA Bileşenlerinin Analitik Modellemesi.....	36
3.4.1. OEK analitik modellemesi	37
3.4.2. Yönlendirme analitik modellemesi	38
3.4.3. Enerji analitik modellemesi.....	39
3.4.4. Güvenlik analitik modellemesi	39
3.5. Sonuç.....	40
4. ÖRNEK BİR KAA’NIN ANALİTİK MODELLENMESİ.....	41
4.1. Giriş.....	41
4.2. Sağlık Alanında Kullanılan Bir KAA’nın Analitik Modellemesi.....	41
4.2.1. Ortam erişim kontrol mekanizmasının modellenmesi	42
4.2.1.1. CSMA/CA modeli.....	43
4.2.1.2. Çarpışma olasılığı	53
4.2.1.3. Ortama erişim işlev modelleri.....	55
4.2.2. Yönlendirme modeli	57
4.2.3. Güvenlik etkinleştirilmiş haberleşmenin etkilerinin analitik modeli.....	63
4.2.4. Başarım değerlendirilmesi.....	65
4.2.5. Enerji tüketim modeli.....	70
4.3. Sonuç.....	76
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	78
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Kablosuz Algılayıcı Ağların Yapısı.....	8
Şekil 2.2 : Birbirleri üzerinden haberleşen düğümler	9
Şekil 2.3 : Bir algılayıcı ağ düğümü [16].....	10
Şekil 2.4 : Algılayıcı düğümün sistem mimarisi ve görevleri.....	11
Şekil 2.5 : Güç Çevirici (Transducer)	12
Şekil 2.6 : KAA için OSI referans modeli	16
Şekil 2.7 : Kılavuz-Etkinleştirilmiş 802.15.4 Süperçerçeve Yapısı.....	19
Şekil 2.8 : Hassas tarım için ad-hoc kablosuz algılayıcı düğüm dağılımı	28
Şekil 2.9 : İhlal sezilen bölgenin yeniden organizasyonu [37]	31
Şekil 2.10 : KAA için yaşamsal işaret uygulaması tasarısı.....	32
Şekil 4.1 : KAA'nın analitik model içeriğinin blok gösterimi	42
Şekil 4.2 : CSMA/CA 2-Boyutlu Ayrık Markov Zinciri [11].....	44
Şekil 4.3 : Bir Düğümün Haberleşme Ortamını Boş Bulma Olasılığı.....	50
Şekil 4.4 : Ortamdaki Çarpışma Olasılığının Değişimi	55
Şekil 4.5 : Modellemede Kullanılan Yönlendirme Planı	58
Şekil 4.6 : Kablosuz Haberleşme Ortamının Kullanılma Oranı.....	61
Şekil 4.7 : KAA İş Çıkarma Oranı (Throughput)	66
Şekil 4.8 : Ortama Erişim Kontrol Mekanizmasının Uçtan Uca Gecikmeye Etkisi ..	68
Şekil 4.9 : Yönlendirme ve OEK'nin Uçtan Uca Gecikmeye Etkisi	70
Şekil 4.10 : OEK'nin bir uç düğümde harcanan enerji miktarına etkisi	73
Şekil 4.11 : Yönlendirme ve OEK'nin koordinatörlerde harcanan enerjiye etkisi	75
Şekil 4.12 : Bir günlük süreçte bir uç ve 1.seviyedeki koordinatör düğümde kalan enerji.....	76

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Algılayıcılardaki güç çevrim prensipleri [58].....	13
Tablo 2.2 : IEEE 802.15.4 frekans bantları ve Veri Hızları [47].....	17
Tablo 4.1 : Hesaplama da kullanılan KAA düğümleri için geçiş süreleri [47].....	67
Tablo 4.2 : Denklemlerdeki semboller için kullanılan değerler [47].....	67
Tablo 4.3 : Algılayıcı düğümlerin yaklaşık güç tüketim değerleri [60].....	71

SİMGELER

BO	: Kılavuz üstel katsayısı (Beacon Order)
SO	: Süper çerçeve üstel katsayısı (SuperFrame Order)
BE	: Erteleme üstel katsayısı (Backoff Exponent)
CW	: Erişimden önce gerçekleştirilecek CCA sayısı(Contention Window)
NB	: En yüksek deneme sayısı (Number of Backoff)
SD_{SO}	: Süper çerçevenin süresi (SuperFrame Duration)
BI	: İki kılavuz çerçeve aralığındaki süre
α	: İlk CCA işleminde kanalın meşgul olma olasılığı
β	: İkinci CCA işleminde kanalın meşgul olma olasılığı
$s(t)$: Gerçekleşen tekrar deneme sayısı
$w(t)$: Kalan erteleme dilim sayısı
W_i	: i. basamakta rastgele seçilen erteleme dilim sayısı
$W_i(ort)$: i. basamakta rastgele seçilen erteleme dilim sayısının ortalaması
q	: Düğümde gönderilmeyi bekleyen yeni bir verinin olmama olasılığı
$b_{i,k}$: Markov zinciri üzerindeki bağımsız durumlar
m	: Haberleşme ortamı meşgul olduğunda en yüksek deneme sayısı:
σ	: Düğümün ilk CCA işleminde bulunma olasılığı
τ	: Düğümün ikinci CCA işleminde bulunma olasılığı
δ	: Haberleşme ortamının boş olma olasılığı
$macMinBE$: Erteleme üstel katsayısının başlangıç değeri
$aMaxBE$: Erteleme üstel katsayısının olabileceği en yüksek değer
R	: Haberleşme ortamında saniyede iletilebilecek en yüksek bit sayısı
p	: Herhangi bir $b_{i,0}$ durumunda kanalın meşgul olma olasılığı
s_{deneme}	: Ortalama tekrar deneme sayısı
s_{ert_dilim}	: Ortalama erteleme dilim sayısı
t_{CCA}	: Bir CCA işleminde geçen süre
t_{CCA_topl}	: CCA işlemlerinde geçen toplam süre
t_{ert}	: Ortalama erteleme süresi
t_{ert_topl}	: CCA işlemlerinde geçen süre dahil, ortalama erteleme süresi
t_{UH}	: Düğümün radyosunun uyku modundan hazır duruma geçiş süresi
t_{HA}	: Düğümün radyosunun hazır modundan alım duruma geçiş süresi
t_{HG}	: Düğümün radyosunun hazır modundan gönderim duruma geçiş süresi
t_{AG}	: Düğümün radyosunun alım modundan gönderim duruma geçiş süresi
t_{AH}	: Düğümün radyosunun alım modundan hazır duruma geçiş süresi
t_{GH}	: Düğümün radyosunun gönderim modundan hazır duruma geçiş süresi

d	: Ağ aşama derecesi
c_d	: Haberleşme ortamındaki bir paketin çarpışma olasılığı
L	: İletilen paket boyutu
L_{ACK}	: ACK paket boyutu
L_{KLVZ}	: Kılavuz çerçeve paket boyutu
t_{ACK_bekle}	: Bir ACK için en yüksek bekleme süresi
t_{TX_BYTE}	: Bir paketin gönderiminde geçen süre
t_{RX}	: Bir paketin alımında geçen süre
t_{TX_ACK}	: ACK gönderiminde geçen süre
t_{RX_ACK}	: ACK alımı için gereken süre
t_{RX_KLVZ}	: Kılavuz çerçeve paketinin alım süresi
t_{TX_KLVZ}	: Kılavuz çerçeve paketinin gönderim süresi
t_{SIFS}	: Kısa paket alımından sonra diğer alım için bekleme süresi
t_{LIFS}	: Uzun paket alımından sonra diğer alım için bekleme süresi
t_{CVP_bekle}	: Koordinatörden veri alma talebinin ardından cevap için bekleme süresi
t_{AT}	: Ağ taramasında geçen süre
t_{HATA}	: Eş zamanlı çalışma hata toleransı
ϵ_{RX}	: Düğümün kristal toleransı
ϵ_{TX}	: Düğümün kristal toleransı
n_u	: Bir küme liderine bağlı uç düğümlerin sayısı
n_k	: Bir koordinatöre bağlı küme lideri sayısı
N_d	: Ağdaki toplam düğüm sayısı
k_d	: Ağdaki toplam koordinatör sayısı
u_d	: Ağdaki toplam uç düğüm sayısı
U	: Uç düğüm paket boyutu (bayt)
κ	: Uç düğüm paket boyutu (erteleme dilimi)
K_d	: d. Seviyedeki koordinatörün paket boyutu (bayt)
η_d	: d. Seviyedeki koordinatörün paket boyutu (erteleme dilimi)
y_d	: Koordinatörlerin ağ üzerindeki yükü (bayt)
π_d	: Koordinatörlerin ağ üzerindeki yükü (erteleme dilimi)
l_d	: Uç düğümlerin ağ üzerindeki yükü (bayt)
μ_d	: Uç düğümlerin ağ üzerindeki yükü (erteleme dilimi)
ζ_d	: Ağdaki toplam veri gönderme trafiği (bayt)
γ_d	: Ağdaki toplam veri gönderme trafiği (erteleme dilimi)
ζ_d	: Gönderilen ortalama veri paket boyutu (bayt)
γ_d	: Gönderilen ortalama veri paket boyutu (erteleme dilimi)
$k_{tolerans}$: Beklenmeyen durumlar için tolerans katsayısı
v_{SC}	: Bir süper çerçevede gönderilen paket sayısı

sc_byte	: Bir süper çerçevenin bayt cinsinden karşılığı
$AT_{periyot}$: Ağ tarama sıklığı
v_{AT}	: Bir süper çerçevedeki ağ tarama sayısı
CZ_{UC}	: Bir uç düğüme ait toplam çalışma zamanı
CZ_{KOOR}	: Bir koordinatöre ait toplam çalışma zamanı
T_{CAP}	: Koordinatörün olası paket alımı için alıcı durumunda beklediği süre
$t_{güvenlik}$: Güvenlik işlemleri için düğüm içerisinde meydana gelen gecikme
G	: Güvenlik protokolünün paket boyutuna getirdiği ek yük miktarı
$t_g(d, k)$: k kademesindeki bir uç düğüm için uçtan uca gecikme
E_{ert_iplm}	: Erteleme işlemleri sırasında harcanan enerji miktarı
E_{RX_KLVZ}	: Kılavuz çerçeve alımında harcanan enerji
E_{TX_KLVZ}	: Kılavuz çerçeve gönderiminde harcanan enerji
E_{TX}	: Bir paket gönderiminde harcanan enerji miktarı
E_{RX}	: Bir paket alımında harcanan enerji miktarı
E_{AT}	: Ağ taramasında harcanan enerji miktarı
P_{BOS}	: Düğümün boş durumda olma olasılığı
P_{ERT}	: Düğümün erteleme işlemlerinde olma olasılığı
P_{CCA}	: Düğümün ilk CCA işlemlerinde meşgul olma olasılığı
P_{2CCA}	: Düğümün ikinci CCA işlemlerinde meşgul olma olasılığı
P_{TX}	: Bir düğümün veri gönderiyor olma olasılığı
P_{RX}	: Bir düğümün veri alıyor olma olasılığı
P_{BAS}	: Bir paketin başarılı gönderilebilme olasılığı
Th	: İş çıkarma oranı
t_{gecis}	: Gecikme hesaplanırken kullanılan ortak terimlerin toplamı
$t_g(d)$: İki düğüm arasındaki tek yönlü haberleşme uçtan uca gecikme
P_U	: Düğümün uyku modundaki güç tüketimi
P_H	: Düğümün boş durumdaki güç tüketimi
P_{UC}	: Bir uç düğümün güç tüketim modeli
E_{UC}	: Bir uç düğümdeki harcanan enerji
$P_{k.KOOR}$: k kademesindeki bir koordinatörün güç tüketim modeli
$E_{k.KOOR}$: k kademesindeki bir koordinatörde harcanan enerji
E_{KALAN}	: Düğümün sahip olduğu güncel enerji miktarı
E_{ILK}	: Düğümün başlangıçta sahip olduğu enerji miktarı
$E_{HARCANAN}$: Düğümde harcanan enerji miktarı

KISALTMALAR

ACK	: Acknowledgement (Alındı Bilgisi)
ACQUIRE	: Active Query Forwarding In Sensor Networks
ADC	: Analog Digital Converter
AD HOC	: Tasarısız
APTEEN	: Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
BER	: Bit Error Rate
C4ISR	: Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, Targeting
CADR	: Constraint Anisotropic Diffusion Routing
CDMA	: Code Division Multiple Access
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRC	: Cyclic Redundancy Check
CSMA	: Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DC-DC	: Doğru Gerilim Seviye Çevirici
DPM	: Dynamic Power Management (Dinamik Güç Yönetimi)
DVS	: Dynamic Voltage Scaling (Dinamik Gerilim Ölçeklemesi)
FPGA	: Field Programmable Gate Array
GAF	: Geographic Adaptive Fidelity
GBR	: Gradient Based Routing
GEAR	: Geographic and energy-Aware Routing
GPS	: Global Positioning System
IFS	: Inter Frame Space (Çerçeveler arası boşluk)
LIFS	: Long Inter Frame Space
MECN	: Minimum Energy Communication Network
MPDU	: MAC Protocol Data Unit
SIFS	: Short Inter Frame Space
SNR	: Signal to Noise Ratio
SPIN	: Sensor Protocols for Information via Negotiation
KAA	: Kablosuz Algılayıcı Ağlar
LEACH	: Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy
OEK	: Ortama Erişim Kontrolü (MAC)
OSI	: Open System Interconnection
PEGASIS	: Power-efficient GATHERING in Sensor Information Systems
RAM	: Random Access Memory
RF	: Radyo Frekansı
SMECN	: Small Minimum Energy Communication Network
SPI	: Serial Peripheral Interface (Seri Çevre Ara yüzü)
TDMA	: Time Division Multiple Access
TEEN	: Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
UART	: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
WLAN	: Wireless Local Area Network

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN ANALİTİK MODELLENMESİ

Süleyman ÇAKICI

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Analitik Modelleme

Özet: Günümüzde kablosuz iletişim teknolojilerinin gelişmesiyle Kablosuz Algılayıcı Ağların (KAA'ların) kullanımı giderek artmaktadır. Bu tez çalışmasında, KAA'ların tümleşik değerlendirilmesini sağlayan değişik ölçütlerin analitik olarak elde edilmesi ve oluşturulan analitik modelin örnek bir uygulamada kullanımı hedeflenmektedir. Literatürde sunulan çalışmalarda bir KAA'yı tüm yönleriyle (ortama erişim kontrol, yönlendirme, güvenlik, enerji vb.) değerlendirebilen tümleşik bir çözümün bulunmaması ve buna duyulan ihtiyaç, sunulan tez çalışmalarının en önemli başlangıç sebebini oluşturmaktadır.

KAA kullanım alanlarının günden güne genişlemesi, gerçekleştirilecek uygulamaların test edilmesini, yeterliliklerinin değerlendirilmesini ve gerekli düzeltmelerin/iyileştirmelerin yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu amaçla kullanılabilir yöntemlerden olan analitik sistem modellemesi, başarımların değerlendirilmesinde diğer yöntemlere (benzetim ve ilk örnek gibi) kıyasla, yalnız kullanıldığında daha düşük maliyetli olması veya bir diğer yöntemle birlikte kullanımında sonuçların doğrulanması açısından önem arz etmektedir.

Tez çalışmasında ayrıca, geliştirilen tümleşik KAA analitik modeli ile değerlendirilen ve sağlık hizmetleri alanında kullanılan örnek bir uygulama sunulmaktadır. Gerçekleştirilen senaryoda hastalar üzerinde bulunan düğümlerden farklı verileri toplayan ve hiyerarşik olarak merkezi düğüme yönlendiren bir ağ mimarisi bulunmaktadır. Oluşturulan analitik modellerle düğüm sayısı, OEK (Ortam Erişim Kontrol) ve yönlendirmenin etkileri dahil edilerek, iş çıkarma, uçtan-uca gecikme ve haberleşme kanalının kullanım oranı ifade edilmekte ve hesaplanmaktadır. Çalışma, düğümlerin beklemede, ortama erişimde ve paket iletiminde harcadıkları enerji dikkate alınarak, uç ve koordinatör düğümler için tüketilen ve kalan enerji değerlerini de modellemektedir. Elde edilen sonuçlar, bir KAA'nın bütün olarak da değerlendirilebileceğini göstererek, çalışmaya, araştırmacılara ve uygulama geliştiricilere için referans olma niteliği kazandırmaktadır.

ANALYTICAL MODELING OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

Süleyman ÇAKICI

Keywords: Wireless Sensor Network, Analytical Modeling

Abstract: Nowadays, the use of the Wireless Sensor Networks (WSNs) has increased with the ever-increasing developments in wireless communication technologies. This study aims at analytically obtaining various performance metrics providing an integrated evaluation of WSN applications. The analytical model built has been also employed in a case study. Since there is not any work to enable researchers to evaluate all key aspects of a WSN together in literature, and the need for such a study makes of our primary motivation.

The increasing usage of WSNs requires easy testing, evaluation and making necessary improvements for applications that will be realized. As one of the methods that can be used for this purpose, analytical system modeling is of great importance for performance evaluation.

In this thesis study, the analytical WSN model produced has been applied to a case study. The scenario used has a network architecture, gathering various health data from sensor nodes attached to patients and routing data to the base station hierarchically. End to end delay, throughput and channel utilization ratio have been expressed and calculated using the analytical models by taking into account the impacts of number of nodes, MAC and routing. The energy consumption and remaining node energy have been modeled by considering the consumed energy during stand by, channel access and transmission of packets. The results obtained offer a reference work to the researchers and application developers by showing that WSNs can be evaluated as a whole.

1. GİRİŞ

Son yıllarda kablosuz haberleşme sistemlerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu teknolojiler, kişisel alan ağlarından geniş alan ağlarına, uydu haberleşme sistemlerinden hücreli haberleşme sistemlerine kadar oldukça geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur.

Mikro-Elektro-Mekanik-Sistem (MEMS) ve kablosuz haberleşme teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, küçük boyutlarda, düşük-güçlü, düşük-maliyetli donanımsal bileşenlerin üretimini mümkün kılmıştır. Bu gelişmeler aynı zamanda, çok küçük bir yapı içerisinde, algılama, işlem ve haberleşme işlevlerini yerine getiren algılayıcı birimlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu çok fonksiyonlu düğümler, bir coğrafi alan içerisine uygun bir şekilde dağıtılarak Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) yapısını oluşturmaktadır.

KAA, bir yönetici koordinatör ile planlı ya da rastgele dağıtılmış mini düğümlerden meydana gelir ve önceden kurulmuş bir altyapı gereksinimleri bulunmamaktadır. Düğümler, dağıtıldıkları coğrafi alanda, doğrudan ya da erişim noktalı bir haberleşme altyapısı oluştururlar ve topladıkları verileri bu altyapı üzerinden yüksek güçlü bir merkez istasyona iletirler.

KAA'lar, ilk yıllarda sadece askeri amaçlı, savaş alanlarının gizlice izlenmesinde kullanılmıştır [1]; fakat son yıllarda, orman yangınlarını sezme, hassas tarım, sağlık uygulamaları, ev otomasyonu, robot kontrolü, ürün kalite kontrolü gibi birçok alanda kullanılmakta ve halen araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir.

KAA kullanım alanlarının günden güne artması, gerçekleştirilecek uygulamaların test edilmesini, yeterliliklerinin değerlendirilmesini ve gerekli düzeltmelerin/iyileştirmelerin yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu amaçla kullanılabilir yöntemlerden biri olan analitik sistem modellemesi, başarımlar

değerlendirmesinde diğer yöntemlere (benzetim ve ilk örnek gibi) kıyasla, yalnız kullanıldığında daha düşük maliyetli ve sonuçların hızlı elde edilebilir olması veya bir diğer yöntemle birlikte kullanımında elde edilen sonuçların doğrulanması açılarından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması ile, sağlık alanında kullanılan örnek bir KAA çözümü esas alınarak, kullanılan yönlendirme, OEK ve güvenlik protokolleri ile diğer uygulama katmanı bileşenlerinin, başarımlar ölçütlerine (uçtan uca gecikme, düğüm enerji tüketimi ve ağ iş çıkarma oranı) etkileri elde edilen analitik model yardımıyla incelenmektedir. Kullanılan örnek senaryoda hastalar üzerinde bulunan düğümlerden farklı verileri toplayan ve bunları hiyerarşik olarak merkezi düğüme yönlendiren bir ağ mimarisi kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen analitik modeller ve sonuçları, KAA'ların bir bütün olarak da değerlendirilebileceğini göstererek, araştırmacılara ve uygulama geliştiricilere referans çalışma niteliği kazandırmaktadır.

1.1. Literatürde Yapılan Çalışmaların Özetleri

Bianchi (2000)'de, IEEE 802.11 dağıtılmış eş güdümlü (DCF) işlevi benimsenmiş çarpışmadan kaçınan taşıyıcı duyarlı çoklu erişim (CSMA/CA) algoritmasının doyumdayken üretilen iş (throughput) incelemesi için bir çerçeve sunulmuş ve CSMA/CA erteleme işlemi için bir ayrık-Markov modeli tasarlanmıştır. Ayrıca bu makale, sunulan bu tez çalışmasında da benimsenen IEEE 802.15.4 Ortam Erişim Kontrol (OEK) ile ilgili analitik modellerin çoğunda referans olarak kullanılmaktadır.

Wu ve diğ. (2001), Bianchi (2000)'de gerçekleştirilen OEK sisteminin, erteleme işlemini standarda daha da yaklaştırmak için, geliştirilmiş yeni bir OEK modeli önermiştir. Bu modelde bir iletim için deneme sayısı tekrar deneme sınırına ulaştığında, çekişme penceresi (CW) sıfırlanır.

Foh ve Zukerman (2002), Bianchi'nin (2000) modelini, doyumda olmayan haberleşme koşullarını da inceleme olanağı sunacak biçimde genişletmiştir.

Misic (2004), ayrık-Markov zinciri ve M/G/1/K kuyruk modelini kullanarak IEEE 802.15.4 tabanlı KAA'nın OEK katmanında üretilen işi ve paket erişim gecikmesinin olasılık dağılımını analitik olarak modellemiştir. Çalışmada, kablosuz algılayıcı düğümlerin sınırlı ön belleğe sahip oldukları kabul edilmiştir.

Park ve diğ. (2005) tarafından IEEE 802.15.4 OEK protokolü için yeni bir ayrık-Markov zinciri modeli önerilmiş; doyum koşullarında üretilen iş ve enerji tüketimi incelenmiştir.

Tao ve diğ. (2006), IEEE 802.15.4 OEK protokolünün güçlü ve zayıf yönlerini ortaya çıkarabilecek, iletişim kuralının bütün temel özelliklerini dikkate alan yeni bir Markov zinciri önermiştir. Bu çalışma, iki defa tekrarlanan CCA işleminin iyi bir tasarım olmadığını göstermiş; gerçekleştirilen küçük bir düzeltme ile üretilen iş, gecikme ve enerji tasarrufu açısından başarımın artırılabilirliğini vurgulamışlardır.

Koubaa ve diğ. (2006), IEEE 802.15.4 OEK protokolünde, GTS (Guaranteed Time Slot) mekanizmasının analizi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bir GTS tahsisi için, IEEE 802.15.4 OEK parametrelerine bağlı olarak iki farklı servis eğrisi modeli önermişlerdir. GTS ile garanti edilen gecikme sınırlarını hesaplamak için "Network Calculus" yaklaşımını kullanmışlardır. Geliştirilen modelleri kullanarak, IEEE 802.15.4 OEK'in parametrelerinin üretilen iş ve gecikme sınırları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Kohvakka ve diğ (2006), geniş alanlarda uygulanabilir bir KAA için başarım analizi yapmışlardır. Tüm ağda enerji tüketimini azaltmak ve yeterli kapsama alanı sağlamak amacıyla düğümlerin birbirleri üzerinden haberleştiği bir ağ topolojisi seçmişlerdir. Çalışmada, güç tüketimi ve üretilen iş cinsinden, bir düğüm ve koordinatörün başarımı analitik olarak incelenmiştir.

Kim ve diğ. (2007), yıldız topolojisi kullanılan, kılavuz etkinleştirilmemiş ve doyumda olmayan IEEE 802.15.4 OEK protokolünün başarım analizi üzerine çalışmışlardır. Sadece indirme (download) işlevini göz önünde bulundurup, üretilen

iş, paket gecikmesi, erteleme sayısı, enerji tüketimi ve paket kayıp olasılığını, ayrık-Markov zinciri kullanarak, analitik olarak modellemişlerdir.

Chen ve diğ. (2007), Bianchi'nin (2000) modelini esas alarak IEEE 802.15.4 OEK protokolünün başarımını hesaplamak için yeni bir Markov modeli geliştirmişlerdir. Sunulan tez çalışmasında, ağdaki toplam iş çıkarma oranı ve enerji tüketimi bu model referans alınarak elde edilmiştir.

Gao ve diğ. (2008), CSMA/CA OEK mekanizması için, özellikle uyku modunu dikkate alan Markov zinciri tabanlı bir analitik model önermişlerdir. Aktif ve uyku durum geçişlerini hesaba katarak, iş zamanının (duty cycle) üretilen iş ve güç tüketimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçları benzetim sonuçlarıyla karşılaştırarak, uyku modunun IEEE 802.15.4 OEK protokolü üzerindeki etkilerinin kolaylıkla ifade edilebileceğini göstermişlerdir.

He ve diğ. (2008), Tao ve diğ. (2006) tarafından geliştirilen OEK modeli üzerinde değişiklikler yaparak yeni bir Markov modeli önermişlerdir. Doyumda üretilen işi ve enerji tüketimini, OEK parametrelerinin ve çerçeve uzunluğunun işlevi olarak modellemişlerdir. Dilimli CSMA/CA OEK algoritmasını yeni bir Markov zinciri modeli kullanarak gerçekleştirmişler ve önerdikleri bu modelin doğruluk düzeyinin, o zamana kadar yapılmış diğer modellerden daha yüksek olduğunu benzetim sonuçlarından elde edilen sayısal ifadelerle desteklemişlerdir.

Sahoo ve diğ. (2009), kablosuz kanal kullanılabilirlik işlemlerinin olumlu sonuçlanmasına rağmen ortaya çıkan paket çarpışmalarını önlemek için karma bir OEK protokolü önermişlerdir. KAA sistem modelinin başarılı ve başarısız olma olasılıklarını incelemek için ayrık-Markov zinciri modeli geliştirmişlerdir. KAA'nın enerji verimliliğini incelemek ve artırmak amacıyla üstel ve sabit çekişme pencereleri için analitik modeller tanımlamışlardır.

1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve İlk Başlatılma Sebepleri

Başlangıçta askeri amaçlı uygulamalar için tasarlanan; fakat zamanla daha geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan algılayıcı ağlar, kablosuz haberleşme ortamını kullanmaları sebebiyle de son yıllarda araştırma ve geliştirme çalışmalarının odağı haline gelerek, bu alanda bir çok önemli uygulamada kendisini göstermektedir. KAA kullanım alanlarının günden güne artması, gerçekleştirilecek uygulamaların test edilmesini, yeterliliklerinin değerlendirilmesini ve gerekli iyileştirmelerin yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu amaçla kullanılabilir yöntemlerden olan analitik sistem modellemesi, başarımlarını değerlendirmesinde diğer yöntemlere (benzetim ve ilk örnek gibi) kıyasla, yalnız kullanıldığında daha düşük maliyetli ve sonuçların hızlı elde edilebilir olması veya bir diğer yöntemle birlikte kullanımında elde edilen sonuçların doğrulanması açılarından önem arz etmektedir.

Literatürde sunulan çalışmalarda bir KAA'yı tüm yönleriyle (enerji, yönlendirme, güvenlik, ortam erişim kontrol vb.) değerlendirebilen tümleşik bir analitik çözümün bulunmaması ve buna duyulan ihtiyaç, sunulan tez çalışmasının en önemli başlangıç sebebini oluşturmaktadır.

1.3. Tez Organizasyonu

Bu tez çalışmasında, bir kablosuz algılayıcı ağ uygulamasının tüm temel bileşenlerini içeren analitik model çıkarılmıştır. Yapılan çalışmaların sunulduğu ve sonuçların değerlendirildiği tez beş ana bölümden oluşmaktadır:

Bu çalışmaya konu olan problemin tanımı, daha önceden konuyla ilgili yapılmış çalışmaların özetleri, tez çalışmasının amacı ve ilk başlatılma sebepleri birinci bölümde sunulmaktadır.

İkinci bölümde, KAA ve algılayıcı düğümler hakkında genel bilgiler verilmektedir. Bu bölümde ayrıca, KAA yapısı, gelişimi ve uygulama alanları üzerinde de durulmaktadır.

Bilgisayar ağları modelleme yöntemleri ve özellikle analitik modelleme yöntemi üçüncü bölümde sunulmaktadır. KAA bileşenlerinin analitik modelleri ile ilgili bilgiler de bu bölümde açıklanmaktadır.

Dördüncü bölümde, sağlık alanında kullanılan örnek bir KAA uygulamasının, ortama erişim (OEK), yönlendirme (routing), gecikme (end-to-end delay), iş çıkarma oranı (throughput) ve harcanan enerji (consumed energy) gibi, temel başarıml ölçütlerini içeren analitik modeller elde edilerek detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Elde edilen KAA analitik modelleri değerlendirilerek, yapılacak sonraki çalışmalara ışık tutabilecek bazı önerilere beşinci bölümde yer verilmektedir.

2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

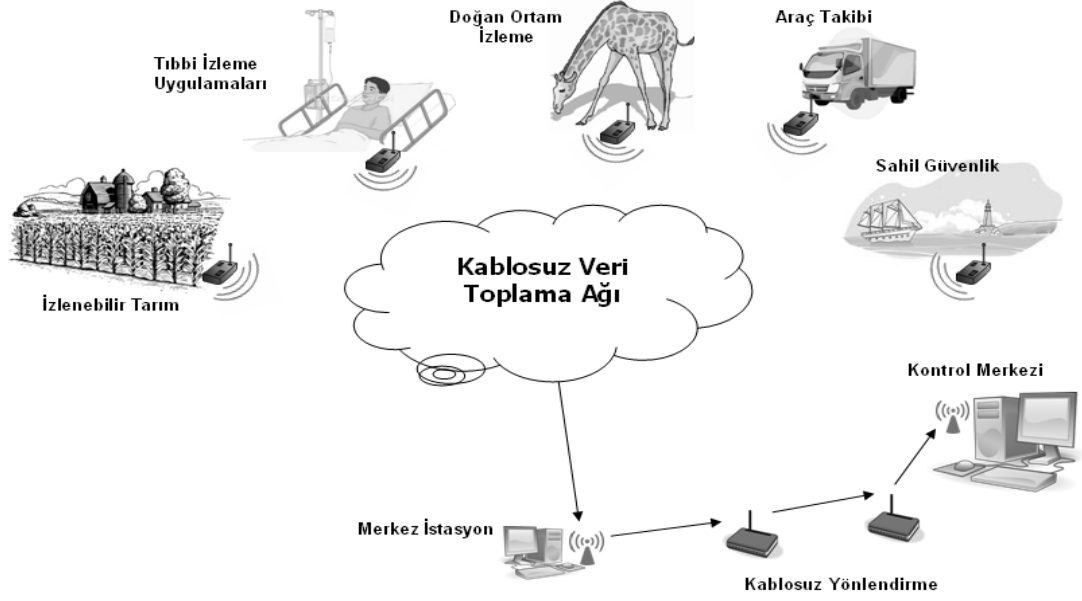
2.1. Giriş

Kablosuz algılayıcı ağ (KAA) kavramı ilk kez 1980'li yıllarda kullanılmaya başlanmış; ilerleyen teknoloji, MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems) ve kablosuz haberleşme sistemlerindeki gelişmelerle birlikte önemli bir araştırma/uygulama alanı haline gelmiştir. Başlangıçta sadece askeri amaçlar için kullanılan KAA'lar, üretim maliyetlerinin düşmesi ve algılayıcı teknolojilerinin gelişmesiyle daha geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde, KAA'lar ordudan bilime, endüstriden sağlığa oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır [3].

2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağlar

Bir KAA, bütünleşik işlemciler, algılayıcılar ve kablosuz haberleşme birimlerini içeren çok sayıda düğümün oluşturduğu özel bir ağ olarak tanımlanabilir. Ağda kullanılan düğümler çevre veya varlıkların durumlarını incelemek için iş birliği halinde çalışırlar [3]. Bir yönetim merkezi tarafından izlenen ve kontrol edilen, genellikle bir veri alma ve dağıtma ağından oluşan KAA yapısı Şekil 2.1'de görülmektedir.

Algılayıcı ağlar bazı yönleriyle geleneksel kablosuz ses veya veri ağlarından farklılık göstermektedir. Bunlardan ilki; bir algılayıcı ağdaki düğümlerin çoğunun pil gücü ile beslenmesi ve bütün düğümler için pillerin değiştirilmesinin oldukça zor, bazen de imkansız olmasıdır. İkincisi, düğümlerin önceden planlanmış bir ağ topolojisine göre değil, haberleşme ağı içerisinde kendilerini organize edebilecek şekilde dağıtılmasıdır. Üçüncüsü ise, bir coğrafi alandaki düğüm yoğunluklarının farklı olabilmesidir.



Şekil 2.1: Kablosuz Algılayıcı Ağların Yapısı

2.3. Kablosuz Algılayıcı Ağların Çalışma Esasları

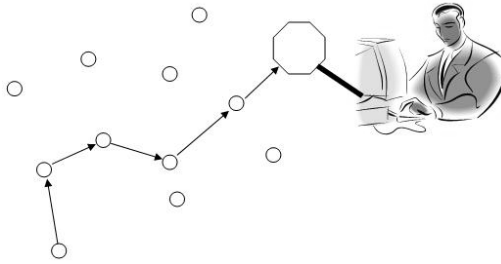
KAA'lar, bir yönetici koordinatör ile algılama, veri işleme ve haberleşme kabiliyetlerine sahip, planlı ya da rastgele dağıtılmış mini düğümlerden meydana gelir [3]. Her iki durumda da önceden kurulmuş bir altyapı gereksinimleri yoktur; düğümler, dağıtıldıkları coğrafi alanda, doğrudan ya da erişim noktalı bir haberleşme altyapısı oluşturabilirler [15] ve topladıkları verileri bu altyapı üzerinden yüksek güçlü bir merkez istasyona veya bilgisayara iletirler.

Düğümlerin planlı ya da rastgele dağıtılmış olması, veri depolama gereksinimi, gecikme duyarlılığı, kapsama alanı, güç tüketimi, donanımsal sınırlamalar ve kullanılan topolojiler KAA'nın çalışmasını etkilemektedir [3]. Bununla birlikte, KAA'ların çalışma prensibi aşağıdaki gibi basit bir şekilde formüle edilebilir:

Algılama + İşleme + Haberleşme (RF) = Yüzlerce Potansiyel Uygulama

2.4. Kablosuz Algılayıcı Ağların Olumlu ve Olumsuz Yönleri

- Algılayıcı düğümler yerel veri-işleme ve birlikte çalışma kabiliyetlerine sahiptir. Filtreleme ve veri birleştirme algoritmalarını kullanarak, çevreden gelen verileri toplayabilir, birleştirebilir ve bilgiye çevirebilirler.
- Düğümler doğrudan olayın içerisinde veya olaylara çok yakın olduklarından [3], KAA'nın doğru ve hassas ölçüm yapabilme olasılığı yüksektir.
- KAA, yeni eklenen her bir düğümlerle daha güçlü bir yapıya sahip olur. Yeterli düğüm yoğunluğu sağlandığında sınırsız alanları kapsam üzere genişletilebilir.
- KAA düğümleri, gerekli haberleşme altyapısını hızlı ve kolaylıkla kurabilirler [3] ve dinamik olarak denetleyebilirler. Şekil 2.2'deki gibi birbirleri üzerinden kısa mesafeli haberleşmeler yoluyla merkez istasyona ulaşabildiklerinden enerji tasarrufu sağlanır.



Şekil 2.2 : Birbirleri üzerinden haberleşen düğümler

- KAA'lar, birden fazla düğümün devre dışı olduğu durumlarda bile, çalışmasını sürdürebilmektedir.
- KAA düğümleri, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, oldukça küçük boyutlarda üretilebilmekte ve düşük maliyetlerle elde edilebilmektedir.



Şekil 2.3 : Bir algılayıcı ağ düğümü [16]

- KAA'lar, izlenen ortamla ilgili çok sayıda düğümden veri topladığından, elde edilen sonuçların doğruluk oranı yüksektir.

KAA'ların yukarıda sayılan üstünlüklerinin yanı sıra aşağıda da belirtilen bazı zayıf yönleri bulunmaktadır:

- KAA düğümlerinin yaşam süreleri kullanılan güç kaynakları ile sınırlıdır.
- Genellikle gözetimsiz/denetimsiz olarak çalışan düğümler, bozucu çevresel faktörlere ve saldırılara açık bir yapıya sahiptir.

2.5. Akıllı Algılayıcılar ve IEEE 1451

Akıllı algılayıcılar; algılayıcı, işlem birimi ve haberleşme ara yüzünden oluşan donanım ile işaret işleme, kalibrasyon, sistem kontrol ve haberleşme işlevlerini gerçekleştiren yazılım özelliklerinin birleşiminden oluşmaktadır [51], [52]. Bu birimler işlevsellikleriyle farklı algılayıcıların sisteme dahil edilmelerini basitleştirmektedir [53]. KAA düğümleri veri toplama, işaret işleme ve kablosuz iletim özelliklerine sahip akıllı algılayıcılardır [54].

KAA'lar için farklı üreticiler tarafından üretilen akıllı düğümler, birbirleriyle uyumlu çalışabilmelidir. Bu sebeple, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ve NITS (National Institute of Standards and Technology) 1993'te akıllı algılayıcılar üzerinde çalışmalar başlatmış ve IEEE 1451 standardı tanımlanmıştır. IEEE 1451

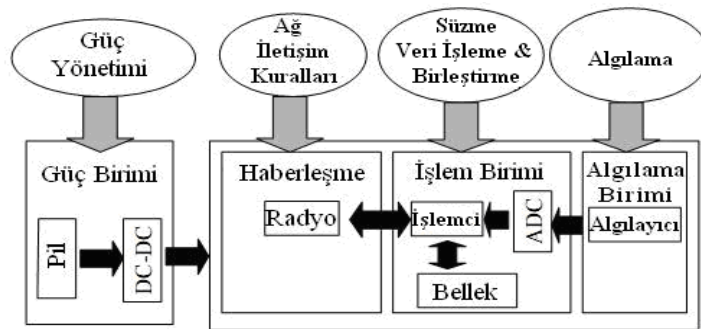
algılayıcılara tak ve kulan özelliği kazandırarak, bu cihazların ağlara uyarlanmasını önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır.

2.6. Bir Algılayıcı Düğümün İşlevsel Bileşenleri

Bir algılayıcı aşağıda belirtilen dört ana birimden oluşmaktadır:

- Güç kaynağı (Power Supply): Düğümün enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla, bir pil ve DC-DC (doğru gerilim seviye çevirici) dönüştürücüden oluşmaktadır.
- Haberleşme (Communication) Birimi: Kablosuz haberleşme için kısa mesafeli bir radyo içerir. Bununla birlikte, lazer ve kızılötesi gibi değişik çözümler de kullanılabilir.
- İşlem (Processing) Birimi: Uygulama kodlarının ve bilgilerin saklanması için bir bellek ve bir mikroişlemciden meydana gelmektedir. Ayrıca, algılama bloğu ile işlem birimi arasında bir ADC (Analog-Dijital Çevirici) ara yüz olarak kullanılmaktadır.
- Algılama (Sensing) Birimi: İzlenen fiziksel olayların elektriksel işaretlere çevrildiği bir grup algılayıcı ve güç çeviriciden oluşmaktadır.

Şekil 2.4'te genel bir algılayıcı düğümün sistem mimarisi ve farklı birimlerde gerçekleştirilen görevler gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Algılayıcı düğümün sistem mimarisi ve görevleri

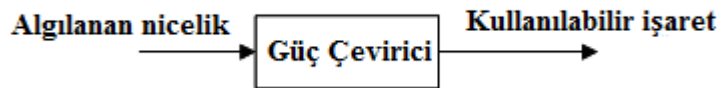
2.6.1. Algılama birimi ve algılayıcı türleri

Algılama birimi güç çeviriciler ve algılayıcı/algılayıcılardan oluşur. Algılayıcılar, fiziksel durum değişimlerini algılar. Algılayıcıların sayıları ve türleri KAA'nın uygulama alanı ve amaçlarına göre belirlenir. Bir düğüm üzerinde birden fazla algılayıcı bulunabilir. Günümüzde manyeto, ivme, ışık, sıcaklık, nem, basınç, vb. fiziksel değişimlerin izlenebileceği algılayıcı türleri bulunmaktadır.

2.6.1.1. Güç çeviriciler

Bir alandaki (domain) enerjiyi başka bir alana çevirmede kullanılan güç çeviriciler, algılanan nicelikleri doğrudan ölçülebilen ve işlenebilen elektriksel işaretlere dönüştürürler. Algılayıcılarla birlikte kullanıldığında fiziksel, biyolojik ya da kimyasal parametrelere bağlı olarak elektriksel işaret üretirler [55].

Şekil 2.5'te bir güç çevirici blok şeması görülmektedir. Algılanan mekanik, manyetik, elektro-manyetik, termal, optik, kimyasal veya biyolojik verilerin çevrim işlemleri fiziksel prensiplere göre yapılmaktadır.



Şekil 2.5 : Güç Çevirici (Transducer)

2.6.1.2. Algılayıcılar

Günümüzde bir çok firma tarafından KAA'lar için üretilen farklı türlerde algılayıcılar bulunmaktadır. Tablo 2.1'de bazı nicelikleri ölçmek için kullanılacak fiziksel prensipler gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Algılayıcılardaki güç çevrim prensipleri [58]

	Ölçülecek Nicelik	Güç Çevrim Prensibi
Fiziksel Özellikler	Basınç	Piezorezistif ve Kapasitif
	Sıcaklık	Termistör, Isıl-mekanik ve Isıl-çiftler
	Nem	Rezistif ve Kapasitif
	Akış	Basınç değişimi ve termistör
Hareket Özellikleri	Konum	E-Manyetik, GPS, dokunma algılayıcıları
	Hız	Opto-Elektronik ve Alan Etkisi
	Açısal Hız	Optik Kodlayıcı
	İvme	Piezorezistif, piezoelektrik ve optik fiber
İletkenlik Özellikleri	Gerilme	Piezorezistif
	Kuvvet	Piezoelektrik ve piezorezistif
	Tork	Piezorezistif ve opto-elektronik
	Titreşim	Piezorezistif, piezoelektrik ve optik fiber, ses ve ultra ses

2.6.2. İşlem birimi

Bir algılayıcı düğümün işleme birimi, haberleşme, veri toplama ve işleme gibi işlevleri yerine getirir. İşlem birimleri uygulamanın türüne bağlı olarak farklı türlerde ve hızlarda olabilmektedir. Günümüzde, çoğunlukla işlem birimi olarak, dahili RAM (veri hafıza), ROM (Program hafıza), ADC ve diğer çevre birimlerine sahip mikrodenetleyiciler kullanılmaktadır.

Mikro-denetleyiciler yalnız işlemci ve kod bellek değil, flash bellek, ADC(Analog Digital Converter), UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), SPI (Serial Peripheral Interface), sayıcı ve zamanlayıcıları da içermektedir. Bir KAA düğümü, mikrodenetleyicilere algılayıcı ve kablosuz haberleşme birimleri eklenerek kolayca elde edilebilir. Düğümlerde özellikle çok düşük güç tüketimine sahip mikrodenetleyiciler tercih edilmektedir. Örneğin, Crosbow TelosB KAA düğümü Texas Instruments firması tarafından üretilen MSP430 ailesine ait mikrodenetleyicileri kullanmaktadır [56].

2.6.3. Güç birimi

Güç kaynağı, algılayıcı düğüm için gereken güç ihtiyacını karşılamak amacıyla, bir pil ve/veya DC-DC (Doğru gerilim seviye çevirici) çeviriciden meydana gelmektedir. Düğümün yaşam süresini artırmak için, bu birim içerisine pillere ek olarak, çevreden enerji elde edebilecek güç birimleri ilave edilebilmektedir. Düğümlerin fiziksel özelliklerine ve kullanıldıkları çevrelere bağlı olarak güneş pilleri ve titreşimlerden elektrik elde üretebilen piezoelektrik elemanlar kullanılabilir. Bu durumda, pillerin aşırı dolmasını önlemek için bir de güç koruma devresi kullanılabilir.

KAA düğümlerinin enerji gereksinimlerini karşılayan piller ve enerji yönetim teknikleriyle ilgili detaylı bilgi takip eden alt bölümlerde verilmektedir.

2.6.3.1. Pil

Algılayıcı düğümün ihtiyacı olan enerji, pillerle karşılanmaktadır. KAA tasarımını ve başarımını etkileyeceği için, kullanılacak pil türünün seçimi önemlidir. Piller birincil (tekrar doldurulamayan) ve ikincil (tekrar doldurulabilen) olarak veya NiCd, NiMh ve Lithium-Ion gibi elektrot olarak kullanılan maddelerine göre sınıflandırılabilirler. Tekrar doldurulamayan piller, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduklarından, bazı KAA uygulamaları için daha elverişlidirler.

2.6.3.2. Enerji yönetim teknikleri

KAA düğümlerinin, genellikle, enerji kaynakları bitene kadar kullanılacakları varsayılmaktadır. Bu sebeple, kendilerine verilen görevleri tam olarak yerine getirebilmeleri için, sahip oldukları sınırlı enerji kaynaklarını en yüksek verimle ve tasarruflu kullanmalıdırlar. Enerji tasarrufu için geliştirilen Dinamik Güç Yönetimi (DPM) ve Dinamik Gerilim Ölçeklemesi (DVS) olmak üzere başlıca iki güç koruma yöntemi bulunmaktadır [57]:

DPM'nin prensibi, genel olarak, gereksinime göre cihazları kapatmak veya çalıştırmaktır. Cihazların kapatılması iyi bir güç koruma yöntemidir, fakat cihazların ne zaman kapatılıp, açılacağı önceden bilinemeyebilir. Bununla birlikte, bu modlar arasındaki geçişlerde söz konusu olan enerji ve gecikme de önemlidir ve göz önünde bulundurulmalıdır.

DVS'de güç tüketimi iş yüküne göre ayarlanmaktadır. Çalışma gerilimi düşürülerek bir işlemcinin enerji tüketimi azaltılabilmektedir.

2.6.4. Haberleşme birimi

KAA düğümleri kendi aralarında ve merkez düğüm ile kablosuz haberleşme kanalı kullanarak haberleşmektedir. Kablosuz haberleşme optik ya da radyo frekanslı (RF) yapılabilmektedir.

Optik haberleşmede radyo frekanslı haberleşmeye nazaran daha az enerji harcanır. Ortak bir kanal kullanılmadığından daha güvenlidir ve antene ihtiyaç yoktur. Bununla birlikte, haberleşmenin görüş hattında olması gerektiğinden, ortamın düz ve engelsiz olması gerekmektedir. Ayrıca düğümler düzenli/planlı olarak dağıtılmalıdır.

KAA'larda en çok kullanılan haberleşme türü RF'dir. Elverişli kullanımı ve ticari piyasadaki yeri, RF'yi algılayıcı düğümler için ideal bir iletim aracı haline getirmiştir. Düğümlerde harcanan enerji miktarının önemli bölümü, RF'de kullanılan modülasyon türü, yayın mesafesi, iletim gücü, veri hızı ve kullanım süresine bağlıdır. RF haberleşmede en önemli engel anten boyudur.

2.6.4.1. KAA OSI referans modeli

KAA'lar birbirleriyle veya daha sonra üretilecek diğer KAA mimarileriyle tam olarak ve uyumlu çalışabilmelidir. Yeni tasarlanan ağların diğer ağlarla etkileşimini kolaylaştırmak amacıyla yedi ayrı katmandan oluşan OSI referans modeli geliştirilmiştir.

KAA'nın diğer ağlarla etkileşimini kolaylaştırmak amacıyla Şekil 2.6'daki gibi OSI referans modelinin beş ayrı katmanı kullanılmaktadır. Tasarım yüklerinin bu şekilde farklı katmanlara dağıtılmış olması, KAA tasarımcılarına, her bir katmanda başarılması gereken görevlerle ilgili, yazılımsal ve donanımsal uygulamaları modüler bir tarzda güncelleme olanağı sağlamaktadır.

Uygulama Katmanı	5. Katman
Ulaşım Katmanı	4. Katman
Ağ Katmanı	3. Katman
Veri Bağı Katmanı	2. Katman
Fiziksel Katman	1. Katman

Şekil 2.6 : KAA için OSI referans modeli

2.6.4.1.1. Fiziksel katman

Fiziksel katman genel olarak birinci katman olarak tanımlanır ve bit düzeyindeki mesajları almak yada iletmek için iletişim kurallarını ağ haberleşme donanımlarına bağlar. Bit düzeyinde hata kontrolü ve seçime bağlı olarak şifreleme fonksiyonlarını içerir. Bu katman için veri, bir bit katarı (dizisi) demektir. Veri çerçeve zaman eşlemesi (senkronizasyonu), ortam standartları, gerilim seviyeleri, işaret hızları, bit süresi ve aktarılacak sayısal verilerin fiziksel olarak ne şekilde ifade edileceği bu katmanla ilgilidir.

KAA'lar için tasarlanan IEEE 802.15.4 standart yayın platformu, otomatik alındı mesajları ve şifreleme için ek fiziksel katman özellikleri sunmaktadır [48].

Tablo 2.2'de gösterildiği gibi IEEE 802.15.4 standart yayın platformu; 2.4 GHz, 915 MHz ve 868 MHz olmak üzere 3 farklı çalışma frekans bandı sunar. 868 – 868.6 MHz aralığında 1, 915 – 928 MHz aralığında 10, 2.4 GHz ile 2.4835 MHz aralığında 16 adet kanal bulunur. 2.4 GHz için veri aktarım hızı 250 kbit/s dir. Alçak frekanslar

yayımlı kayıpları daha düşük olduğundan uzun mesafeler için daha uygundur. Bununla birlikte, yüksek frekansla artan veri aktarım hızlarının, yüksek veri taşıma kapasitesi, düşük gecikme ve düşük çalışma zamanları gibi kazanımları mevcuttur.

Tablo 2.2 : IEEE 802.15.4 frekans bantları ve Veri Hızları [47]

Frekans Bandı	868 MHz	915 MHz	2.4 GHz
Bölge	Avrupa, Japonya	Amerika	Genel
Kanal Sayısı	1	10	16
Veri Hızı	20 kbps	40 kbps	250 kbps

2.6.4.1.2. Veri bağı katmanı

Bağ katmanı, ağ katmanı ve fiziksel katman arasında ara yüz görevini üstlenir. Bu katman iki ayrı işleve sahip olan, Mantıksal Bağ Kontrol (LLC) ve Ortama Erişim Kontrolü (OEK) alt katmanlarının birleşiminden meydana gelmektedir.

LLC alt katmanı, veri paketlerinin parçalı olarak gönderilmesinde, ağ katmanı ile veri bağı katmanı arasındaki bağlantıyı sağlar. Veri kontrol bilgisi, döngüsel artıklık denetimi (CRC) hesaplaması, kaynak, hedef ve aradaki ağ aygıt adreslerini içeren OEK çerçevelerini birleştirme ve ayrıştırma işlemini gerçekleştirir. OEK alt katmanı radyo haberleşme cihazlarını kontrol eder ve KAA'larda enerji tüketiminin indirgenmesinde önemli işlevler gerçekleştirir. Ayrıca, ortama erişim paylaşımı için adil içerik mekanizması, veri güvenilirliği yada özel güvenlik seçenekleri sunmaktadır.

2.6.4.1.3. Ağ katmanı

Ağ katmanı, KAA'larda gönderici ve alıcı düğümleri birbirine bağlayan ağ üzerinden uçtan-uca yönlendirme iletişim kurallarını kullanarak, paket yönlendirmesini en uygun hale getirmek için algoritmik stratejiler sunmaktadır. KAA'larda kullanılan yönlendirme protokolleri bazı yönleriyle bilinen yönlendirme protokollerinden ayrılmaktadır [16]. İlk olarak, algılayıcı düğümler internet protokol (IP) adresine

sahip olmadıkları için, KAA'da IP tabanlı yönlendirme protokollerini kullanılamamaktadır. İkincisi, KAA için tasarlanan ağ protokolleri, çok sayıda düğümden oluşan bir KAA'da, düğümlerdeki verileri çok hızlı bir şekilde toplayabilmeli; algılayıcı düğümlerin enerji, haberleşme bant genişliği, hafıza ve işlem yeteneklerindeki sınırlamalara karşı dayanıklı ve ölçeklenebilir olmalıdır.

2.6.4.2. OEK (Ortama Erişim Kontrolü)

KAA düğümlerinin paylaşılan bir haberleşme ortamına nasıl erişeceği OEK alt katmanında kullanılan iletişim kurallarıyla belirlenmektedir. Bu iletişim kuralları, topoloji ve düğüm yoğunluklarındaki değişimleri kendiliğinden, hızlı ve etkin bir biçimde benimseyebilmeli, adil paylaştırılmış ve çarpışmasız bir haberleşme ortamı sunmalıdır.

KAA'larda kullanılan OEK iletişim kuralları enerjiyi verimli kullanmalıdır ve haberleşme ortamını adil bir şekilde paylaşmalıdır [17]. Enerjiyi verimli kullanmak için genel olarak aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

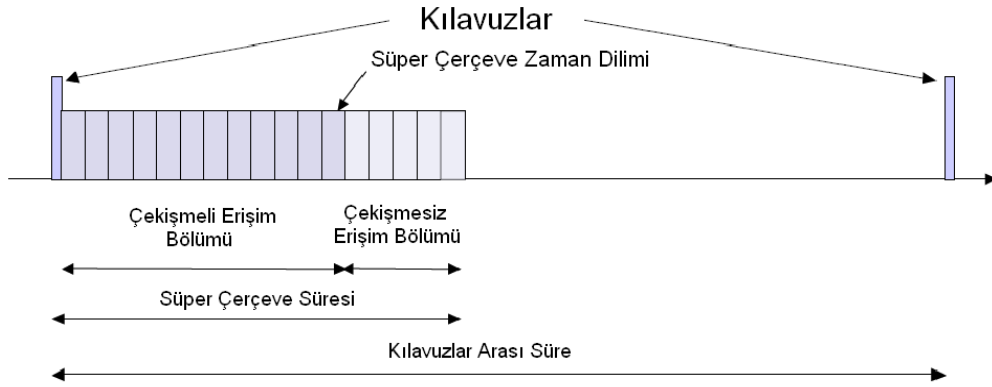
- Çarpışmaları önlemek için haberleşme ortamını adaletli olarak paylaşmalı ve aynı anda yalnız bir düğümün kullanmasına izin vermelidir.
- Haberleşme sürecinde veri paketlerine eklenen kontrol çerçevelerinin boyutlarını, haberleşmede harcanan enerjiyi artıracağından, en aza indirmelidir.
- Başarılı bir haberleşme için; hedef düğüm hazır olmadan paket gönderimini başlatmamalıdır.
- Radyo haberleşmesinde düğüm içerisinde yapılan işlemlere göre daha fazla enerji harcandığından, radyonun aktif çalışma zamanını iyi ayarlamalıdır.

IEEE 802.15.4 OEK iletişim kuralları, ortama erişim için CSMA/CA kullanmaktadır. Kılavuz etkinleştirilmiş (beacon-enabled) ve kılavuz etkinleştirilmemiş (non beacon-enabled) olmak üzere iki ayrı çalışma biçimini desteklemektedir [48]. Kılavuz etkinleştirilmemiş OEK tekniğinde, yalnız dilimsiz (unslotted) CSMA/CA erişim kuralları kullanılmaktadır. Kılavuz etkinleştirilmiş OEK tekniğinde ise, KAA'yı

tanımlamak ve düğümlerin eş zamanlı çalışmalarını sağlamak amacıyla, kılavuz (beacon) adı verilen çerçeveler kullanılmaktadır. Koordinatör tarafından düzenli aralıklarla gönderilen bu çerçeveler, haberleşme ayrıntılarını da içermektedir. İki kılavuz arasındaki süre, aktif ve aktif olmayan (seçime bağlı) kısımlardan oluşmaktadır. Süper çerçeve olarak adlandırılan aktif kısım, 16 eşit zaman dilimine bölünmektedir (Şekil 2.7) ve yalnız aktif kısımda haberleşme işlemlerine izin verilmektedir. Aktif olmayan kısım bulunuyorsa, düğümler enerji tasarrufu için uyku durumuna geçebilirler; fakat bir sonraki kılavuz alımından önce yeniden aktif olmaları gereklidir [18]. Kılavuzların varış zaman aralıkları ve süper çerçevelerin aktif kısımlarının süreleri, sırasıyla, BO(Beacon Order) ve SO(Superframe Order) katsayılarıyla belirlenmektedir:

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \quad 0 \leq BO \leq 14$$

$$SI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \quad 0 \leq SO \leq 14$$



Şekil 2.7 : Kılavuz-Etkinleştirilmiş 802.15.4 Süperçerçeve Yapısı

Süper çerçeve çekişmeli ve seçime bağlı olarak çekişmesiz erişim için ayrılmış zaman dilimleri içermektedir. Çekişmeli erişimde düğümler, iletim ortamını kullanmak için birbirleriyle rekabet içindedirler. GTS (Düğüme tahsis edilmiş çekişmesiz zaman dilimleri) olarak adlandırılan çekişmesiz erişim bölümü, düğümlerin gecikme gereksinimlerini karşılayabilmek için kullanılmaktadır.

2.6.4.3. Yönlendirme

KAA'lar genellikle geniş bir alanda rastgele dağıtılmış düğümlerden oluşmaktadır. Çevresel verilerin düşük güç tüketimiyle hızlı ve güvenilir bir biçimde merkez düğüme aktarılabilmesi için yönlendirme protokolleri kullanılmaktadır. KAA'ların enerji kaynakları, bant genişliği ve veri işleme kabiliyetleri sınırlı olduğundan, kullanılan yönlendirme teknikleri uzun mesafeli haberleşmeyi desteklemelidir [19]. Doğrudan haberleşme, düğümler merkez istasyona yakın olduğunda iyi sonuçlar vermektedir [20]; fakat düğümler çoğunlukla rastgele dağıtıldığından, çoklu düğümler üzerinden haberleşme kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle ihtiyaca ya da kullanılan ağ topolojilerine göre, çeşitli yönlendirme algoritmaları geliştirilmiştir.

Paket seli (flooding) ve fısıltı (gossiping) KAA'larda herhangi bir yönlendirme algoritmasına ihtiyaç duyulmadan kullanılan iki klasik yönlendirme tekniğidir. Paket seli tekniğinde her bir düğüm veri paketini komşu düğümlere, onlarda etraflarındaki düğümlere aktarmaktadır. Bu teknikte paket hedefe varıncaya yada aktarılan düğüm sayısı belirli bir değere ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Fısıltı tekniği, paket selinin biraz daha gelişmiştirilmiş halidir. Bu yönlendirme tekniğinde, düğümler aldıkları veri paketlerini rastgele seçtikleri komşularından herhangi birine iletmektedir. Paket seli tekniğinde, aynı paket bir düğüme farklı yollardan gelebilmekte iken, fısıltı tekniğinde aynı paketin farklı düğümlerden gelmesi olasılığı yoktur.

KAA'lardaki yönlendirme iletişim kuralları veri merkezli, aşamalı veya konum tabanlı olarak sınıflandırılabilir [21]. Veri merkezli iletişim kuralında gereksiz bilgilerin çoğu bertaraf edilebilir. Aşamalı yapıda merkez düğüme bağlı küme liderleri aldıkları verileri birleştirebilir, enerji tasarrufu için paket boyutlarını azaltabilir. Bu tür yönlendirme de küme lideri yada ağ geçidi olarak seçilen düğümler, enerji, hafıza, veri işleme, gönderme hızı gibi özellikleri yönüyle, diğer algılayıcı düğümlere göre daha kabiliyetli cihazlar olmalıdırlar [22]. Konum tabanlı yönlendirmede veriler, ağın tamamına değil, konum bilgisi kullanılarak istenilen bölgelerine aktarılmaktadır.

2.6.4.3.1. Veri merkezli yönlendirme teknikleri

Doğrudan yönlendirme: Fazladan oluşabilecek trafiğin ve gereksiz işlemlerin önüne geçmek amacıyla, talep edilen verilere ait özellikleri içeren bir ilgi şeması gönderilir. Her bir düğüm aldığı ilgi şemasını ön belleğinde tutar ve bu değerlerle algıladığı verileri karşılaştırır. İlgi kaydının içinde, başlatıldığı düğüme doğru bir cevap yolu da bulunmaktadır. İlgi ve bu yollar kullanılarak kaynaktan merkez düğüme doğru yollar tespit edilir. Merkez düğüm bu yollar arasından seçilen biri üzerinden ilgi mesajını tekrar yollar. Karşılığında kaynaktaki veri yine bu yol üzerinden merkez düğüme ulaştırılır. Seçilen yolda, herhangi bir sebeple kopma olursa, alternatif yollardan birisi devreye sokulur. Veri haberleşmesi talep üzerine gerçekleştiğinden enerji verimli kullanılmaktadır. Bununla birlikte, algılanan verilerin karşılaştırma işlemi fazladan bir yük getirir. Doğrudan yönlendirme merkez düğüme sürekli bir veri akışının gerektiği uygulamalar için önerilemez [22].

SPIN (Algılayıcılarda anlaşma yoluyla veri yönlendirme): Yeni bir veriye sahip olan düğüm, ağdaki düğümler üzerinden bu verinin özellikleri periyodik olarak ilan eder. Düğümlerin her biri potansiyel merkez düğüm niteliğindedir. Gereksiz veri trafiğinin önlenmesi amacıyla, veri talebi yalnızca merkez düğümler tarafından yapılabilir ve bir iletim işlemi de ancak bir merkez düğüm tarafından başlatılabilir. SPIN ailesinin asıl sürümleri SPIN-1 ve SPIN-2'dir. SPIN-1 üç tür algılayıcı mesaja sahip, üç basamaklı bir iletişim kuralıdır. Algılayıcı mesaj türleri; yeni veri ilan mesajı (ADV), veri talep mesajı (REQ) ve talep edilen veri (DATA)'dir. Bu üç basamak için enerji tüketimleri belirli bir eşik değerinin altına düşmemek şartıyla düğümler iletişime katılabilirler. SPIN-1 ile SPIN-2 arasındaki tek fark bu eşik değerleridir. Topoloji değişimlerini yerelleştirerek hızlı uyum sağlama ve gereksiz verileri bertaraf eden sorgu temelli yapısı olumlu özellikleri arasında sıralanabilir. Bununla birlikte, veri dağıtımının garanti edilememesi çoğu uygulamalar için elverişli değildir [20].

Enerji hedefli yönlendirme: Ağın yaşam süresini artırmak amacıyla, paketlerin yönlendirilmesinde düğümlerde harcanan enerjinin en az olduğu alternatif yollardan biri kullanılmaktadır. Düğümler yönlendirme tablolarındaki komşuları üzerinden merkez istasyona ulaşmak için maliyete dayalı bir olasılık hesabı yaparlar. Bu

yöntem doğrudan yönlendirmeye benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, enerji kullanımını açısından doğrudan yönlendirmeye göre daha elverişli olmasına rağmen, yollardaki kopmalara karşı yeterli dayanıklılığa sahip değildir [22].

ACQUIRE [27] (Algılayıcı Ağlarda Aktif Sorgu İletimi): Çalışma şekli açısından doğrudan yönlendirmeye benzer özellikler taşımaktadır. Merkez düğüm, her biri farklı durumlara yönelik alt sorgulardan oluşan, aktif bir sorgu yayınlar. Aktif sorgu ağ üzerinden düğümlere dağıtılır ve sorgunun bulunduğu düğüm aktif düğüm olarak adlandırılır. Sorguyu alan düğüm sahip olduğu eski verilerini günceller ve etrafındaki düğümlerden de topladığı verilerle sorgunun mümkün olan en fazla kısmını çözmeye çalışır. Bazı uygulamalar için bu veriler düğümlere özel de olabilir, yani her düğüm yalnız bir değişkeni izlemektedir. Bir kısmı çözülen sorgu rastgele yada belirli kriterlere göre (başarılı sorgu oranı gibi) seçilen bir başka komşu düğüme iletilir. Sorgu tamamen çözüldüğünde, geldiği yolun tersine yada en kısa yol seçilerek, ilk üretildiği düğüme doğru sorgunun çözüldüğüne dair bir cevap mesajı gönderilir.

KAA'larda kullanılan, mevcut diğer veri merkezli yönlendirme algoritmalarından bazıları GBR, CADR, Rumor, CAUGAR'dır.

2.6.4.3.2. Aşamalı yönlendirme teknikleri

KAA'lardaki ölçeklenebilirlik ağ geçidi kullanılarak sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, geniş çaplı ağlarda gecikmelerin ve paket kayıplarının artması başarımın düşmesine neden olduğundan, hizmet kalitesini etkilemeden ölçeklenebilirlik çözümü için aşamalı yönlendirme önerilmiştir. Aşamalı yönlendirmede, iş yüklerinin alt-kümelere dağıtılmasıyla enerji tasarruflu bir çalışma amaçlanmaktadır.

LEACH (Düşük Enerjili Uyarlanabilir Aşamalı Yönlendirme) [23]: Aşamalı yönlendirme için önerilmiş ilk yaklaşımdır. Alt-kümelere düğümlerin aldıkları radyo işaretlerinin SNR (İşaret Gürültü Oranı) değerlerine bağlı olarak oluşturulmaktadır. Yerel merkezler olan küme liderleri (alt-ağ geçidi), haberleşme yükünü azaltmak için toplanan verileri birleştirme ve merkez düğüme yönlendirme işlevini yerine

getirmektedir. Ağdaki temel haberleşme işlemi sadece ağ geçitleri bulunmaktadır. Düğümlerdeki güç tüketiminin dengelenmesi amacıyla, küme liderleri matematiksel bir işleme bağlı olarak değiştirilmektedir. Düğümler doğrudan küme liderleriyle haberleştiklerinden geniş çaplı ağlarda elverişli değildir.

PEGASIS [24] (Algılayıcı Bilgi Sistemlerinde Enerji Verimli Toplama): Düğümler, komşularından aldıkları verileri birleştirip merkez düğüme yönlendirerek gönderme trafiğini azaltmaktadır. Doğrudan merkez istasyonla sadece bir düğüm haberleşebildiğinden, bu düğüme kadar olan düğüm zincirinin uzun olması durumunda gecikmeler artacağı için elverişli değildir. Aşamalı-PEGASIS (Hierarchical PEGASIS) [25], PEGASIS'teki gecikmeleri azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Ağaç topolojisine benzer bir yapıyla, düğümler aldığı verileri ile kendi verileri ile birleştirerek, üst dallardaki düğümlere iletirler. Bir üst aşamada kendisi ile aynı işlemleri yapan iki düğüm yan yana geldiğinde, biri kendisindeki veriyi diğerine aktarır. Alınan veri ile kendi verisini birleştiren düğüm bir aşama daha yukarı çıkar. Kalan son düğüm lider olarak kabul edilir ve sahip olduğu veriyi merkeze iletir. Düğümlerin komşularından haberdar olması için sürekli topoloji desteği gerektiğinden, yoğun haberleşmenin olduğu ağlarda uygun değildir.

TEEN (Eşik değerine duyarlı algılayıcı ağ iletişim kuralı): Algılama ortamında ani cereyan eden olaylara hızlı cevap verebilmek üzere tasarlanmıştır. Düğümler komşu düğümlerle, küme liderleri de kendi aralarında alt-kümeler oluştururlar ve bunlardan biri yeni grubun da lideri olur ve merkezle haberleşir. Ağ koordinatörü iki eşik değeri yayımlar. Haberleşme trafiğini azaltmak için, algılama değeri üst eşik değerine eşit yada bu değerden büyükse ve değişim miktarı alt eşik değerine eşit yada bu değer üzerindeyse, algılanan veri küme liderine gönderilmektedir. TEEN'de ancak eşik değerlerini sağlayan verilerin aktarılmasına izin verildiğinden, algılanan verilerin sürekli olarak aktarılmasını gerektiren uygulamalar için uygun değildir. Periyodik veri toplama ve gerçek zamanlı olaylar göz önünde bulundurularak, TEEN'deki olumsuzlukları ortadan kaldırmak için APTEEN geliştirilmiştir ve başarımın arttığı görülmüştür. Her ikisinde de işlemler ek yük getirir ve karmaşık yapıdadır [22].

Küme tabanlı (cluster-tree) algılayıcı ağ yönlendirmesi [22]: Düğümler kendi aralarında farklı gruplar oluştururlar ve aralarından biri küme lideri olur. Küme liderleriyle haberleşen bir ağ geçidi bulunur. Ağ geçidinin düğümlerin yerlerinden haberdar olduğu ve enerji sınırlaması diğer düğümlere göre daha düşük olduğu varsayılır. Algılama verilerinin merkez düğüme aktarılacağı yol ağ geçidi tarafından belirlenir. Düğüm verilerini ağ geçidine ulaştırmak için TDMA tabanlı bir ortama erişim kontrol mekanizması kullanılır. Yönlendirme yolu belirlenirken, iki düğüm arasında bir maliyet fonksiyonu tanımlanır ve buna göre düğümlerle ağ geçidi arasındaki en az maliyetli yol bulunur. Algoritma gecikmeyi sınırlamak için minimum haberleşme alanını zorlamaktadır [28].

2.6.4.3.3. Konum tabanlı yönlendirme teknikleri

KAA uygulamalarında düğümlerin konumları bilindiğinde düğümler arası mesafeler hakkında kestirim yapılabilir, veri paketleri tasarruflu olarak yönlendirilebilir ve haberleşme trafiği azaltılabilir. Bununla birlikte, algılayıcı ağlar için tasarlanmış konum tabanlı yönlendirme protokollerinin bir çoğu enerji merkezli olmadığı için, KAA'lar için elverişli değildir [22].

MECN (Enerji tasarruflu haberleşme ağı): Düğümlerin hareketli olmadığı KAA'larda uygulanabilirliği yüksek bir algoritmadır. Düşük güç tüketimine sahip GPS kullanılarak enerji tasarruflu bir ağ kurulur. Her düğüm için, doğrudan yönlendirmeye göre daha az enerji harcanacak bir aktarma bölgesi tanımlanır. Bir düğümün kapsamı, düğümün erişebildiği bütün aktarma bölgelerinin bileşimi alınarak belirlenir. Düğüm aktarma bölgesinde yerel bir tarama yapılarak olabildiğince az düğümden oluşan bir alt-ağ bulmak amaçlanır. İki boyutlu olarak düğümlerin konumları alınır ve maliyet ölçütünün güç tüketimi olduğu, Belmann-Ford en kısa yol algoritması kullanılarak en uygun yollar bulunur. Ağa yeni düğümlerin katılmasına yada düğümlerin ağdan ayrılmasına aktif olarak uyum sağlanabilir. Yukarıdaki işlemlerin daha az düğümlerle başarılması amacıyla, MECN geliştirilerek SMECN önerilmiştir. Enerji tüketiminin MECN'ye göre az olduğu

görülmüştür; fakat az sayıda düğümden oluşan alt-ağlar bulmak sisteme ciddi bir ek yük getirmektedir [22].

GAF [29]: Yönlendirme güvenilirliğini etkilemeden ağdaki ihtiyaç duyulmayan düğümleri kapatarak enerji tasarrufu sağlanması amaçlanır. Kapsama alanı sanal karelere bölünür. Düğümler GPS'leri ile buldukları kareleri tespit ederler ve aynı karedeki düğümler eşdeğer olarak tanımlanır. Enerji tasarrufu için, eşdeğer düğümlerden biri hariç diğerleri kapanırlar ve güç tüketimini dengeleme amacıyla aktif düğüm sırayla değiştirilir. Düğümler komşularını tespit ettiği keşif, yönlendirme işleminde rol aldığı aktif ve haberleşme radyosunun kapalı olduğu üç durumdan herhangi birinde bulunur. GAF konum tabanlı bir algoritma olmasına rağmen, eşdeğer düğümlerin bulunduğu kareler bir küme olarak değerlendirilir ve bunları temsilen bir düğümün aktif olduğu düşünüldüğünde aşamalı yönlendirmeyle benzerlik gösterir. Fakat yönlendirme verileri birleştirilmeden yapılmaktadır.

GEAR (Enerji Merkezli Konuma Bağlı Yönlendirme) [22]: Sorguların KAA'nın tamamı yerine belirli bir bölgesine yönlendirilmesiyle, ağ trafiğinin azaltılması amaçlanmaktadır. Yönlendirme için komşu düğüm kestiriminde düğümlerin konum bilgileri kullanılır ve enerji ön planda tutulmaktadır. Düğümler, komşuları üzerinden hedefe doğru, kestirilen ve öğrenilen olmak üzere iki maliyet bilgisi tutmaktadır. Yönlendirme işlemi, paketin hedef bölgeye aktarılması ve hedef bölgede ilerlemesi olmak üzere iki kademe yapılır. Düğümler, paketleri en yakın komşularının üzerinden hedef bölgeye iletirler. Paket hedef bölgeye ulaştığında, sınırlandırılmış paket seli algoritması ya da özyineli konuma bağlı paket seli algoritması kullanılmaktadır. Bölge dört alt bölüme ayrılır, paketin kopyaları her birine gönderilir ve bu işlem bir düğüm kalana kadar devam ettirilir. Hedef düğüme ulaşıldığında öğrenilen maliyet bir önceki düğüme bildirmektedir.

2.6.4.4. Fiziksel ortam özellikleri

KAA'lar radyo işaretleri için iletim ortamı olarak havayı kullanmaktadır. Bu nedenle iletim ortamında belirli oranlarda zayıflatma etkisine maruz kalmaktadırlar. Engelsiz

ve yansımaz (Line of Sight) ortamlarda yayılan işaretler sadece mesafeye dayalı güç kaybına maruz kalırlarken, yansımaz ortamlarda (non-Line of Sight), mesafenin yanı sıra, işaretlerin zayıflama katsayılarını artıran farklı etkenler de bulunmaktadır.

Alınan verilerin doğru bir şekilde ayrıştırılması ve çözülebilmesi için SNR'nin belli bir sınırın üzerinde olması gerekmektedir. Bu nedenle, gönderici antenin işaret yayma gücü yükseltilerek SNR değeri artırılabilir ya da daha iyi modülasyon şemaları kullanılabilir [30]. KAA'larda anten gücünün artırılması, sistemde harcanan enerjiyi ve ortamdaki girişimleri önemli ölçüde arttıracığından, iyi bir çözüm olarak görülmemektedir.

2.6.4.5. Enerji

Enerji, KAA'ların en önemli problemlerinden biri olarak düşünülmektedir. Düğümlerin yaşam sürelerini güç kaynakları belirlediğinden, KAA tasarımları incelenirken enerji tüketimi öncelikli olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Harcanan enerji miktarı, düğümlerin farklı katmanlardaki çalışma koşullarına ve işlevlerine bağlı olarak değişmektedir. Düğümlerdeki enerjinin büyük bir kısmı haberleşme biriminde harcanmaktadır. Hatta, işlem ve algılama birimlerinde harcanan enerjiler ihmal edilebilir [59].

Fiziksel katmanda harcanan enerji miktarı, düğümlerin haberleşme mesafeleri, gönderim için gereken anten gücü, fiziksel ortamın özellikleri, modülasyon yöntemleri, haberleşme kanalının özellikleri, şifreleme ve başlık bitlerinin boyutları ile orantılıdır. Veri bağı katmanında şifreleme algoritmalarının sistem çalışmasına ve paket boyutlarına etkisi, kanalın verimli olarak kullanılamaması, çarpışmaların ve tekrar gönderme işlemlerinin artması, radyonun kullanılmadığı halde aktif tutulması, durum geçişlerinde harcanan enerjinin ve zamanın fazla olması enerji kullanımını önemli derecede etkilemektedir. Ağ katmanında kullanılan yönlendirme algoritmalarının enerji verimli çalışması ve düğümlerdeki enerji tüketimini en iyi şekilde dağıtması ağın yaşam süresinin artırılmasında etkili olacaktır.

2.6.4.6. Güvenlik

Düğümlemler haberleşme esnasında veri güvenliği ve gizliliğini sağlamalıdır. Güvenli haberleşmede alınan mesajların gerçekten ilgili kaynak tarafından gönderildiğinin doğrulanmasında kimlik denetimi (authentication); verilerin haberleşme ortamında değiştirilmediğinin anlaşılmasında bütünlük kontrolü (integrity); alınan verilerin yeni üretilmiş olduğunun doğrulanmasında veri tazelik kontrolü (data freshness) ve veri gizliliği (privacy) kavramları üzerinde durulmaktadır. Aktarılan verilerin üçüncü şahısların eline geçmemesi yada herhangi bir yolla elde edilmesi durumunda da kullanılamaması amacıyla, temel olarak şifreleme ve steganografi olmak üzere iki yöntem izlenmektedir.

Şifreleme işlemleri, depolama ya da haberleşme esnasında veri gizliliğinin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Veriler, yalnız yetkili kişilerce/düğümlemlerle paylaşılan bir anahtar kullanılarak, bir şifreleme algoritmasında anlamlı biçimde karıştırılmaktadır. Şifrelenmiş veriler alıcıya ulaştığında, göndericidekinin tersine bir işleme tabi tutularak başlangıçtaki veriler elde edilmektedir. Bu işlemler için ayrıca bir zaman ve efor gerektiğinden, işlem yetenekleri sınırlı olan algılayıcı düğümlemler için aşılması zor bir görevdir. Çerçeve boyutlarını artıran algoritmalar ağ haberleşmesine ek bir yük getirmektedir. Ayrıca anahtarların nasıl üretileceği ve yeni eklenen düğümlemlere nasıl dağıtılacağı aşılmayı bekleyen problemler arasındadır.

Steganografi, gönderilecek verilerin genellikle çoklu ortam verileri olmak üzere, başka bir verinin içerisine gömülerek gizlenmesi işlemidir. Şifrelemede amaç mesaj içeriğinin gizlenilmesi iken, steganografide mesajın varlığının gizlenilmesidir. Temel işlev taşıyıcının üzerinde anlaşılacak şekilde değişiklik yapılmasıdır.

KAA'lar için tasarlanmış özel bir işletim sistemi olan TinyOS, veri bağı katmanında çalışan TinySec [32] güvenlik iletişim kuralını kullanmaktadır. Güvenlik için yalnız kimlik denetimi (TinySec-Auth) ve kimlik denetimli şifreleme (TinySec-AE) olmak üzere iki seçenek sunar. Birinci seçenek çerçeve boyutunu 1-bayt, ikincisi 5-bayt arttırmaktadır. Kimlik denetimli şifrelemede, verinin şifrelenmesi için özel biçimli 8-baytlık başlangıç vektörüyle birlikte Skipjack blok şifreleme şeması kullanılır [33].

Algılayıcı düğümlerin, güvenlik gereksinimlerini karşılayabilecek şekilde seçilmesi yada tasarlanması gerektiği gibi, güvenlik teknikleri ve algoritmalar da KAA düğümlerinin ve ağıın genel durumuna uygun olmalıdır.

2.7. Kablosuz Algılayıcı Ağların Kullanım Alanları

Özellikle doğrudan ulaşılamayan ya da kablolu haberleşmenin mümkün olmadığı durumlarda KAA'lar uygun bir çözüm olmaktadır. Kullanışlı ve esnek tasarımları sayesinde kullanım alanları giderek genişlemektedir. Aşağıda yaygın olarak kullanılan KAA uygulama alanları ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

2.7.1. Çevresel veri toplama

Çevresel veri toplama uygulamalarında, daha önceden belirlenmiş referans bölgelere yerleştirilen düğümlerden güncel bilgiler toplanmaktadır. Düğümler kullanacakları ağ topolojisini kararlaştırır ve verilerin merkez istasyona taşınmasında uygun yönlendirme stratejisini belirler [34]. Genel olarak ağaç tabanlı yönlendirme topolojileri kullanılır. Dalların ayrıldığı noktadaki düğümler uç düğümlerden daha aktif kullanıldıklarından, enerji problemi oluşabilmektedir [17],[29]. Bu tür uygulamalarda önemli olan, düğüm sayısı ve uzun yaşam gereksinimleridir.



Şekil 2.8 : Hassas tarım için ad-hoc kablosuz algılayıcı düğüm dağılımı

Şekil 2.8’de hassas tarım için düğüm dağılım örneği görülmektedir. Algılayıcı düğümler bir tarlanın yüzlerce noktasındaki sıcaklık, ışık seviyeleri ve toprak nemini tespit ederek, topladıkları verileri birbirleri üzerinden merkez istasyona ulaştırmaktadır. Bu tür bir uygulama için talep edilen dayanıklılık, ölçeklenebilirlik, düşük maliyet, ağ kurulum kolaylığı gibi özellikler bir KAA ile karşılanabilmektedir.

2.7.2. Güvenlik izleme

Güvenlik uygulamalarında verilerin biriktirilme gereksinimleri bulunmamaktadır. Düğümler algılayıcılarını sık sık kontrol etmektedir; fakat sadece güvenlik ihlali söz konusu olduğunda merkez düğüme bir durum raporu göndermektedirler. Sistemin birincil gereksinimi olarak, alarm mesajları için anında ve güvenli haberleşme sağlanmalıdır. Ayrıca, düğümlerin aktif ve hazır olduğu sistem tarafından sürekli olarak denetlenmelidir. Bir düğüm herhangi bir sebeple devre dışı kaldığında bu durum güvenlik ihlali olarak değerlendirilerek rapor edilmektedir. Oluşan alarm durumu ile ilgili raporların merkez istasyona en kısa zamanda iletilmesi gereklidir. Bu sebeple, haberleşme esnasındaki gecikmeler güvenlik uygulamalarının başarımında oldukça önemlidir.

2.7.3. Düğümlerin izlenmesi

Günümüzde bazı envanter kontrol sistemleri, nesnelerin geçtiği noktaları kaydederek izleme yöntemini benimsemektedir. İzlenecek nesnelerin her birine etiketlenmiş birer algılayıcı düğüm verilerek, düğümlerin, belirli bölgelere dağıtılmış algılayıcılardan oluşan bir KAA’nın içerisinde geçişleri izlenmektedir. Düğüm ağın içerisinde hareket halindeyken KAA topolojisi sürekli olarak değişikliğe uğramakta, nesnelerin ağa girmesi ve ayrılmasıyla KAA’nın durumu sürekli değişmektedir. Kullanımdaki temel prensip sabit KAA’lara sonradan dâhil olan nesnelerin tespit edilmesidir.

2.8. Kablosuz algılayıcı ağ uygulamaları

KAA'ların askeri veya sivil olmak üzere bir çok güncel uygulamaları mevcuttur. Özellikle askeri alanda önemli adımlar atılmış, C4ISRT olarak bilinen tümleşik sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler dost kuvvetlerin, teçhizat ve mühimmatların izlenmesinde gelişmiş lojistik destek sunmaktadırlar. KAA'lar bunun yanında davetsiz misafirlerin, kimyasal ya da biyolojik saldırıların, su altı hedeflerin, ateşli silahların ve yerlerinin tespit edilmesinde gelişmiş gizli izleme imkânı sağlamaktadır. Gelişmiş keşif özellikleri sayesinde ulaşılamayan ya da çeşitli sebeplerle (radyasyon, mayın vs) kirletilmiş arazilerde ve düşman hatlarının da ötesinde çalıştırılabilmektedir [3].

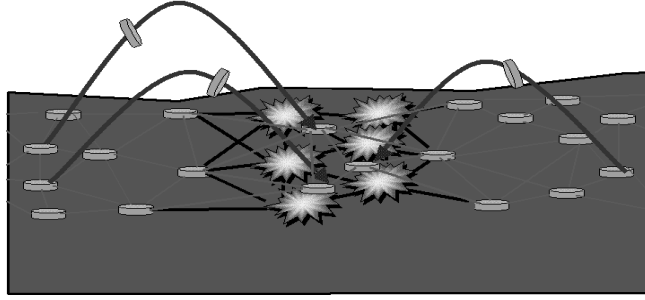
2.8.1. Askeri araçların izlenmesi uygulaması

KAA'lar askeri araçların (örneğin tanklar) seyir güzergâhlarını izlemek amacıyla da kullanılmaktadır [35]. İnsansız uçaklar tarafından dağıtılan [16] düğümler fark edilemeyecek ve yok edilemeyecek şekilde güvenli olarak tasarlanmaktadır. Araç geçişlerini sezmeleri/tespit etmeleri için düğümlere manyetometre algılayıcılar eklenmiştir. Algılayıcı düğümler araçların tahmini yollarını ve hızlarını kestirmek için ortak bir çalışma sergilemektedirler. İzleme sonuçları ile ilgili raporlar belirli zaman aralıklarıyla güvenli bir şekilde merkeze aktarılmakta ya da o alanda seyir halindeki insansız uçaklara gönderilmektedir [16].

2.8.2. Kendilerini tekrar yapılandıran mayın tarlası uygulaması

Özellikle sınır bölgelerinde, tanksavar olarak kullanılan mayınlı araziler bulunmaktadır. Düşman unsurlar bu alandaki mayınları bir şekilde imha ederek, sınır ihlalinde bulunabilirler. Böyle durumlara karşı, korunması gereken alanın güvenliğinden emin olmak için, KAA'lar kullanılmaktadır. Mayınlara algılayıcı düğümler yerleştirilerek, bir kablosuz mayın ağı oluşturulabilmekte [36] ve devre dışı kalan mayınların tespit edilmesi için radyo bağlantı kalitesi izlenebilmektedir.

Ağda herhangi bir ihlal sezildiğinde, zarar görmemiş mayınlar özel zıplama üniteleriyle mayınların devre dışı bırakıldığı bölgelere geçerek, yeni bir mayın ağı kurabilirler.



Şekil 2.9 : İhlal sezilen bölgenin yeniden organizasyonu [37]

2.8.3. Büyük ördek adasındaki kuş gözlemeleme uygulaması

Amerika Birleşik Devletlerinin Maina eyaletine bağlı Büyük Ördek Adası'nda (Great Duck Island) fırtına kuşu olarak adlandırılan küçük kuşların yavrulama davranışlarını incelemek amacıyla KAA kullanılmaktadır [38]. Yuvaların içlerine ve yüzeylerine nem, basınç, sıcaklık ve ortamın ışık seviyesini ölçen algılayıcı düğümler yerleştirilmiştir. Ayrıca, algılayıcılardan belirli periyotlarla alınan örneklerin merkez istasyona aktarılmasını sağlayan, uzun mesafeli doğrusal antene sahip düğümler bulunmaktadır. Merkez istasyondaki bilgisayar ise, uydu bağlantısıyla uzaktaki bir veri tabanına bağlanmaktadır.

2.8.4. Tarım izleme uygulaması

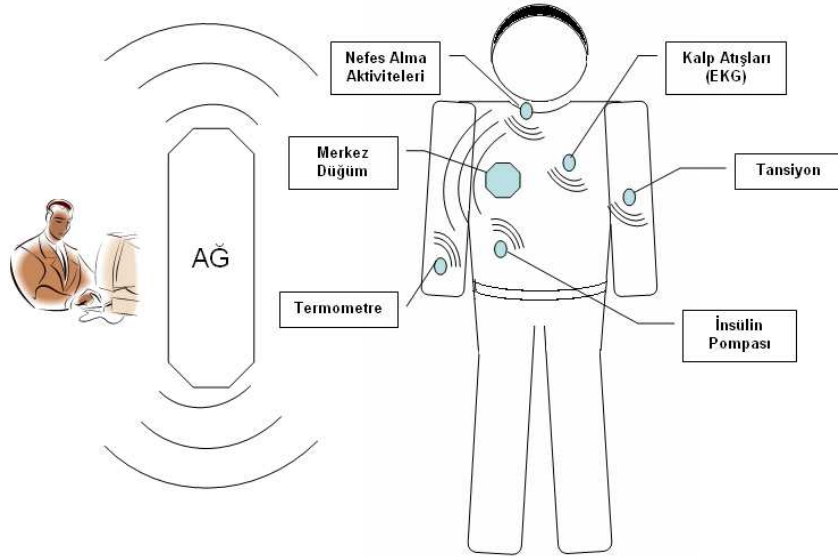
ABD'nin Oregon eyaletindeki büyük bir üzüm bağında ürünlerin yetişmesini etkileyen koşulların (örneğin, sıcaklık, toprağın nemi, ışık ve rutubet vs.) incelenmesi amacıyla KAA'lar kullanılmaktadır [39]. KAA kullanılırken, hassas hasat dönem takibi, hassas bitki bakımı, donma koruması, böcek ve mantar oluşumunun önceden kestirilebilmesi ve yeni tarımsal modellerin geliştirmesi amaçlanmaktadır. Algılayıcı düğümler bağın içerisinde 20 metrelik düzenli ızgara parçaları halinde dağıtılmıştır.

Düğümler birbirleri üzerinden haberleşirler ve verilerin görüntülenmesi ve kaydedilmesi için, KAA bir ağ geçidiyle merkez istasyona bağlanmaktadır.

2.8.5. Yaşamsal işaret izleme uygulaması

KAA'lar, hastanelerin çevresindeki yada dışındaki hastaların yaşamsal işaretlerinin izlenmesinde kullanılmaktadır [40]. Şekil 2.10'da örnek bir yaşam işaret uygulama örneği görülmektedir. Sistem bir hasta tanımlayıcı, medikal algılayıcılar, bir gösterge ve bir düzen kumandası olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır. Hasta tanımlayıcı, hastanın verilerini (ismi ya da özel bir kod) içeren ve hastaneye girdiğinde üzerine eklenen özel bir algılayıcı düğümdür.

Medikal algılayıcılar, elektrokardiyogram, termometre vb. gibi bazı özel işlevlere sahip düğümlerdir. Gösterge, merkezi düğüm üzerinde bulunan ve hastaya ait verilerin izlendiği paneldir. Düzen kumandası ise merkezi düğüm ile diğer düğümlerin arasındaki ilişkilerin kurulmasını sağlar. Merkez düğüm ile ilişkilendirilen algılayıcılar, hastaya ait verileri ve/veya yaşamsal işaretleri bu düğüm üzerinden bir merkez istasyona ulaştırmaktadır.



Şekil 2.10 : KAA için yaşamsal işaret izleme uygulaması tasarısı

2.9. Sonuç

Son yıllarda Mikro-Elektro-Mekanik-Sistemler (MEMS) ve kablosuz haberleşme teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, küçük boyutlarda, düşük-güçlü, düşük-maliyetli, çok küçük bir yapı içerisinde, algılama, işlem ve haberleşme işlevlerini yerine getiren algılayıcı birimlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu çok fonksiyonlu düğümler, bir coğrafi alan içerisine uygun bir şekilde dağıtılarak KAA yapısını oluştururlar. KAA'lar, tam bir kablosuz ağ yapısı içerirler. Bu ağ özelliği sisteme, tek yönlü bir iletişimden farklı olarak, etkileşime dayalı bilgi akışına yönelik işlevler katmaktadır. KAA'lar, ilk yıllarda sadece askeri amaçlı, savaş alanlarının gizlice izlenmesinde kullanılırken, günümüzde birçok alanda kullanılmakta ve giderek geliştirmektedir.

KAA kullanım alanlarının günden güne artması, gerçekleştirilecek uygulamaların test edilmesini, yeterliliklerinin değerlendirilmesini ve gerekli düzeltmelerin/iyileştirmelerin yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu amaçla sistem başarımının test edilebileceği ve değerlendirilebileceği modelleme teknikleri geliştirilmiştir.

3. HABERLEŞME AĞLARININ ANALİTİK MODELLENMESİ

3.1. Giriş

Haberleşme ağları uygulanmadan önce, çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak ağ tanımlanmakta ve bu Şekilde ağın doğruluğu ve başarımını test edilmektedir.

KAA'ların başarımını etkileyen birçok faktör bulunduğundan, verimlerini artıracak yöntem ve tekniklerin geliőtirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilen yöntem ve tekniklerin modellenmesi, uygulamalarına dair verilerin daha ucuz ve kolay elde edilmesini sağlamaktadır.

Haberleşme ağlarının modellenmesinde üç temel yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem, çalışılan tasarımla ilgili var olan bir sistemden faydalanılması yada bir ilk örneğinin (prototip) oluşturulmasıdır. Bu yöntemde, tasarlanan sisteme ait bütün özellikleri taşıyan küçük, gerçek zamanlı bir model oluőturulduđundan, gerçeleőtirilmesi oldukça zordur ve çok fazla zaman almaktadır. İkinci yöntem olan benzetim tekniğinde, sistemdeki aktiviteler ve ortam koşulları taklit edilmektedir. Benzetim ortamlarının yüksek maliyetli ve karmaşık olması, benzetim sürelerinin uzunluğu bu tekniğin kullanımını sınırlandırmaktadır. Son olarak, analitik modelleme, bir bilgisayar ağ sistemindeki farklı bileşenlerin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Karmaşık haberleşme sistemlerini analitik olarak modellemek oldukça zordur. Bununla birlikte, diğer modelleme yöntemleri/teknikleri ile elde edilen sonuçların doğrulanmasında geçerli değerlendirme özellikleri sunan, düşük maliyetli bir yöntem olması bu tekniğin üstünlükleri arasındadır.

Tez çalışmasında, KAA başarım değerlendirmesinde analitik modelleme yöntemi kullanılmıştır.

3.2. Haberleşme Ağlarını Modelleme Yöntemleri

Geniş çaplı ve karmaşık haberleşme ağlarında, esnek tasarım, doğal koşullar ve kullanılan cihazların donanımsal özellikleri gibi, sistem başarımını etkileyen bir çok değişken bulunmaktadır. Sistem daha tasarım aşamasındayken, bu değişkenlere bağlı olarak ortaya çıkabilecek problemlerin kestirilebilmesiyle yüksek maliyetlerin ve zaman kayıplarının önüne geçilebilir.

Daha önce bahsedildiği gibi, haberleşme ağlarının modellenmesinde üç temel yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem, çalışılan tasarımla ilgili var olan bir sistemden faydalanılması yada bir ilk örneğinin (prototip) oluşturulmasıdır. İlk örnek yönteminde, tasarlanan sisteme ait bütün özellikleri taşıyan küçük, gerçek zamanlı bir model oluşturulmaktadır. Elde edilen sonuçlar gerçek verilerden olduğundan sistem hakkında da doğru kestirimler yapılabilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemin ciddi zorlukları ve imkansızlıkları olabileceği gibi, oldukça fazla zaman da alabilmektedir. Ayrıca, her uygulama için uygun değildir ve çoğu zaman tercih edilemeyecek kadar maliyetli bir yöntemdir.

İkincisi, benzetim yöntemidir. Benzetimle ilgili, ticari olarak birçok bilgisayar destekli paket program bulunmaktadır. Bunun yanında, tasarımcının kendisi de bir benzetim programı veya tekniği geliştirebilmektedir. Benzetim, bir sistemdeki bütün işlemlerin açıkça sunulduğu ve uygulandığı bir yöntemdir. Sistemdeki aktiviteler ve ortam koşulları taklit edilerek gerçekleştirilmektedir. Karmaşıklığı azaltmak için, benzetim süresi veya analizlerin bazıları sınırlandırılabilir. Kuyruk davranışlarının kolay modellenemediği karmaşık ağ yapılarının modellenmesinde sıkça başvurulan bir yöntemdir. Bununla birlikte, oluşturulması zordur ve benzetim süresi uygulamaya bağlı olarak uzun zaman alabilmektedir.

Üçüncüsü analitik modelleme yöntemidir. Diğer modelleme yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında/doğrulanmasında oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Alt bölümde ayrıntılı olarak bahsedilmektedir.

3.3. Haberleşme Ağlarının Analitik Modellemesi

Bilgisayar sistemlerinde analitik model genel olarak, sistemdeki geniş çaplı donanım değişikliklerinin ve artan iş yüklerinin sisteme etkilerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler bütünüdür [42]. Analitik model, bir bilgisayar sistemindeki farklı bileşenlerin (iş yükü, donanım kaynakları, CPU vb.) hesaplanan ya da ölçülen birikimleri tanımlar.

Analitik modeller matematik tabanlı işlemlerdir. İş yükü davranışlarının, içeriklerin ve değişimlerin hacmi ile ilgili kaynak gereksinim hesaplarının kestirilmesinde kullanılmaktadır. Çalışma ortamının, donanımsal ve yazılımsal değişikliklerin sistemdeki etkilerini ölçmek için tasarlanabilirler. Aynı zamanda, ağ üzerinden yapılan veri transferleri hesaplanabilir yada tahmin edilebilir. Yapılan yada yapılacak işlerin servis süresi, sistemde bulunan çeşitli aygıtların yoğunluğundan dolayı her bir işin ne kadar bekletileceği hakkında da kestirimler yapılabilir. Örneğin; kuyruk teorisi matematiksel olarak servis zamanının hesaplanmasında kullanılır. Bazı tasarımcılar ve kullanıcılar analitik modelleri yalnızca sistemin aktiviteleri konusunda bilgi sahibi olmak, başarımını ölçmek; iş yüklerinin ve sistemdeki donanımların davranışlarını analiz etmek için de kullanabilirler [42].

Analitik modeller, bir sistemi oluşturan farklı bileşenler üzerinde yapılan belirli değişikliklerin, sistemdeki diğer iş elemanlarının davranışlarına nasıl etki ettiğinin yada bu değişimlere sistemin tepkisinin ne olacağının kestirilmesi için de tasarlanabilir. Giriş değişkenleri hızlı veya yavaş donanımlar; artan, azalan yada bozulan iş yükü varış örnekleri olabilir. Geliştirilen analitik modeller, karmaşık sistemlerin modellenmesinde, işlemleri daha basit bir yapıya indirgemek için, diğer bir alt sistemin girişi olarak da kullanılabilirler [42].

3.4. KAA Bileşenlerinin Analitik Modellemesi

Analitik modeller, sistemleri bütün özellikleriyle temsil eden yapılar olduğundan, muhtemel durumların tamamını kapsamı gerekir. Fakat bir sistemi bütün

bileşenleriyle modellemek karmaşık işlemler gerektirmektedir ve her zaman da mümkün olmayabilir. Karmaşık işlemleri indirgemek için, ilk olarak temel bileşenler/durumlar modellenmelidir. Diğer durum modelleri de bu birime ait parametrelerin işlevleri olarak tanımlanmalıdır. İndirgeme işlemleri uygulamanın niteliğine göre bazı koşulların ihmal edilmesiyle de başarılabilir.

KAA'ların analitik modellemesinde işlem karmaşasını önlemek için ilk olarak temel bileşenler dikkate alınmalıdır. KAA'ların en önemli bileşeni ortama erişim mekanizmasıdır. Üretilen iş, paket gecikmeleri, enerji tüketimi gibi başarımlar ölçütleri OEK modeline ait parametrelerin işlevleri olarak modellenir. Düğümlerin birbirleri üzerinden haberleştikleri KAA'larda, yönlendirme ön plana çıkmaktadır. Yönlendirme protokolü ve bu protokolün sistem başarımları üzerindeki etkileri modellenir. Güvenlik işlemlerinin modellemesinde, hesaplama kaynaklı gecikmeler ve paket boyutlarındaki değişimin haberleşme üzerindeki etkileri dikkate alınır. Sonuç olarak, KAA'ların analitik modelinde üretilen iş, gecikmeler, güç tüketimi ve sistemin hizmet kapasitesine etkileri değerlendirilmektedir.

3.4.1. OEK analitik modellemesi

OEK mekanizmasının analitik modelinde ortama erişim için kullanılan iletişim kuralları, haberleşme kanalının kullanımı ve varsa özel durumlar modellenirler. Bu tez çalışmasında esas alınan IEEE 802.15.4 OEK'te ortama erişim için CSMA/CA iletişim kuralları kullanılmaktadır. Analitik modelinin içinde boşa kalma, veri gönderme, kanalın kullanılabilirliği ile ilgili olasılıklar bulunur. Bu olasılık ifadeleri kullanılarak birim zamanda aktarılan veri miktarı, haberleşme kanalının kullanım oranı ve başarılı bir iletim için gereksinimler hesaplanabilmektedir.

Bazı özel durumlarda gerçek zamanlı işlemlerin başarılması enerji tasarrufundan daha önemlidir. IEEE 802.15.4 OEK gerçek zamanlı uygulamalar için kılavuz etkinleştirilmiş modda GTS (Ayrılmış Zaman Dilimleri) mekanizmasını kullanır [48]. GTS, ağın en yoğun kullanıldığı zamanda bile, tahsis edildiği düğüme en düşük hizmet garantisiyle haberleşme olanağı sağlar.

Bir sistemin analitik modelinin elde edilmesinde bir referans model kullanılmalıdır. KAA'nın temel bileşenleri arasında köprü işlevi gören en önemli birim OEK'dir. Bu sebeple, başlangıçta OEK tabanlı bir referans model tanımlamak işlemleri kolaylaştırabilir. Varsayımlara ya da eldeki verilere dayanarak bu tür bir model elde edilebilmektedir. Referans model sonraki çıkarılacak modellerde giriş elemanı olarak kullanılabilir.

3.4.2. Yönlendirme analitik modellemesi

KAA'larda izleme, veri toplama, birleştirme gibi düğümlerde yapılan işlevler ve bu işlevlerdeki başarımlar oldukça önemlidir. Yapılması gereken diğer bir işlem, algılanan verilerin alıcı ya da merkez istasyona aktarılmasıdır. Bu işlem, ağ topolojisine göre farklılık göstermektedir. Düğümler merkez istasyona doğrudan ya da birbirleri üzerinden ulaşabilmektedir. Yıldız topolojisi kullanılan KAA'larda düğümler merkezle doğrudan haberleştiklerinden, yönlendirme protokollerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak, merkez düğümlerin de kendi aralarında haberleşmesi istenirse, yönlendirme protokollerinin kullanılması gerekir.

Özellikle geniş alana yayılmış düğümlerden oluşan KAA'larda, düğümler merkez istasyon ile birbirleri üzerinden haberleşmek zorundadır. Düğümlerdeki verilerin merkez istasyona aktarılması için, gereken en uygun yol kestiriminin yapılmasında, yönlendirme protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yönlendirme protokolleri ise düğümlerdeki güç tüketimlerini ve gecikmeleri artırmaktadır. Gerçek zamanlı haberleşme gerektiren güvenlik, yangın vs. gibi amaçlar için kullanılan KAA'larda gecikme değerleri çok önemlidir. Çok uzun süre çalışmak üzere tasarlanmış ağlarda ise, güç tüketim miktarları öncelik kazanacaktır. Bu sebeple, yönlendirme analitik modeli çıkarılırken, ilk olarak yönlendirme iletişim kuralları modellenmelidir. Daha sonra, elde edilen bu model kullanılarak, yönlendirmenin üretilen iş, uçtan-uca gecikme ve harcanan enerji üzerindeki etkisi modele dahil edilmelidir.

3.4.3. Enerji analitik modellemesi

KAA'ların yaşam süreleri genel olarak düğümlerin enerji kapasiteleriyle ilişkilidir. Enerji esas alındığında bir KAA'nın yaşam süresi, ağın başlangıcından ilk algılayıcı düğümün devre dışı olmasına (güç kaynağının tükenmesine) kadar olan süredir. Uzun süreli çalışması planlanan KAA'ların başarımlarını değerlendirmesinde ilk olarak yaşam süreleri incelenir. Genel olarak, düğümlerin yaşam sürelerini güç tüketimleri belirlemektedir. Düğümlerdeki güç tüketimi ise, tasarımında kullanılan elektronik devre elemanlarının karakteristik özelliklerine, radyo haberleşme mesafesine, yönlendirme işlemlerine, aktarılacak veri miktarına ve düğümün çalışma zamanına bağlı olarak değişmektedir. Bir düğümün ortalama güç tüketiminin hesaplanabilmesi için; elektronik devre elemanlarındaki, radyo cihazının farklı durumlarındaki ve bu durumlar arası geçişlerdeki tüketimlerin tanımlanmış olması gereklidir [46]. Piyasada hazır olarak kullanıcılara sunulan algılayıcı düğümlerin veri gönderme, veri alma, hazırda bekleme yada uyku durumunda harcadıkları enerji miktarları bireysel güç tüketimleri olarak değerlendirilir ve düğümün katalog bilgileri içerisinde yer almaktadır. Bahsedilen değişkenler kullanılarak, KAA'ların yaşam sürelerinin kestirilebilmesi amacıyla enerji analitik modelleri tanımlanabilir.

Enerji analitik modeli, sabit değerlerden çok sembolik ifadeler içeren bir olasılık hesabıdır. KAA'da kullanılan düğümlere ait bireysel güç tüketimleri analitik modelde yerlerine koyularak, harcanan enerji sayısal olarak hesaplanabilir. Bu şekilde esnek olarak tasarlanmış, genel ve sembolik ifadeler içeren bir analitik model farklı düğümler için kullanılabilir olanağı sunar.

3.4.4. Güvenlik analitik modellemesi

KAA'larda kullanılan güvenlik protokollerinin sistem başarımı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Düğüm içerisindeki güvenlik işlemleri yalnız sistemin gecikme başarımını etkilerken, paketlere sonradan eklenen bitler, kullanılan bant genişliğini ve radyo haberleşmesinin süresini de artırarak, ek bir enerji tüketimi ortaya çıkarmaktadır. Son zamanlarda geliştirilen güvenlik protokolleri, genellikle

paket boyutlarını değiştirmemektedir; fakat verilerin şifrelenmesi veya çözümlenmesi amacıyla kullanılan güvenlik algoritmaları, güvenliksiz gönderime göre daha fazla işlem zamanı gerektirmektedir. İşlem zamanındaki bu artış, paketlerin uçtan-uca gecikme başarımını azaltmaktadır.

Güvenlik işlemlerinin sistem üzerindeki etkilerinin hesaplanmasında güvenlik analitik modeli kullanılabilir. Kullanılan güvenlik protokollerine bağlı olarak harcanan enerji miktarı, işlem zamanının artması sonucu ortaya çıkan gecikmeler ve veri paketleri üzerindeki ek yük oranları modele dahil edilebilir. Paket alımı ya da gönderilmesi esnasında geçen süreler ve harcanan enerji miktarları modellenirken, paket boyutları ve fiziksel ortamın iletim hızı dikkate alınmalıdır. Gönderici ve alıcı düğümdeki güvenlik işlemleri ayrı ayrı hesaba katılmalıdır.

3.5. Sonuç

Bu bölümde, bilgisayar ağlarının modelleme teknikleri hakkında genel bilgiler verilerek, özellikle analitik modelleme tekniği ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca analitik modellemenin diğer tekniklere olan üstünlükleri ve tercih edilme sebepleri de bu bölümde açıklanmıştır.

Bütüncül bir KAA analitik modelinde öncelikli olarak bulunması gereken, ortama erişim kontrol mekanizması, yönlendirme protokolleri, enerji ve güvenlik gibi temel bileşenlere ait hangi özelliklerin modele dahil edilmesi ile ilgili açıklamalar da bu bölümde ifade edilmektedir.

4. ÖRNEK BİR KAA'NIN ANALİTİK MODELLENMESİ

4.1. Giriş

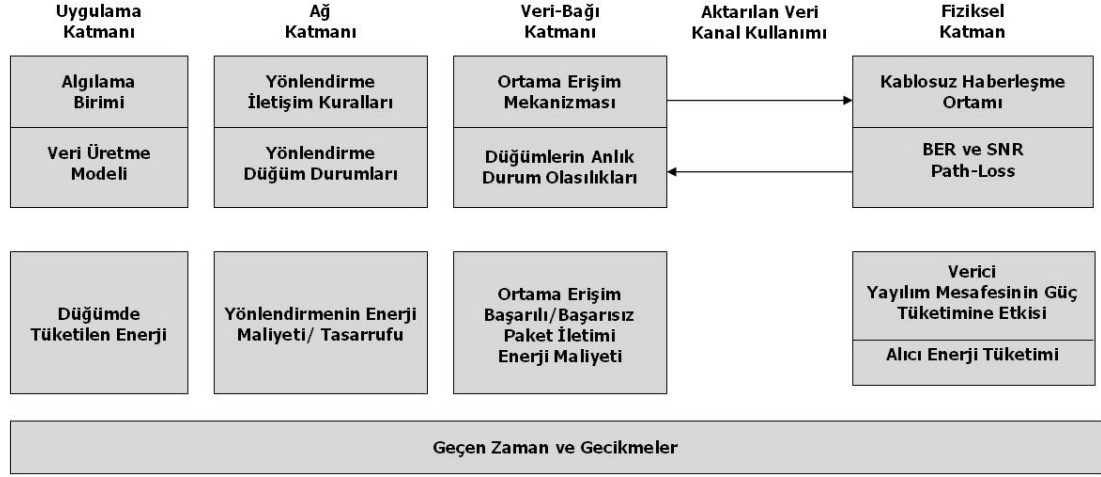
Analitik modeller, bir sistemle ilgili daha önce elde edilen veriler kullanılarak tasarlanabilmesinin yanı sıra, genel olarak, olasılık tabanlı modellerdir. Gerçek hayattaki bir olayı modellerken, rastgele durumların olasılıkları göz önünde bulundurulmalıdır. Genellikle modeller, ilgilendiğimiz büyüklüklerin gelecekteki durumlarını önceden kestirebilmekten ziyade, sistemin doğasında bulunan değişimlerin model tarafından dikkate alınması gerektiği anlamını taşır. Bu bölümde, bir hastanede gözetim altında tutulan sabit konumlu hastaları gerçek zamanlı izlemek üzere tasarlanmış bir KAA'nın analitik modeli çıkarılacaktır.

4.2. Sağlık Alanında Kullanılan Bir KAA'nın Analitik Modellemesi

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bir KAA sistemini tümleşik olarak tanımlayan modele rastlanmamaktadır. Çalışmalar daha çok, ortama erişim kontrolü gibi, uygulamada kritik öneme sahip bölümler üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bu bölümde bir KAA'nın tümleşik analitik modellemesi amaçlanmaktadır. Bazı durumların üzerinde daha yoğun durulurken, bazı koşul ve durumlar ihmal edilmiş ya da varsayımlar yapılmıştır. Genel olarak, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, sistem parçalar halinde ifade edilmiştir. Bulunan alt ifadeler birleştirilerek tümleşik bir analitik model çıkarılmıştır.

Analitik modeller ortama erişim mekanizması (çekişme modelleri), OEK katmanı işlemleri (OEK işlem modelleri) ve düğüm işlemlerini (kullanılan protokollerin sisteme etkisi ve güç tüketimi) içerir. Kullanılan donanım cihazlarından alınan ölçümler bu modellerle birlikte kullanıldığında gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir [47]. Bir KAA'nın analitik modeli içerisinde veri üretiminin, yönlendirmenin, ortama

erişim mekanizmasının, haberleşme ortamının kullanımının ve fiziksel katmana ait özelliklerin modelleri bulunmalı ve bahsedilen her birim için, güç tüketimleri ve ortaya çıkan gecikmeler de modele dahil edilmelidir.



Şekil 4.1 : KAA'nın analitik model içeriğinin blok gösterimi

4.2.1. Ortam erişim kontrol mekanizmasının modellenmesi

OEK analitik modelinde IEEE 802.15.4[48] iletişim kuralları standardı benimsenmiştir. Kablosuz haberleşme ortamı belirli bir anda yalnız bir düğüm tarafından kullanılabilir. Bu nedenle, ortamı kullanmak isteyen düğümler birbirleriyle çekişme halindedir. IEEE 802.15.4 çekişmeli ortama erişim için CSMA/CA mekanizmasını kullanmaktadır. Eş zamanlı başlayan ya da üst üste binen iletişim istekleri çarpışmalara, paket kayıplarına, gecikmelere ve enerji israfına neden olmaktadır. CSMA/CA mekanizması ortama erişim işlemlerinde kabul edilebilir bir başarıya sahipse de tek başına kesin çözüm olamamaktadır. Ortaya çıkabilecek problemleri en aza indirmek için, farklı protokoller geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında modellenen KAA'da, kılavuz etkinleştirilmiş (beacon enabled) dilimli (slotted) CSMA/CA mekanizması kullanılmaktadır.

Çekişme işlemlerini tanımlayan ifadeler “çekişme modelleri” olarak adlandırılabilir. Çekişme modeli aynı zamanda OEK algoritmasının modelidir. Uygulama esnasında algoritmanın kontrolü dışında, çarpışmalar gibi, bazı özel durumlar ortaya

çıkabilmektedir. Gerçeğe daha yakın modellerin elde edilmesi amacıyla, algoritmanın yanı sıra bu özel durumların olasılıkları da modele dahil edilmelidir.

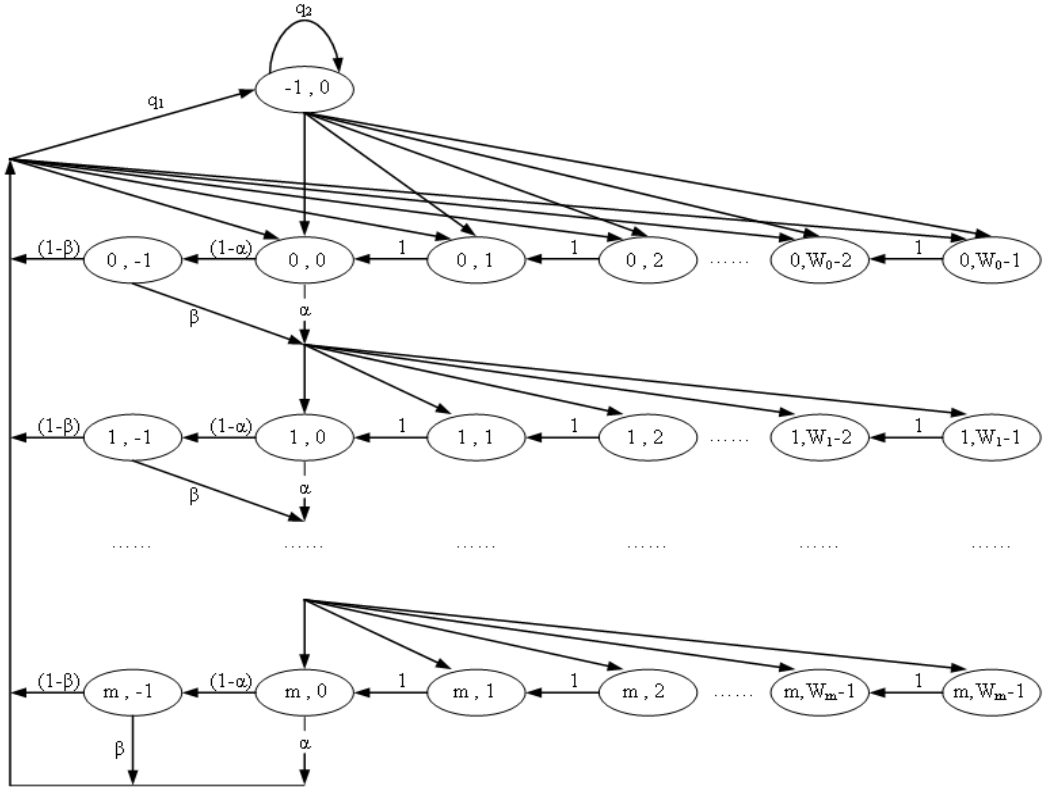
4.2.1.1. CSMA/CA modeli

Kablosuz haberleşme uygulamalarında, haberleşme ortamı aynı zamanda yalnız bir cihaz tarafından kullanılabilirdiğinden ortama erişimde özel yöntemler ve protokoller kullanılır. IEEE 802.15.4 haberleşme standardı, kablosuz algılayıcı ağlarda veri transferi yapılırken, paket çarpışmaları engellemek ve herhangi bir çarpışma durumu sezildiğinde söz konusu gönderimi tekrarlamak için CSMA/CA mekanizması benimsenerek geliştirilmiştir. IEEE 802.15.4 CSMA/CA mekanizması için, Ortama Erişim Deneme Sayısı (NB), Ortam Denetleme Tekrar Sayısı (CW) ve Erteleme Üstel Katsayısıdır (BE) olarak üç önemli parametre vardır.

Dilimli CSMA/CA ortama erişim mekanizmasını kullanan bir cihaz herhangi bir zamanda veri göndermek isterse, ilk olarak haberleşme kanalının kullanılabilir olup olmadığını denetlemelidir. Erteleme üstel katsayısı (BE) 0'dan farklı ise, cihaz, kanalın kullanılabilirlik testinden (CCA) önce rastgele bir erteleme süresi bekler. Bu süre içerisinde enerji tasarrufu için ortam taraması yapılmaz. Erteleme süresi sonunda kanal kullanılabilirlik testi gerçekleştirilir. BE=0 seçilirse, bu özellik kullanılmaz ve CCA işlemleri beklemeden gerçekleştirilir. Kanal boşsa, CW değeri 1 eksiltir (CW'nin varsayılan değeri 2'dir). CW=0 olana kadar CCA işlemi tekrarlanır. CW=0 olduğunda, cihaz veri iletimine başlar. Kanalın herhangi bir CCA işleminde meşgul olduğu tespit edilirse, CW başlangıç değerine döner. Ortama erişim için deneme sayısı (NB – Number of Backoff) başlangıçta 0 değerine sahiptir. Herhangi bir CCA sonucu kanalın meşgul olduğu tespit edilirse, tekrar erişim için rastgele bir erteleme süresi belirlenirken, NB değeri de 1 artırılır. Ortama erişimden önce yine CW sayısınınca CCA işlemi gerçekleştirilir. Kanal boş değilse, aynı işlemler en yüksek NB değerine ulaşıncaya kadar tekrarlanır. NB, varsayılanı 4 olan, sabit bir değere sahiptir. Tekrarlama sayısı bu değeri aştığında veri gönderme işlemi iptal edilir.

Analitik modelleme yapılırken, modellenecek KAA ve kullanılacak düğümlere ait özellikler bilinmelidir. Bu özellikler var olan bir sisteme ait olabileceği gibi, yeni tasarlanan bir KAA için de varsayılmış olabilir. Bu bölümde yapılan işlemlerde, KAA'yı oluşturan düğümlerin her birinin veri alma, veri gönderme, boş ya da uyku durumlarının herhangi birinde olduğu varsayılmıştır. Tekrarlanan CCA işlemlerinde kanalın meşgul olma olasılıkları birbirlerinden bağımsız olarak α ve β ile gösterilmiştir. CSMA/CA mekanizması kullanan düğümlerin iki boyutlu stokastik bir sürece bağlı olan durumları ve bu durumların olasılıkları Şekil 4.2'de ayrık Markov Zinciri kullanılarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.2'deki stokastik süreçler $\{s(t), w(t)\}$ biçiminde iki boyutlu olarak tanımlanmıştır. $s(t)$ ifadesi $(0, m)$ aralığında değerler almaktadır. Özel olarak, düğümde gönderilmek üzere herhangi bir verinin bulunmadığı durum $s(t) = -1$ şeklinde ifade edilmiştir. Şekil 4.2'deki tek-adım iletim olasılıkları aşağıda ifade edilmiştir.



Şekil 4.2 : CSMA/CA 2-Boyutlu Ayrık Markov Zinciri [11]

Şekil 4.2'deki stokastik süreçler $\{s(t), w(t)\}$ biçiminde iki boyutlu olarak tanımlanmıştır. $s(t)$ ifadesi $(0, m)$ aralığında değerler almaktadır. Düğümde gönderilmek üzere herhangi bir verinin bulunmadığı durum $s(t) = -1$ şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 4.2'deki tek-adım iletim olasılıkları aşağıda belirtilmektedir.

$$\{s(t), w(t)\} = \begin{cases} p\{i, k | i, k + 1\} = 1, i \in (0, m), k \in (0, W_i - 2) \\ p\{i, k | i - 1, 0\} = \alpha / W_i, i \in (1, m), k \in (0, W_i - 1) \\ p\{i, k | i - 1, -1\} = \beta / W_i, i \in (1, m), k \in (0, W_i - 1) \\ p\{i, -1 | i, 0\} = 1 - \alpha, i \in (0, m) \\ p\{0, k | i, -1\} = (1 - \beta)(1 - q_1) / W_0, i \in (0, m - 1), k \in (0, W_0 - 1) \\ p\{0, k | m, 0\} = \alpha(1 - q_1) / W_0, k \in (0, W_0 - 1) \\ p\{0, k | -1, 0\} = (1 - q_2) / W_0, k \in (0, W_0 - 1) \\ p\{0, k | m, -1\} = (1 - q_1) / W_0, k \in (0, W_0 - 1) \\ p\{-1, 0 | i, -1\} = q_1(1 - \beta), i \in (0, m - 1) \\ p\{-1, 0 | m, 0\} = \alpha q_1 \\ p\{-1, 0 | m, -1\} = q_1 \\ p\{-1, 0 | -1, 0\} = q_2 \end{cases} \quad [11] \quad (4.1)$$

(4.1)'deki tek-adım iletim olasılıkları aşağıda açıklanmıştır:

$p\{i, k | i, k + 1\} = 1$: Erteleme sayacı her birim erteleme süresi sonunda 1 azalır.

$p\{i, k | i - 1, 0\} = \alpha / W_i$: CCA₁ işleminde kanalın meşgul olması durumunda NB değeri 1 artırılır ve $(0, W_i)$ aralığında yeni bir erteleme sayısı seçilir.

$p\{i, k | i - 1, -1\} = \beta / W_i$: CCA₂ işleminde kanalın meşgul olması durumunda NB değeri 1 artırılır ve $(0, W_i)$ aralığında yeni bir erteleme sayısı seçilir.

$p\{i, -1 | i, 0\} = 1 - \alpha$: CCA₁ işleminde kanalın boş olması durumunda CCA₂ işlem süreci başlar.

$p\{0, k | i, -1\} = (1 - \beta)(1 - q_1) / W_0$: Başarılı gönderme işleminden sonra gönderilmek üzere bekleyen yeni bir verinin gönderim süreci başlar.

$p\{0, k | m, 0\} = \alpha(1 - q_1) / W_0$: NB değeri en yüksek değere ulaştığından verinin gönderilme işlemi iptal edilmiştir. Gönderilmek üzere bekleyen bir sonraki veri için yeni bir süreç başlar.

$p\{0, k | -1, 0\} = (1 - q_2) / W_0$: Boş durumdan veri gönderme işlemine geçilir.

$p\{0, k | m, -1\} = (1 - q_1) / W_0$: NB'nin en yüksek değerini aldığı, son denemedeki başarılı bir gönderimin ardından, bekleyen sonraki verinin gönderilme süreci başlar.

$p\{-1, 0 | i, -1\} = q_1(1 - \beta)$: Başarılı bir gönderimin ardından gönderilecek yeni bir veri olmadığına boş duruma geçilir.

$p\{-1, 0 | m, 0\} = \alpha q_1$: NB değeri en yüksek değere ulaştığından verinin gönderilme işlemi iptal edilmiştir ve gönderilmek üzere bekleyen yeni bir veri yoktur.

$p\{-1, 0 | m, -1\} = q_1$: NB'nin en yüksek değerini aldığı, son denemedeki başarılı bir gönderimin ardından, bekleyen yeni bir veri olmadığına boş duruma geçilir.

$p\{-1, 0 | -1, 0\} = q_2$: Gönderilecek veri olmadığına boş durumda beklenir.

Yukarıdaki ifadeleri kullanarak $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, w(t) = k\}, i \in (0, m), k \in (-1, W_i - 1)$

şeklindeki Markov zincirinin kararlı durum olasılıkları aşağıda yazılmıştır [11].

Gönderilecek verinin olmadığı durum ifade edilirken kullanılan $b_{-1,0}$, yukarıdaki ifadenin dışında kalan özel bir durumdur.

$$b_{i,0} = \alpha(b_{i-1,0}) + \beta(b_{i-1,-1}) \quad (4.2)$$

$$b_{i-1,-1} = (1 - \alpha) \times b_{i-1,0} \quad (4.3)$$

(4.3) denklemi (4.2)'de yerine yazılırsa [11],

$$b_{i,0} = \alpha(b_{i-1,0}) + \beta(1 - \alpha)b_{i-1,0} = b_{i-1,0}[\alpha + \beta(1 - \alpha)] \quad (4.4)$$

(4.4) denkleminden CCA olasılıkları hesaplanırsa [11],

$$\begin{aligned} b_{i,0} &= b_{0,0}[\alpha + \beta(1 - \alpha)]^i \\ b_{i,-1} &= (1 - \alpha)b_{0,0}[\alpha + \beta(1 - \alpha)]^i \end{aligned} \quad (4.5)$$

Markov zinciri kuralına göre [11],

$$\begin{aligned} b_{i,k} &= \frac{W_i - k}{W_i} b_{0,0} \\ b_{-1,0} &= \frac{q_1}{1 - q_2} b_{0,0} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Olasılık prensibine bağlı olarak, yukarıda çıkardığımız denklemlerde hesaplanan olasılıklar toplandığında, normal şartlarda, 1 elde edilmelidir.

$$b_{-1,0} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=-1}^{W_i-1} b_{i,k} = 1 \quad (4.7)$$

(4.7) denklemini (4.6) kullanılarak açılırsa,

$$\begin{aligned} b_{0,0} \left(\frac{q_1}{1 - q_2} \right) + \sum_{i=0}^m \left[b_{i,-1} + \sum_{k=0}^{W_i-1} \left(\frac{W_i - k}{W_i} \right) b_{i,0} \right] &= 1 \\ b_{0,0} \left(\frac{q_1}{1 - q_2} \right) + \sum_{i=0}^m \left[b_{i,0} (1 - \alpha) + \sum_{k=0}^{W_i-1} \left(\frac{W_i - k}{W_i} \right) b_{i,0} \right] &= 1 \\ b_{0,0} \left(\frac{q_1}{1 - q_2} \right) + \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left[(1 - \alpha) + \sum_{k=0}^{W_i-1} 1 - \sum_{k=0}^{W_i-1} \left(\frac{k}{W_i} \right) \right] &= 1 \\ b_{0,0} \left(\frac{q_1}{1 - q_2} \right) + \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left[(1 - \alpha) + \left(\frac{2W_i}{2} \right) - \frac{1}{W_i} \left(\frac{(W_i - 1)W_i}{2} \right) \right] &= 1 \\ b_{0,0} \left(\frac{q_1}{1 - q_2} \right) + \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left[(1 - \alpha) + \left(\frac{2W_i - W_i + 1}{2} \right) \right] &= 1 \\ b_{0,0} \left(\frac{q_1}{1 - q_2} \right) + \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left\{ (1 - \alpha) + \left(\frac{W_i + 1}{2} \right) \right\} &= 1 \\ b_{0,0} \left(\frac{q_1}{1 - q_2} \right) + \sum_{i=0}^m \left[b_{0,0} \{ (1 - \alpha)\beta + \alpha \}^i \left\{ (1 - \alpha) + \left(\frac{W_i + 1}{2} \right) \right\} \right] &= 1 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Kılavuz çerçevesinin pil tasarruf biti aktifken $BE = \min(2, macMinBE)$, aktif olmadığında $BE = macMinBE$ olur. $m > aMaxBE - macMinBE \Rightarrow (BE = aMaxBE)$ ve dolayısıyla $W_i = 2^{\min(macMinBE+i, aMaxBE)}$ kullanılarak işlemler yapılır.

$$b_{0,0} \left[\left(\frac{q_1}{1-q_2} \right) + \sum_{i=0}^m \left(\left\{ (1-\alpha) + \left(\frac{2^{\min(\text{macMinBE}+i, \text{aMaxBE})} + 1}{2} \right) \right\} \{(1-\alpha)\beta + \alpha\}^i \right) \right] = 1 \quad (4.9)$$

$$b_{0,0} \left[\left(\frac{q_1}{1-q_2} \right) + \sum_{i=0}^m \left((1-\alpha + 2^{\min(\text{macMinBE}+i, \text{aMaxBE})-1} + 0.5) \{\alpha - \alpha\beta + \beta\}^i \right) \right] = 1$$

(4.9) denklemini basitleştirmek için $\alpha - \alpha\beta + \beta$ yerine p ifadesi kullanılırsa [11],

$$b_{0,0} \left[\left(\frac{q_1}{1-q_2} \right) + \sum_{i=0}^m \left((1-\alpha + 2^{\min(\text{macMinBE}+i, \text{aMaxBE})-1} + 0.5) \{p\}^i \right) \right] = 1$$

$$b_{0,0} \left[\frac{q_1 + (1-q_2) \sum_{i=0}^m \left((1-\alpha + 2^{\min(\text{macMinBE}+i, \text{aMaxBE})-1} + 0.5) \{p\}^i \right)}{(1-q_2)} \right] = 1$$

$$b_{0,0} = \left[\frac{(1-q_2)}{q_1 + (1-q_2) \sum_{i=0}^m \left((1-\alpha + 2^{\min(\text{macMinBE}+i, \text{aMaxBE})-1} + 0.5) \{p\}^i \right)} \right] \quad (4.10)$$

KAA'daki bir düğümün ilk CCA işlemini gerçekleştirme olasılığı [11],

$$\sigma = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \sum_{i=0}^m (p)^i b_{0,0} \quad (4.11)$$

İkinci CCA işlemini gerçekleştirme olasılığı [11],

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,-1} = \sum_{i=0}^m (1-\alpha) b_{i,0} = (1-\alpha) \sum_{i=0}^m b_{i,0} = (1-\alpha) \sigma \quad (4.12)$$

Ancak CCA işlemlerinin ikisinde de ortam boşsa iletim başlayabilir. CSMA/CA iletişim kurallarına göre iletim ortamını aynı zamanda yalnızca bir düğüm kullanabilir. İkinci CCA işleminde kanalın boş olma ya da bir düğümün veri gönderme olasılığı (δ) aşağıdaki gibi olur.

$$\delta = (1-\beta)(1-\alpha) \sum_{i=0}^m \left(p^i \times \left[\frac{(1-q_2)}{q_1 + (1-q_2) \sum_{j=0}^m \left((1-\alpha + 2^{\min(\text{macMinBE}+j, \text{aMaxBE})-1} + 0.5 \right) \{p\}^j \right)} \right] \right) \quad (4.13)$$

CCA₂ işlemi ancak CCA₁ işleminde kanalın boş olması durumunda gerçekleşir; fakat, CCA₁ ve CCA₂ işlemlerinde ortamın meşgul olması olasılıkları, sırasıyla, α ve β birbirlerinden bağımsız ifadelerdir. Bu sebeple, iki işlemde de kanalın meşgul olma olasılıklarının eşit, yani $\alpha = \beta$ olduğu söylenebilir [11]. Yine düğüm boş durumdayken veya başarılı/başarısız bir gönderme isteğinin ardından, gönderilecek yeni bir verinin olup olmama olasılığı aynıdır, yani $q = q_1 = q_2$ 'dir [11].

$$\delta = (1-\alpha)^2 \sum_{i=0}^m \left(p^i \times \left[\frac{(1-q)}{q + (1-q) \sum_{j=0}^m \left((1-\alpha + 2^{\min(\text{macMinBE}+j, \text{aMaxBE})-1} + 0.5 \right) \{p\}^j \right)} \right] \right) \quad (4.14)$$

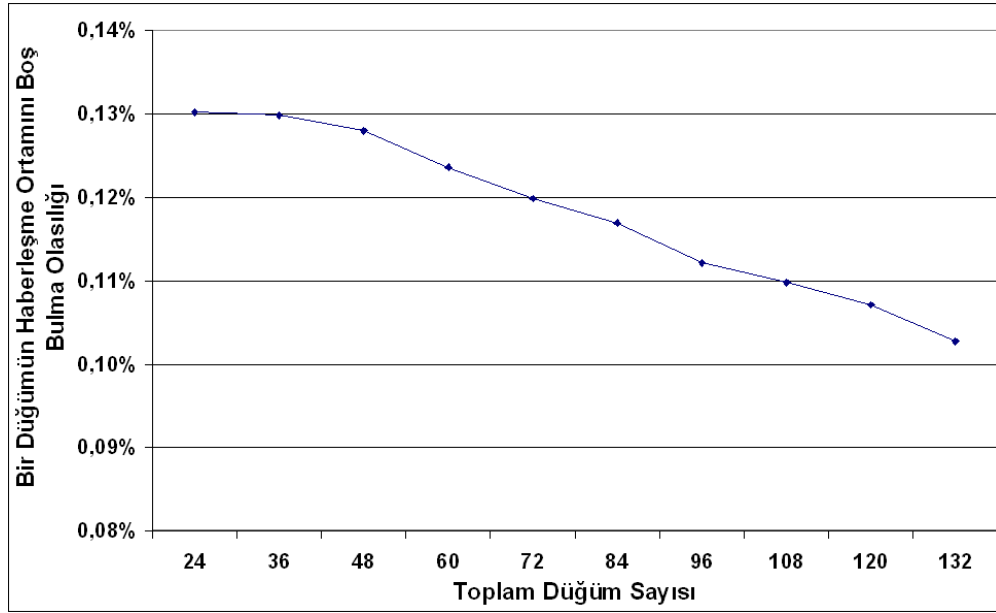
CCA işlemlerinde kanalın meşgul olması, eğer çarpışma söz konusu değilse, haberleşme ortamının ağdaki bir başka düğüm tarafından kullanıldığı anlamına gelir. Buna göre, n düğümlü bir ağda, bir düğümün haberleşme kanalını meşgul bulması olasılığı $\alpha = 1 - (1-\delta)^{n-1}$ olarak ifade edilebilir [11]. (δ) tekrar düzenlenirse,

$$\delta = \sum_{i=0}^m \left(p^i \times \frac{(1-q) \times ((1-\delta)^{n-1})^2}{q + (1-q) \sum_{j=0}^m \left(((1-\delta)^{n-1} + 2^{\min(\text{macMinBE}+j, \text{aMaxBE})-1} + 0.5 \right) \{p\}^j \right)} \right) \quad (4.15)$$

Yukarıdaki denklemde $p = 2a - a^2 = 1 - (1-a)^2$ ve $a = 1 - (1-\delta)^{n-1}$ dönüşümü yapılarak, yeni denklem δ ve q cinsinden (4.16)'da ifade edilmiştir:

$$\delta = \sum_{i=0}^m \left(\frac{(1 - (1-\delta)^{2n-2})^i \times (1-q) \times (1-\delta)^{2n-2}}{q + (1-q) \sum_{j=0}^m \left(((1-\delta)^{n-1} + 2^{\min(\text{macMinBE}+j, \text{aMaxBE})-1} + 0.5) \times (1 - (1-\delta)^{2n-2})^j \right)} \right) \quad (4.16)$$

q ifadesi KAA'daki düğüm sayısına bağlı olarak değişmektedir. (4.16)'da q değeri yerine yazılırsa, sadece δ cinsinden bir ifade elde edilir. Elde edilen (4.16) denklemi öz yineli biçimde çözüldüğünde, farklı düğüm sayılarına göre δ olasılığının değişiminin Şekil 4.3'teki gibi olduğu görülmektedir. KAA'daki toplam düğüm sayısı 24 olduğunda, ağdaki herhangi bir düğümün haberleşme ortamını boş/kullanılabilir bulma olasılığı %0,13 iken, düğüm sayısı 132 olduğunda bu olasılığın %0,1'e kadar düştüğü görülmektedir. Çekişme ortamındaki düğüm sayısının artmasıyla, OEK'nin etkisiyle, bir düğümün haberleşme ortamını boş bulma olasılığı da azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.3 düzgün bir azalma grafiği çizmemektedir. Grafikteki düzensizliğin nedeni, ortama erişimde kullanılan dilimli CSMA/CA mekanizmasının dilimleri verimli kullan(a)mamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.3 : Bir Düğümün Haberleşme Ortamını Boş Bulma Olasılığı

Erteleme işleminde geçen süre yaklaşık olarak, ortalama erteleme zaman dilimi (slot) sayısı hesaplanarak bulunabilir. Rastgele seçilen erteleme sayısının $(0, 2^{BE}-1)$ aralığında herhangi bir değere eşit olma olasılığı $1/2^{BE}$ 'dir. $(0, m)$ aralığındaki herhangi bir deneme basamağı için ortalama erteleme dilim sayısı hesaplanabilir:

$$W_i(ort) = \frac{W_i - 1}{2} = 2^{\min(BE+i, aMaxBE)-1} - 0.5 \quad (4.17)$$

$b_{0,0}$ Markov zinciri üzerindeki referans noktamız olacaktır. $i = (1,2,\dots,m)$ için, düğümün herhangi bir basamakta bulunma olasılıklarının toplamı:

$$\sum_{i=0}^{i=m} (b_{0,0} \times p^i) \quad (4.18)$$

Hesaplamaların kolaylaştırılması için, erteleme basamak sayısının ortalama değeri hesaplanırken, düğümün boşa kalma ile erteleme süreci ayrı değerlendirilmiştir, $i = (1,2,\dots,m)$ olmak üzere, erteleme basamak olasılıklarının toplamı “1” olacak şekilde genişletme yapılmıştır:

$$\frac{1}{\sum_{i=0}^{i=m} (b_{0,0} \times p^i)} \quad (4.19)$$

(4.19)'daki formülden elde edilen sonuç ile her bir basamak olasılığı çarpılarak, sadece buradaki işlemler için, elde edilen yeni olasılık değerlerinin toplamı 1 olur:

$$\sum_{i=0}^{i=m} \frac{1}{\sum_{j=0}^{j=m} (b_{0,0} \times p^j)} \times b_{0,0} \times p^i = 1 \quad (4.20)$$

Örnek olarak, bir düğümün 0. basamakta olmasının ya da gönderilecek veri için başka bir yeniden deneme basamağına ihtiyaç duymamasının olasılığı $b_{0,0}$ iken, yeni olasılık değeri:

$$b_{0,0} \times \frac{1}{\sum_{i=0}^{i=m} (b_{0,0} \times p^i)} \quad (4.21)$$

Elde edilen formüller kullanılarak, ortalama erteleme basamak sayısı (s_{deneme}) ve ortalama erteleme dilim sayısı (s_{ert_dilim}) hesaplanabilir.

$$s_{deneme} = \sum_{i=0}^{i=m} i \times b_{0,0} \times \frac{1}{\sum_{i=0}^{i=m} (b_{0,0} \times p^i)} \times p^i \quad (4.22)$$

$$s_{ert_dilim} = \sum_{i=0}^{i=m} b_{0,0} \times \frac{1}{\sum_{j=0}^{j=m} (b_{0,0} \times p^j)} \times p^i \times \frac{2^{\min(BE+i, aMaxBE)} - 1}{2} \quad (4.23)$$

Bir düğümün kanal kullanılabilirlik (CCA_1 ve CCA_2) testlerinden önce erteleme işleminde geçireceği ortalama süre (t_{ert}), R ortamın saniyedeki bit iletim hızı olmak üzere, ortalama erteleme dilim sayısı ile bir dilimin süresi çarpılarak bulunur.

$$t_{ert} = s_{ert_dilim} \times \frac{80}{R} \quad (4.24)$$

Erteleme süreci, sonraki işlemlerde kolaylık olması için, erteleme ve kanal kullanılabilirlik (CCA) işlemleri olarak iki parça şeklinde ele alınmıştır. Çünkü, erteleme işlemleri boyunca radyo aktif değilken, CCA işlemleri sırasında, yani ortam kontrolü yapılırken radyo kullanılmaktadır. Haberleşme ortamı kullanılmadan önce en az bir, en fazla iki kez CCA işlemi tekrarlanır. Başarılı bir iletim için iki kez tekrarlanmış olması gerekir. Erteleme işlemlerinde harcanan toplam ortalama zaman (t_{ert_topl}), erteleme ve CCA işlemlerinde geçen sürelerin toplamıdır [47].

$$t_{CCA_topl} = t_{HA} + 2 \times t_{CCA} \quad (\text{Başarılı İletimde}) \quad (4.25)$$

$$t_{CCA_topl} = t_{HA} + \frac{3}{2} \times t_{CCA} \quad (\text{Başarısız İletimde}) \quad (4.26)$$

Formüllerde kullanılan t_{HA}, t_{CCA} zaman ifadeleri kullanılan iletişim kurallarına ve radyo cihazına bağlı olarak farklılık gösterir. Kullanılan cihazın katalog bilgilerine bakılarak bulunabilir.

$$t_{CCA_topl} = t_{HA} + 2 \times t_{CCA} \quad (4.27)$$

4.2.1.2. Çarpışma olasılığı

Ortama erişim mekanizmaları adaletli ve çarpışmasız bir haberleşme imkanı sunmak için tasarlanırlar. Fakat, kullandıkları algoritmaların doğasından kaynaklanan ve başarımı yakından etkileyen bazı zayıf noktaları olabilmektedir. Bunların en önemlisi çarpışmalara tam olarak dayanıklı olmamalarıdır. Algoritma kaynaklı çarpışma olasılıklarını indirmek için BE için büyük değerler seçilebilir; fakat bu işlem, sistemin gecikme başarımını azaltacağından, çoğu KAA uygulamaları için elverişli bir çözüm olmamaktadır.

Düğüm haberleşme işlemlerine geçmeden, rastgele bir erteleme süresi bekler ve bu sürenin sonunda ortamdaki trafiği kontrol ederler. Ortam boşsa, iletim işlemine başlarlar. Fakat, burada üç durumdan dolayı problemle karşılaşmak mümkündür:

Birinci problem, aynı anda paket üreten, iki veya daha fazla düğümün rastgele seçtikleri erteleme sürelerinin de eşit olması durumudur. Erteleme süresi sonunda pasif bir tarama yapıldığından, her ikisi de ortamın boş olduğunu tespit edecektir. Aynı anda başlattıkları iletim işlemleri gönderilen paketlerin çarpışması ile sonuçlanacaktır. Bu çarpışmanın olasılığı, iki düğümün de paket üretim zamanı ile seçtikleri erteleme sayılarının aynı olma olasılığı modellenerek hesaplanabilir. Bununla birlikte, çarpışma olasılığı başka bir yöntemle de modellenebilir:

d aşama derecesi olmak üzere, N_d düğümden oluşan bir ağdaki çarpışma olasılığı, daha önce hesaplanan, δ ve N_d cinsinden ifade edilebilir. CCA işlemlerinin sonunda bir düğümün haberleşme kanalını boş bulma olasılığı δ ile gösterilmiştir. δ aynı zamanda düğümün haberleşme ortamını kullanma yarışını kazanma olasılığı olarak değerlendirilebilir. δ bir düğümün ortamda bulunma olasılığı değildir; fakat ortamda bulunma olasılığı δ olasılığına bağlıdır.

Bir düğümün haberleşme ortamını kullanmama olasılığı $(1 - \delta)$ şeklinde ifade edilir. N_d düğümden oluşan bir KAA için, herhangi bir t anında ortamın hiçbir düğüm tarafından kullanılmama olasılığı $(1 - \delta)^{N_d}$ 'dir. Bu durumda kanalın meşgul olması

ya da ortamda en az bir düğümün bulunması olasılığı $1 - (1 - \delta)^{N_d}$ 'dir. Kanalın yalnız bir düğüm tarafından kullanılma olasılığı $N_d \times \delta \times (1 - \delta)^{N_d - 1}$ 'dir. Kanalın hiçbir düğüm tarafından kullanılmama ve sadece bir düğüm tarafından kullanılma olasılıklarının dışında kalan diğer olasılıklar, haberleşme ortamının aynı zamanda 1'den fazla düğüm tarafından kullanıldığı, çarpışma durumlarının olasılıklarıdır. Verilen bilgilere göre çarpışma olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilir:

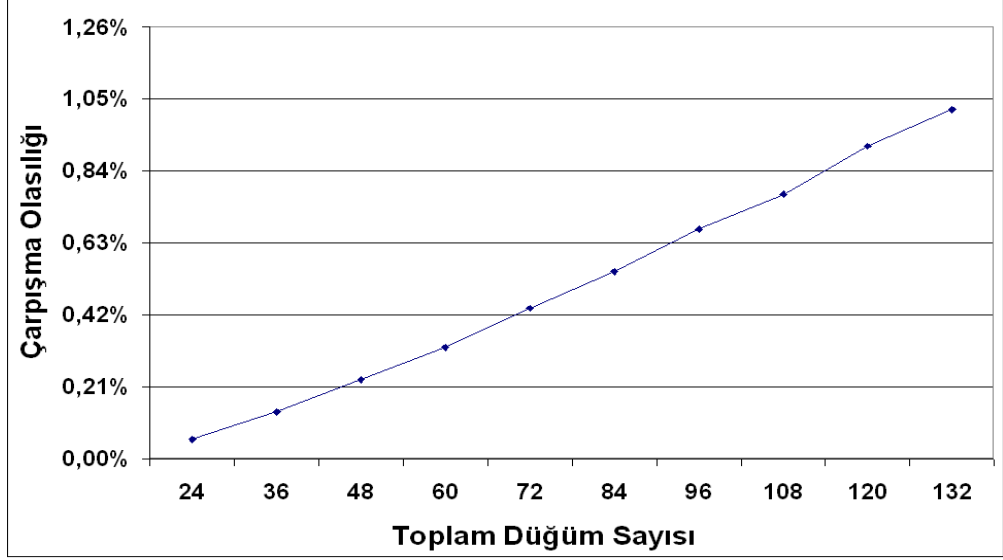
$$c_d = 1 - N_d \times \delta \times (1 - \delta)^{N_d - 1} - (1 - \delta)^{N_d} \quad (4.28)$$

KAA'daki düğüm sayısının artması iletim istek sayısının da artması anlamına gelmektedir. Ortamı kullanma isteğinin artması, birden fazla düğümün aynı erteleme dilim sayısını seçerek, aynı zamanda iletme başlama olasılığını da teorik olarak artırmaktadır. Şekil 4.4'teki grafikte, toplam düğüm sayısının artmasıyla, haberleşme ortamındaki çarpışma olasılığının da arttığı; 24 düğümlü bir KAA'da çarpışma olasılığı %0,1'den daha az iken, ağdaki düğüm sayısı 132 olduğu durumda bu olasılığın %1'in üzerine çıktığı görülmektedir.

İkinci durum ortamın boş olduğunun zannedilmesi noktasında birinci durumla benzerlik göstermektedir. Haberleşme ortamına bırakılan veriler belirli bir yayılım gecikmesine maruz kalırlar. Ortamda henüz bir veri varken, iletim için ortamı kontrol eden diğer bir düğüm, işaretler ona ulaşmadığı için, ortamın boş olduğu yanılgısına düşebilmektedir. Ortamın boş olduğunu düşünen düğüm çarpışmaya sebep olacaktır. Bu durum kısa mesafeli radyolara sahip KAA düğümleri için ihmal edilebilir.

Üçüncü sorun, iletme başlayacak bir düğümün haberleşme ortamını kullanan diğer bir düğümü algılayamamasıdır (hidden-node). Bu durum haberleşme ortamını kullanacak en az iki düğümden birinin, herhangi bir sebeple diğer düğümün radyo kapsama alanının dışında kalmasıyla ortaya çıkabilir. Bu algılama sorununun sebebi, düğümlerin birbirlerinden çok uzak, radyo haberleşme mesafelerinin kısa olmasıyla ya da arada engelleyici bir takım unsurların bulunmasıyla meydana gelebilir. Modellenen KAA için ortamda haberleşmeyi olumsuz etkileyecek unsurların

bulunmadığı ve düğümler arası mesafelerin uzak olmadığı varsayılmıştır. Bu sebeple, son durumların ortaya çıkma olasılığı çok düşük olduğundan, ihmal edilmiştir.



Şekil 4.4 : Ortamdaki Çarpışma Olasılığının Değişimi

4.2.1.3. Ortama erişim işlev modelleri

OEK işlev modelleri veri, ACK (onay bilgisi), kılavuz çerçeve paketlerinin alım ve gönderim işlemlerine ait süreçlerin tanımlanması için kullanılır [47]. Örneğin; veri gönderme süreci, gönderim işlemi esnasında gerçekleşen işlemlerin süreleri hesaba katılarak modellenir.

Bir düğüm veri göndereceği zaman uyku durumundan boş duruma (t_{UH}) geçer. Kablosuz ortama erişimden önce rastgele bir erteleme süresi (t_{ert_topl}) bekler ve bu sürenin sonunda ortamın boş olduğu kanısına varırsa, radyosunu gönderme durumuna (t_{AG}) geçirir. R ortamın veri aktarım hızı ve L paket boyutu olmak üzere veri paketi L/R süresinde kablosuz ortamda aktarılır. Bu veriler birleştirildiğinde, veri gönderme süreci aşağıdaki gibi modellenir [47]:

$$t_{TX_BYTE} = t_{UH} + t_{ert_topl} + t_{AG} + \frac{L}{R} \quad (4.29)$$

ACK (onay) bilgisi talebinde bulunulmuşsa, gönderilen veri paketinin ardından ACK alımı için radyo gönderme durumundan alma durumuna geçilir. Radyo t_{ACK_bekle} süresince alım için aktif şekilde bekler. Analitik modellerde ortalama değerler tercih edildiğinden, t_{ACK_bekle} süresinin ortalama değeri kullanılmalıdır. Bu süre içerisinde ACK gelirse, L_{ACK}/R sürede alınır. Ardından verilerin işlenmesi için bir süre (t_{SIFS}) beklenir. ACK talep edilerek gönderilen bir veri paketinin ardından onay bilgisinin alım süreci aşağıdaki gibi modellenir [47]:

$$t_{RX_ACK} = t_{GA} + \frac{t_{ACK_bekle}}{2} + \frac{L_{ACK}}{R} + t_{SIFS} \quad (4.30)$$

Düğümün ya da küme liderlerinin merkez istasyondan gelen ve komut bilgisi içeren verileri alma işlemi 802.15.4 için aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Düğüm alması gereken bir veri olduğu bilgisini alır. Boş kaldığında bu veriyi almak üzere küme lideri ya da koordinatörüne bir talep verisi gönderir. Koordinatör ise karşılık olarak ACK (onay bilgisi) ve ardından veri paketini gönderir. Veri alma işlemi modelinde düğüm tarafından koordinatöre yapılan veri talebi de dikkate alınmıştır. Bu sebeple, koordinatörden gelecek cevap için bekleme süresi ve erteleme süresinin ortalama değeri eklenmiştir. Veri alma işlemi tamamlandığında paketin işlenmesi için bir süre (t_{LIFS}) beklenir [47].

$$t_{RX} = t_{HATA} + \frac{t_{CVP_bekle} + t_{ert_iplm}}{2} + \frac{L}{R} + t_{LIFS} \quad (4.31)$$

Veri alma işlemi bittiğinde, radyo alma durumundan gönderme durumuna geçer ve düğüm tarafından koordinatöre ACK (alındı verisi) yollanır. Alınan verinin ardından gönderilecek ACK zaman modeli aşağıdaki gibidir:

$$t_{TX_ACK} = t_{GH} + t_{ert_iplm} + t_{AG} + \frac{L_{ACK}}{R} \quad (4.32)$$

Kılavuz aralığının uzun olması ya da ortamdaki yayılım gecikmesi eş zamanlı çalışma sürecini olumsuz etkilediğinden, eş zamanlı çalışma hataları ortaya çıkmaktadır. Kılavuz alımlarındaki kayıpları engellemek için düğüm alıcı durumuna biraz erken geçmelidir. Bu ek süre (t_{HATA}) olarak modele eklenmiştir. Bununla birlikte, elektronik devrelerin kristal toleransları ($\epsilon_{RX} + \epsilon_{TX}$) da dikkate alınmalıdır. Çünkü, bu değerler az da olsa gecikmeyi olumsuz etkilemektedir. Kılavuz alım ve gönderim işlemleri esnasında geçen zaman modelleri aşağıda verilmiştir [47]:

$$t_{RX_KLVZ} = t_{UH} + t_{HA} + (\epsilon_{RX} + \epsilon_{TX})BI + t_{HATA} + \frac{L_{KLVZ}}{R} + t_{LIFS} \quad (4.33)$$

$$t_{TX_KLVZ} = t_{HG} + \frac{L_{KLVZ}}{R} \quad (4.34)$$

Bir düğümün bağlı olduğu koordinatörüyle olan bağlantısı herhangi bir sebeple kesilirse, kılavuz etkinleştirilmiş ağlarda düğüm pasif bir ağ taraması yapar [47].

$$t_{AT} = t_{HA} + aBaseSuperframeDuration(2^{BO} + 1) \quad (4.35)$$

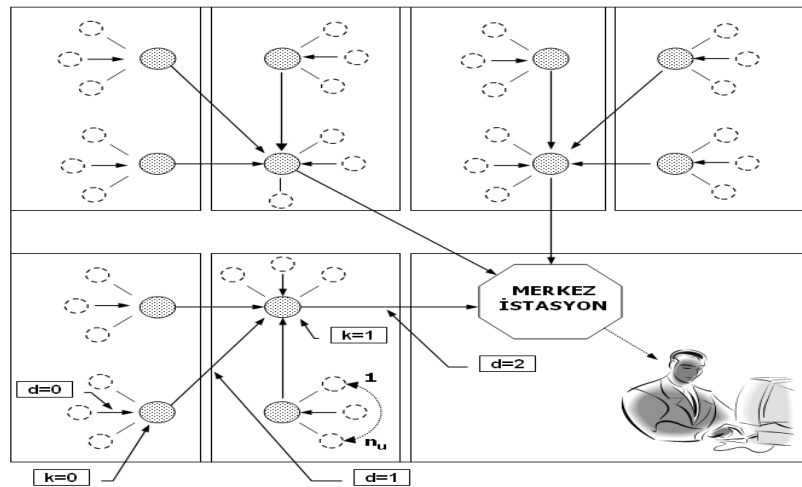
4.2.2. Yönlendirme modeli

Kümelenmiş-ağaç yapılı (cluster-tree) ağ topolojisi kullanılarak, ağda çalışan bir cihaz ve bir koordinatöre ait analitik modellerle bütün önemli çalışma zamanı işlemleri tanımlanabileceğinden [47], KAA yönlendirme analitik modelinde, 802.15.4 OEK özellikleri kullanılarak, kümelenmiş-ağaç yapılı (cluster-tree) ağ topolojisi benimsenmiştir. Bu yönlendirme metodu birçok ağ için uygun ve geliştirilmeye açık esnek bir yapıya sahiptir. Yapılacak bir takım iyileştirmelerle düğümler üzerinden yapılan haberleşme basitleştirilerek enerji tasarrufu da sağlanabilir. Bununla birlikte, bazen bir alt koordinatörün başarısızlığı ağ haberleşmesini önemli derecede aksatabilir.

Modellenen KAA, bir hastanedeki, sabit yada çok az yer değiştirdiği varsayılan hastaların üzerlerine yerleştirilmiş, algılayıcı dđğümlerden oluşmaktadır. Bu sebeple, bir dđğümün bulunduğu ağın dışına çıkması söz konusu değildir.

KAA bir merkez istasyon (PAN Coordinator) ya da ana bilgisayar tarafından yönetilir ve algılanan veriler, odada bulunan hastalardan birine ait koordinatör dđğüm üzerinden merkez istasyona aktarılmaktadır. Merkez istasyona bağlı n_k adet koordinatör, yine bu koordinatörlere bağlı n_k adet de alt-koordinatör dđğüm bulunmaktadır. Koordinatör dđğümler, ağ geçidi özelliklerinin yanı sıra, aynı zamanda n_u adet uç dđğümlü birer küme lideri olduklarından, veri toplama işlevine de sahiptirler. Bu durumda, bir koordinatöre bağlı n_u adet uç dđğüm ve n_k adet koordinatör ya da küme lideri vardır.

Modelde, en uzaktaki bir uç dđğümün merkez istasyona ulaşması için geçmesi gereken küme lideri ya da koordinatör sayısı d (ağ aşama derecesi), dđğümlerden alınan veri paketlerinin boyutları U, κ ve K_d, η_d simgeleriyle temsil edilmektedir. Her uç dđğümün s bayt algılama verisi ürettiği varsayılmıştır. Merkez istasyona doğru ilerleyen yol üzerindeki bazı küme liderleri aynı zamanda koordinatör olarak çalışırlar. Modelleme işlemleri şekil 4.5'teki yönlendirme ağ topolojisi dikkate alınarak yapılmıştır. İlk olarak ağdaki dđğüm sayısı, paket boyutları gibi KAA'ya ait tanımlayıcı modeller elde edilmiştir.



şekil 4.5 : Modellemede Kullanılan Yönlendirme Planı

Her uç düğümün s bayt algılama verisi ürettiği varsayılmıştır. Merkez istasyona doğru ilerleyen yol üzerindeki bazı küme liderleri aynı zamanda koordinatör olarak çalışırlar. Modelleme işlemleri Şekil 4.5'teki yönlendirme ağ topolojisi dikkate alınarak yapılmıştır. İlk olarak ağdaki düğüm sayısı, paket boyutları gibi KAA'ya ait tanımlayıcı modeller elde edilmiştir:

Verilen bilgilere göre ağdaki toplam koordinatör sayısı,

$$k_d = \sum_{i=1}^d n_k^i \quad (4.36)$$

Ağdaki toplam uç düğüm sayısı,

$$u_d = \sum_{i=1}^d n_k^i \times n_u \quad (4.37)$$

Ağdaki toplam düğüm sayısı,

$$N_d = \sum_{i=1}^d n_k^i \times n_u \quad (4.38)$$

Bir uç düğüme ait paket boyutu,

$$U = s + baslik \quad (\text{bayt})$$

$$\kappa = \frac{U - (U \bmod 10)}{10} + 1 \quad (\text{erteleme dilimi}) \quad (4.39)$$

Bir koordinatöre ait paket boyutu,

$$K_d = baslik + (n_u \times s)(n_k + 1)^{d-1} \quad (\text{bayt})$$

$$\eta_d = \frac{K_d - (K_d \bmod 10)}{10} + 1 \quad (\text{erteleme dilimi}) \quad (4.40)$$

Koordinatör düğümlerin ağ üzerindeki yükü,

$$y_d = \sum_{i=1}^d n_k^i \times K_{(d+1-i)} \quad (\text{bayt}) \quad (4.41)$$

$$\pi_d = \sum_{i=1}^d n_k^i \times \eta_{(d+1-i)} \quad (\text{erteleme dilimi})$$

Uç düğümlerin ağ üzerindeki yükü,

$$l_d = U \times \sum_{i=1}^d n_k^i \times n_u \quad (\text{bayt}) \quad (4.42)$$

$$\mu_d = \kappa \times \sum_{i=1}^d n_k^i \times n_u \quad (\text{erteleme dilimi})$$

Ağdaki toplam veri gönderme trafiği,

$$\zeta_d = y_d + l_d \quad (\text{bayt}) \quad (4.43)$$

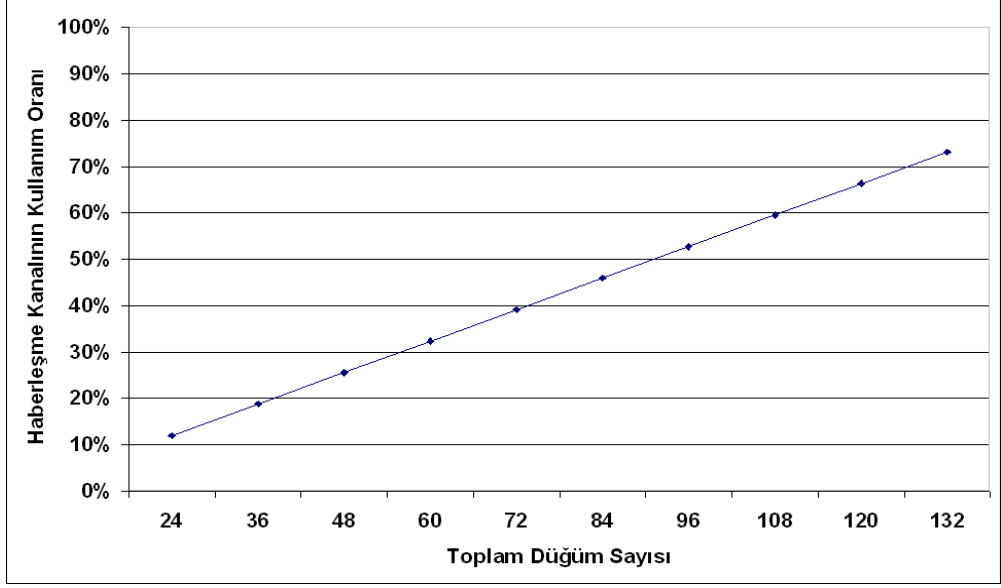
$$\gamma_d = \pi_d + \mu_d \quad (\text{erteleme dilimi})$$

Ortalama gönderilen veri paket boyutu,

$$a_d = \frac{\zeta_d}{N_d} \quad (\text{bayt}) \quad (4.44)$$

$$b_d = \frac{\gamma_d}{N_d} \quad (\text{erteleme dilimi})$$

KAA'ya dahil olan her uç düğümlerle ortamdaki veri trafiği artmaktadır. Ayrıca, modellenen KAA'daki koordinatörler, aldıkları verileri birleştirmediklerinden, aktarılan paket boyutları merkez düğüme yaklaştıkça büyümektedir. Ağa dahil olan her uç düğümler, veri trafiğinin yanı sıra, koordinatörlerdeki paket boyutlarını da artırmaktadır. 24 düğümlü bir KAA'da, ortamdaki (gönderme) veri trafiği kanal kapasitesinin %15'inden daha az iken, düğümler sayısı 132 olduğunda haberleşme trafiğinin %70'in üzerinde olduğu Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6 : Kablosuz Haberleşme Ortamının Kullanılma Oranı

802.15.4'te haberleşme işlemleri süper çerçeve içerisinde gerçekleştirilmektedir. Bu durumda, kullanılacak süper çerçeve KAA'nın ortalama veri gönderme trafiğini karşılayabilecek kapasitede olmalıdır. Uygun kapasite kestirimi yapılırken, çerçeveler arası bekleme ve haberleşme cihazından kaynaklanan durum geçiş süreleri de dikkate alınmalıdır. Ortaya çıkabilecek normal dışı durumlar göz önünde bulundurularak, bir tolerans katsayısı kullanıldığında ($k_{tolerans}$), uygun süper çerçeve seçimi aşağıdaki gibi yapılabilir:

$$SD_{so} = 2^{so} \times 60 \times 16 \times 4 \times \frac{1}{R} \quad (\text{sn}) \quad (4.45)$$

$$k_{tolerans} \times \left[\left(\gamma_d \times \frac{80}{R} \right) + t_{gecis} \right] \leq SD_{so}$$

KAA'daki herhangi bir uç düğümün ya da koordinatörün haberleşme ortamında bulunma olasılığı, ortalama veri paket boyutu ve bir düğümün boş durumda olma olasılığı kullanılarak hesaplanabilir. Markov zincirindeki diğer durum olasılıklarının toplamı, boş kalma durumuna nispeten, çok küçük olduğundan, işlemlerde bir düğümün veri göndermediği durumlar boş olarak kabul edilmiştir. a_d ağıdaki ortalama veri paket boyutu, v_{sc} bir süper çerçevede gönderilen paket sayısı ve

sc_byte süper çerçevenin bayt cinsinden karşılığı olmak üzere, bir düğümün boşa kalma olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$b_{-1,0} = \frac{q}{1-q} b_{0,0} = 1 - v_{sc} \frac{a_d}{sc_byte} \quad (4.46)$$

(4.46)'daki varsayıma bağlı olarak, başarılı/başarısız bir iletimden sonra, bir düğümün gönderilecek yeni bir veri paketine sahip olmama olasılığı (q) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$q = \frac{1 - v_{sc} \times \frac{a_d}{sc_byte}}{b_{0,0} + \left(1 - v_{sc} \times \frac{a_d}{sc_byte}\right)} \quad (4.47)$$

(4.47)'da elde edilen q olasılığı, denklem (4.10)'da yerine yazılırsa,

$$b_{0,0} = \frac{v_{sc} \times a_d}{sc_byte \times \sum_{i=0}^m \left((1 - \alpha + 2^{\min(macMinBE+i, aMaxBE)-1} + 0.5) \{p\}^i \right)} \quad (4.48)$$

Düğümlerin çalışma zamanları düğümlerin bir zaman aralığında aktif olma olasılığını ifade etmektedir. Çalışma zaman modeli, uç düğüm ve koordinatör düğümler için ayrı ayrı tasarlanmalıdır. Bir uç düğümün çalışma zamanı modelinde, kılavuz alım zamanı, veri paket gönderimi ve herhangi bir sebeple düğümün ağ bağlantısının kesilme ihtimali göz önüne alınarak, ağ taraması dikkate alınır. Modellenen KAA'nın, haberleşmesinde alındı/onay bilgisinin kullanılmadığı varsayılarak, çalışma zaman modelinde ACK alım ya da gönderimine yer verilmemiştir. İki kılavuz arasındaki zaman aralığında, bir uç düğümün çalışma zamanı (CZ_{UC}) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$CZ_{UC} = \frac{t_{RX_KLVZ}}{BI} + v_{sc} \times \frac{t_{TX_BYTE}}{BI} + v_{AT} \times \frac{t_{AT}}{BI} \quad (4.49)$$

Koordinatörlerin, uç düğümlerden farklı olarak, kılavuz gönderim işlevleri mevcuttur. Kılavuzlar eş zamanlı ve ortak olarak yayınlandığından, ağ trafik modelinde kılavuz alım zamanının dikkate alınmasına gerek yoktur. Çünkü o esnada başka bir haberleşme söz konusu değildir ve kılavuzlar çekişmesiz olarak iletilirler. Kılavuzlar, alt birimlere, yine alt koordinatör düğümler üzerinden aktarılmaktadır.

Ayrıca koordinatörler, paket kayıplarını önlemek amacıyla, veri gönderme, kılavuz alma, kılavuz gönderme ve ağ tarama işlemlerinden kalan zamanda alıcı durumunda beklerler. Aşağıdaki modelde bu süreç ($SD_{SO} - T_{CAP}$) şeklinde ifade edilmiştir ve bu süre içinde haberleşme ortamı pasif olarak tarandığından, kanal meşgul edilmez, İki kılavuz arasındaki zaman aralığında (BI), bulunduğu kademesine göre bir koordinatör düğümün çalışma zamanı (CZ_{KOOR}) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_{CAP} = t_{RX_KLVZ} + t_{TX_KLVZ} + v_{SC} \times t_{TX_BYTE} + v_{AT} \times t_{AT} \quad (4.50)$$

$$CZ_{KOOR} = \frac{t_{TX_KLVZ}}{BI} + v_{SC} \times \frac{t_{TX_BYTE}}{BI} + v_{AT} \times \frac{t_{AT}}{BI} + \frac{t_{RX_KLVZ}}{BI} + \frac{SD_{SO} - T_{CAP}}{BI}$$

Koordinatörün bütün düğümlerinden gelecek veriler tamamlanana kadar alıcı durumunda beklediği varsayılmıştır. Alım tamamlandığında, topladığı verileri bir üst kademedeki koordinatöre iletmek üzere gönderme işlemine geçer. Gönderme işlemini de bitirdikten sonra diğer süper çerçeve zamanına kadar kapalı durabilir. Fakat modellenen KAA'da, SO ve BO değerlerinin eşit olarak seçildiği varsayılarak, koordinatörlerin sürekli aktif olduğu ön görülmüştür.

4.2.3. Güvenlik etkinleştirilmiş haberleşmenin etkilerinin analitik modeli

KAA'da kullanılan güvenlik algoritmaları yada protokollerine bağlı olarak, harcanan enerji miktarı, protokollerin işletilme zamanı sonucu ortaya çıkan gecikmeler ve veri paketleri üzerindeki ek yük oranları modellenebilir. İşlem zamanı olarak ortaya çıkan gecikmeler veri paketinin uçtan uca gecikme modeline dahil edilir. Paket boyutunu artıran protokoller, işletilme zamanının yanı sıra, fazladan iletim süresi ve

haberleşme için ek güç tüketimi anlamına gelir. TinyOS'un güvenlik protokolü olan TinySec [32], yalnız kimlik denetimi (TinySec-Auth) ve kimlik denetimli şifreleme (TinySec-AE) olmak üzere iki seçenek sunar ve düğümdeki işlem zamanını kısmen artırırken; ilk seçenekte çerçeve boyutunu 1, ikinci seçenekte 5 bayt artırmaktadır.

Güvenlik protokollerinin işletilme zamanı olarak ortaya çıkan gecikme miktarı ($t_{güvenlik}$), paketin üretildiği düğüm dahil olmak üzere, geçtiği her düğüm için uçtan uca gecikme denkleminde eklenir. $t_{güvenlik}$ 'in her düğüm için sabit olduğu ve algoritmanın şifreleme ve çözme işlem sürelerinin her ikisini de içerdiği varsayılmıştır. Bu sürede harcanan enerji, her düğüm için aynı şekilde, harcanan enerji modeline dahil edilir. Bu gecikme ve harcanan enerji miktarları, kritik uygulamalarda önem kazanabilmektedir. Fakat, teknolojik gelişmelerle işlem zamanları ve güç tüketimleri azaltılan yeni algılayıcı düğümlerde, çoğu zaman önemli olmadıkları için ihmal edilebilirler.

Paket boyutlarını artıran algoritmalar kullanıldığında, işletilme zamanına ek olarak, paketin gönderim süresi de gecikme modeline dahil edilir. Dolayısıyla haberleşme işlemlerinde tüketilen enerji miktarı da artmaktadır. KAA'da enerji tüketimi kritik bir öneme sahip olduğundan, haberleşme işlemlerindeki bu ek güç tüketimi mutlaka modele dahil edilmelidir. Paket boyutunu artıran bir algoritma kullanılıyorsa, güvenlik etkisi, (4.62) uçtan-uca gecikme denkleminde, G paket boyutu ve $t_{güvenlik}$ işletilme zamanı olmak üzere, aşağıdaki gibi dahil edilebilir. Eğer paket boyutlarında değişiklik olmuyorsa, $G = 0$ olmalıdır.

$$t_g(d, k) = \left(\frac{1}{P_{BAS}} \right) \times \left[\begin{aligned} & t_{UH} + (d - k + 1)(t_{gecis} + t_{güvenlik}) + (d - k - 1) \times n_k \times t_{LIFS} \\ & + (d - k) \times n_u \times \left(\frac{(k + G) \times 80}{R} + t_{SIFS} \right) \\ & + \sum_{i=0}^{i=d-1-k} \left(n_k \times \frac{(\eta_i + G) \times 80}{R} \right) + \frac{(\eta_d + G) \times 80}{R} \end{aligned} \right] \quad (4.51)$$

Güvenlik işlemlerinin bir KAA düğümünde harcanan enerjiye etkisi, (4.65)'teki gönderimde harcanan enerji modeline aşağıdaki işlemle dahil edilir:

$$E_{TX} = (t_{UH} + t_{güvenlik})P_H + E_{ert_topl} + \left(t_{AG} + \frac{(L+G)}{R} \right) P_{TX} \quad (4.52)$$

Güvenlik işlemleri, düğüm içerisinde gerçekleştirildiğinden, çok düşük bir güç tüketimine neden olduğundan. bu süreçte harcanan enerji göz ardı edilebilir. Kullanılan güvenlik protokollerine bağlı olarak, paket boyutları ve işletim zamanlarındaki meydana gelen değişim modellenebilir; (4.51) ve (4.52)'deki $t_{güvenlik}$ ve G yerlerine yazılarak, modellere dahil edilebilir. Değişimlerin modelleme işlemlerinin, sonraki çalışmalarda gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

4.2.4. Başarım değerlendirme

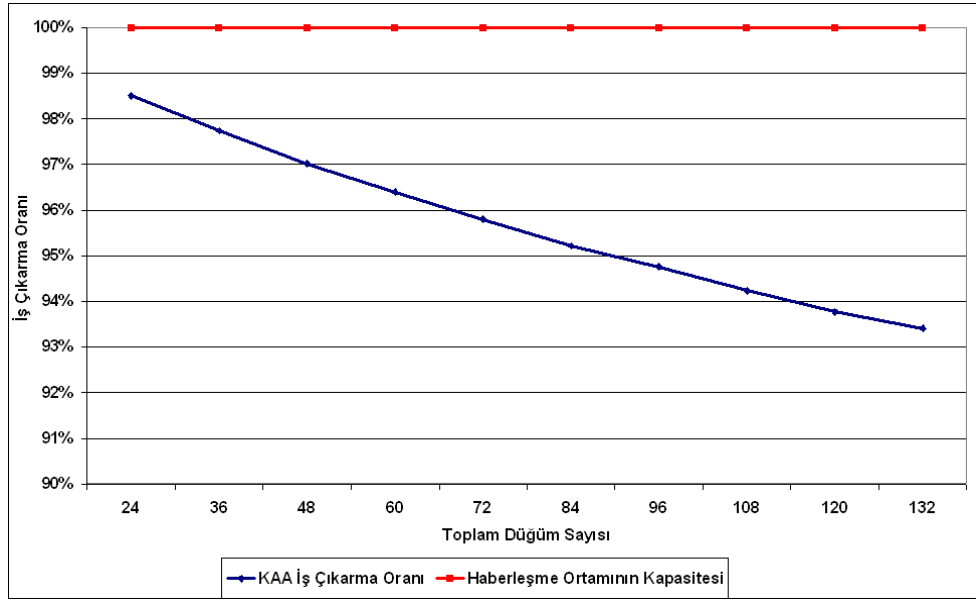
Bu kısımda, ağ haberleşmesinin başarım ölçütleri olarak, ağın iş çıkarma oranı (throughput) ve bir veri paketinin uçtan uca gecikmesi (end to end delay) modellenmiştir.

İş çıkarma, ağ üzerinden başarılı olarak gönderilen veri miktarıdır. N_d düğümünden oluşan bir KAA'da haberleşme kanalının en az bir düğüm tarafından kullanılma olasılığı $1 - (1 - \delta)^{N_d}$ ve yalnız bir düğüm tarafından kullanılma olasılığı $N_d \times \delta \times (1 - \delta)^{N_d - 1}$ şeklinde ifade edilebilir. Kanal meşgulken yalnız bir düğüm tarafından kullanılma, yani başarılı gönderim olasılığı $\frac{N_d \times \delta \times (1 - \delta)^{N_d - 1}}{1 - (1 - \delta)^{N_d}}$ 'dir.

Ağdaki en yüksek veri trafiği ζ_d ise, iş çıkarma oranı denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Th = \frac{N_d \times \delta \times (1 - \delta)^{N_d - 1}}{1 - (1 - \delta)^{N_d}} \times \zeta_d \quad (4.53)$$

Modellenen KAA doyumda çalışmadığından, haberleşme ortamının kapasitesi olarak ağdaki en yüksek veri gönderme trafiği referans alınmıştır. Şekil 4.7’de düğüm sayısının artmasına bağlı olarak iş çıkarma oranındaki değişim gösterilmiştir. 24 düğümlü bir KAA’daki iş çıkarma oranı/başarılı gönderme oranı %98’in üzerinde iken, ağdaki düğüm sayısı 132 olduğunda bu oranın %94’ün altına düştüğü görülmektedir. Ağdaki düğüm sayısının artmasına bağlı olarak, iş çıkarma oranındaki azalma, KAA’nın ölçeklenebilirliğinin düşük olduğu şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.7 : KAA İş Çıkarma Oranı (Throughput)

Ağ aşama derecesi d olan ve N_d düğümden oluşan bir KAA’da, uçtan-uca gecikme modellenirken, kullanılan radyo cihazının durum geçiş değerleri (t_{gecis}) (örneğin, boş durumdan gönderme durumuna geçiş süresi), erteleme süresi (t_{ert}) ve veri paketinin gönderim süresi dikkate alınır. OEK mekanizmasının gecikmeye etkisi, aşağıdaki durum olasılıkları kullanılarak modele dahil edilir [11].

$$P_{CCA} = \sum_{i=0}^m (b_{0,0} \times p^i) \times [1 - (1 - \delta)^{N_d - 1}] \quad (4.54)$$

$$P_{2CCA} = \sum_{i=0}^m (b_{0,0} \times p^i) \times [(1 - \delta)^{N_d - 1} - (1 - \delta)^{2N_d - 2}] \quad (4.55)$$

$$P_{BOS} = \frac{sc_bayt - (v_{sc} \times a_d)}{sc_bayt \times (1 - \delta)} \quad (4.56)$$

$$P_{ERT} = 1 - P_{BOS} - P_{CCA} - P_{2CCA} \quad (4.57)$$

$$P_{BAS} = \frac{N_d \times \delta \times (1 - \delta)^{N_d - 1}}{1 - (1 - \delta)^{N_d}} \quad (4.58)$$

Tablo 4.1 : Hesaplama kullanılan KAA düğümleri için geçiş süreleri [47]

Sembol	Tanım	Süre(µsn)
t_{UH}	Uyku modundan hazır duruma geçiş	970
t_{HG}	Hazır modundan gönderme durumuna geçiş	192
t_{HA}	Hazır modundan alma durumuna geçiş	192
t_{AG}	Alma modundan gönderme moduna geçiş	220
t_{GA}	Gönderme modundan alma moduna geçiş	200

Bir düğümden üretilen paketin merkez istasyona ulaşmaya kadar olan iletim sürecindeki uçtan uca gecikme modellenirken ortama erişim mekanizmasının, radyonun ve kullanılan yönlendirme tekniğinin etkileri değerlendirilir. İki düğüm arasındaki tek yönlü haberleşmede, radyo ve ortama erişim kontrol mekanizmasının gecikmelere etkisi bütün düğümler için ortaktır. Modellemede karmaşıklığı önlemek amacıyla bu ortak etkiler t_{gecis} ifadesi altında toplanmıştır.

$$t_{gecis} = (1 + P_{ERT}) \times t_{ert} + (1 + P_{CCA}) \times t_{CCA} + (1 + P_{2CCA}) \times t_{2CCA} + t_{HA} + t_{AG} \quad (4.59)$$

Tablo 4.2 : Denklemlerdeki semboller için kullanılan değerler [47]

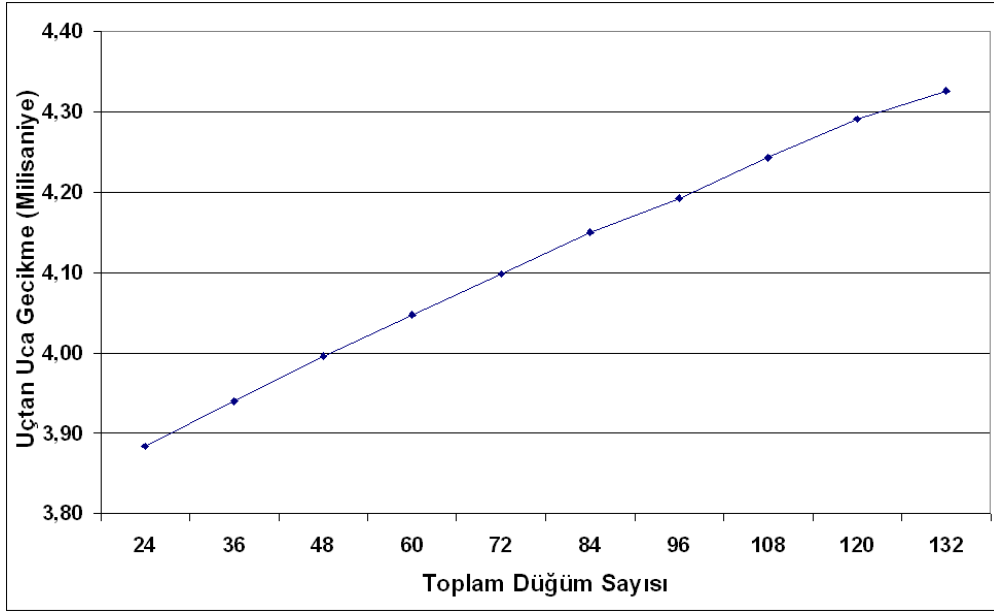
Sembol	Tanım	Süre(µsn)
t_{CCA}	Kanal kullanılabilirlik test süresi	128
t_{SIFS}	Kısa paket alımından sonra bekleme süresi	192
t_{LIFS}	Uzun paket alımından sonra bekleme süresi	192

Kullanılan yönlendirmenin uçtan-uca gecikmeye etkisini incelemek için, herhangi bir uç düğümün merkez düğümlerle doğrudan ve düğümler üzerinden (multi-hop) haberleşmesi ayrı ayrı ifade edilmiştir. Herhangi bir uç düğümün doğrudan merkez

istasyonla ya da bir başka düğümle tek yönlü haberleşmesindeki uçtan uca gecikme aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$t_g(d) = \left(\frac{1}{P_{BAS}} \right) \times \left(t_{UH} + t_{gecis} + \frac{\kappa \times 80}{R} + t_{SIFS} \right) \quad (4.60)$$

Şekil 4.8’de düğüm sayısının artmasına bağlı olarak, bir uç düğümden bağlı olduğu koordinatöre gönderilen bir pakete ait uçtan uca gecikme grafiği görülmektedir. Bir paketin gönderilmesi esnasındaki diğer işlemlere ait süreler değişmediği halde uçtan- uca gecikme grafiğindeki artışın nedeni, düğüm sayısının artmasıyla, ortam erişimdeki başarı oranının/kanalın boş bulunma olasılığının azalmasıdır. Düğüm sayısının artmasıyla, haberleşme ortamındaki çekişmeler de arttığı için, ortam erişim başarı oranı/kanalın boş bulunma olasılığı azalmaktadır. 24 düğümlü bir KAA’da uç düğüme tarafından gönderilen bir pakete ait uçtan- uca gecikme süresi 3,88 milisaniye iken, düğüm sayısı 132 olduğunda, yönlendirme ve OEK’nin etkisiyle 4,32 milisaniye seviyesine çıkmaktadır.



Şekil 4.8 : Ortama Erişim Kontrol Mekanizmasının Uçtan Uca Gecikmeye Etkisi

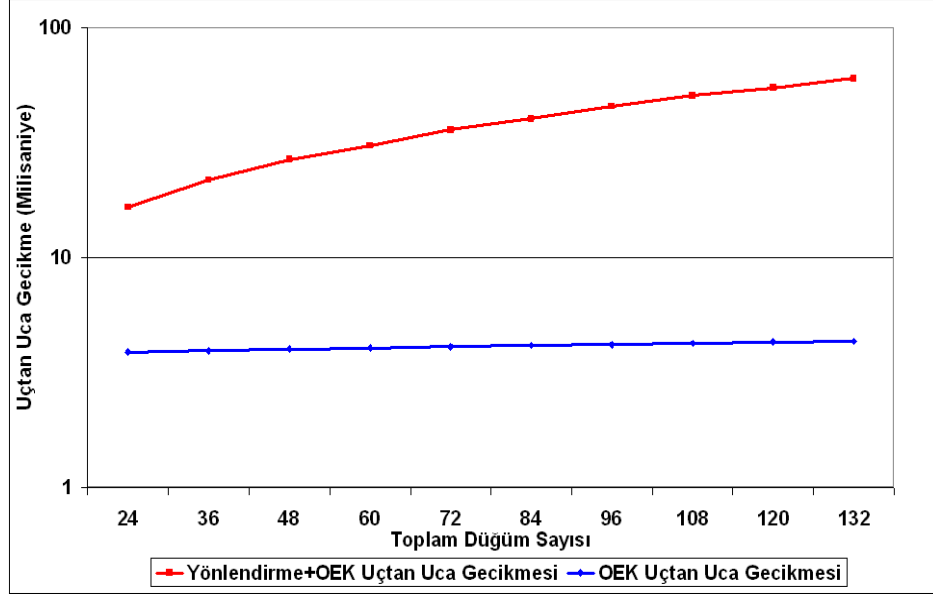
$t_g(d, k)$ ile k kademesindeki herhangi bir uç düğümden merkez istasyona aktarılan veri paketinin uçtan uca gecikme süresi ifade edilmiştir. Şekil 4.5’de gösterildiği

gibi, kademe değeri en uçtaki düğüm için $k = 0$ ve merkez istasyondan önceki son koordinatörün üzerindeki düğüm için $k = d - 1$ 'dir. Merkez istasyon üzerinde algılayıcı düğüm bulunmadığından $k = \{0, 1, \dots, d - 1\}$ olabilir. ($\eta_0 = 0$)

$$t_g = \left(\frac{1}{P_{BAS}} \right) \times \left[\begin{aligned} & \left\{ t_{UH} + t_{gecis} + \left(\frac{\kappa \times 80}{R} \right) \right\} + \left\{ (n_u - 1) \left(\frac{\kappa \times 80}{R} \right) + (n_u \times t_{SIFS}) + t_{gecis} + \left(\frac{\eta_1 \times 80}{R} \right) \right\} \\ & + \left\{ (n_k - 1) \left(\frac{\eta_1 \times 80}{R} \right) + (n_k \times t_{LIFS}) + n_u \left(\frac{\kappa \times 80}{R} \right) + (n_u \times t_{SIFS}) + t_{gecis} + \frac{\eta_2 \times 80}{R} \right\} \\ & + \left\{ (n_k - 1) \left(\frac{\eta_2 \times 80}{R} \right) + (n_k \times t_{LIFS}) + n_u \left(\frac{\kappa \times 80}{R} \right) + (n_u \times t_{SIFS}) + t_{gecis} + \frac{\eta_3 \times 80}{R} \right\} \\ & + \dots + \frac{\eta_d \times 80}{R} \end{aligned} \right] \quad (4.61)$$

$$t_g(d, k) = \left(\frac{1}{P_{BAS}} \right) \times \left[\begin{aligned} & t_{UH} + (d - k + 1)t_{gecis} + (d - k) \times n_u \times \left(\frac{\kappa \times 80}{R} + t_{SIFS} \right) \\ & + (d - k - 1) \times n_k \times t_{LIFS} + \sum_{i=0}^{i=d-1-k} \left(n_k \times \frac{\eta_i \times 80}{R} \right) + \frac{\eta_d \times 80}{R} \end{aligned} \right] \quad (4.62)$$

Şekil 4.9'da ağdaki düğüm sayısının artmasıyla, doğrudan ve düğümler üzerinden haberleşmeye ait uçtan uca gecikme değerlerindeki değişim görülmektedir. Paket boyutlarının merkez düğüme yaklaştıkça büyümesi ve düğüm sayısının artmasıyla ortama erişimdeki başarımın azalması sonucu, yönlendirme kullanılan haberleşmedeki gecikme değişimi, doğrudan haberleşmeye nispeten çok daha fazla olmaktadır. İki duruma ait grafikler Şekil 4.9'da karşılaştırılmıştır. 24 düğümlü KAA'da iki durum arasındaki fark yaklaşık 4 kat iken, düğüm sayısı 132 olduğunda iki durum arasındaki uçtan-uca gecikme farkı yaklaşık 15 kat olmaktadır.



Şekil 4.9 : Yönlendirme ve OEK'in Uçtan Uca Gecikmeye Etkisi

4.2.5. Enerji tüketim modeli

Enerji tüketim modelinde, güç tüketimine neden olan farklı çalışma durumları ve aktiviteler dikkate alınır. Tüketilen enerji bakımından, düğümdeki aktivitelerin en önemlisi düğümler arasındaki bilgi alış-verişini içeren kablosuz haberleşme işlevleridir [59]. Bunun yanında diğer durumlara ait tüketim miktarları da modelde yer almalıdır. Bir KAA düğümünde güç tüketimine sebep olan durumlar kısaca şöyle açıklanabilir:

KAA düğümleri, IEEE 802.15.4 OEK kullandıklarından, *BI* zaman aralıklarıyla koordinatörlerinden gelen kılavuz çerçevelerini alırlar ve herhangi bir sebeple düğümün ağ/koordinatörü ile olan bağlantıları kesilirse, pasif bir ağ taraması yaparlar. Bu işlemler sırasında radyo alıcı durumunda çalışır. Algıladıkları verileri koordinatörlerine iletirlerken radyoları gönderme modundadır. Düğüm, herhangi bir işle meşgul olmadığı durumda, enerji tasarrufu için uyku moduna geçer. Uzun süre böyle kalacaksa, daha fazla enerji tasarrufu sağlamak için radyosunu kapatır ve bekleme moduna geçer. Bekleme modunda, sadece düğümü tekrar hayata döndürecek, sürekli alıcı durumunda olan, ikincil bir radyo kullanılır. Böylece, düğümdeki enerji tasarrufu, uyku moduna göre yaklaşık 20 kat artabilir [60].

Bekleme modundaki güç tüketimi P_U ile gösterilmiştir ve algılayıcı düğümün elektronik devre elemanlarının karakteristik özelliklerine bağlıdır. Bir düğümün, erteleme işleminde ve uyku durumundan hazır duruma geçtiğinde güç tüketimi P_H ; paket ya da kılavuz alımı, zaman eşleme, kanal kullanılabilirlik testi ve ağ tarama işlemlerinde ve hazır moddan alım moduna geçtiğinde güç tüketimi P_{RX} ; kılavuz ya da veri paketi gönderiminde ve hazır moddan gönderme durumuna geçtiğinde güç tüketimi P_{TX} 'dir [47].

$$E_{ert_iplm} = (s_{deneme} \times t_{CCA_iplm})P_{RX} + (t_{ert})P_H \quad (4.63)$$

$$E_{RX_KLVZ} = (t_{RX_KLVZ} - t_{LIFS} - t_{UH})P_{RX} + (t_{UH} + t_{LIFS})P_H \quad (4.64)$$

$$E_{TX} = t_{UH}P_H + E_{ert_iplm} + \left(t_{AG} + \frac{L}{R}\right)P_{TX} \quad (4.65)$$

$$E_{RX} = t_{LIFS}P_H + (t_{RX} - t_{LIFS})P_{RX} \quad (4.66)$$

$$E_{TX_KLVZ} = t_{TX_KLVZ} \times P_{TX} \quad (4.67)$$

$$E_{AT} = t_{AT}P_{RX} \quad (4.68)$$

Tablo 4.3 : Algılayıcı düğümlerin yaklaşık güç tüketim değerleri [60]

Sembol	Tanım	Değer
P_U	Bekleme konumundayken 1 saniyedeki güç tüketimi	60 μ W
P_H	Hazır konumundayken 1 saniyedeki güç tüketimi	3 mW
P_{TX}	Gönderme modundayken 1 saniyedeki güç tüketimi	47 mW
P_{RX}	Alma modundayken 1 saniyedeki güç tüketimi	53.2 mW

Bir uç düğümün enerji tüketim modelinde, birim zamandaki kılavuz alım, paket gönderim, ağ tarama, boş kalma sürelerindeki güç tüketimi ve gönderilen paket sayısı dikkate alınır. v_{SC} ve v_{AT} sırasıyla bir süper çerçevede gönderilecek paket ve yapılacak ağ tarama sayılarını gösterir. Ağ tarama periyodu genel olarak çok uzun

seçildiğinden, v_{AT} çok küçük değerler alır. İşlemlerde $L_{KLVZ} = 15 \text{ Bayt}$, $v_{SC} = 1$ ve $AT_{\text{periyot}} = 4 \text{ saat}$ şeklinde varsayımlar kullanılmıştır. $v_{AT} = BI/AT_{\text{periyot}}$ şeklinde hesaplanabilir.

$$P_{UC} = \frac{E_{RX_KLVZ}}{BI} + v_{SC} \times \frac{E_{TX}}{BI} + v_{AT} \times \frac{E_{AT}}{BI} + (1 - CZ_{UC})P_U \quad (4.69)$$

$$P_{UC} = \left\{ \begin{array}{l} v_{AT} \times \left[\frac{t_{HA} + (2^{BO} + 1) \times (960 \times 4 / R)}{BI} P_{RX} + \frac{(t_{RX_KLVZ} - t_{LIFS} - t_{UH}) P_{RX} + (t_{LIFS} + t_{UH}) P_H}{BI} \right] \\ + v_{SC} \times \left[\frac{t_{UH} P_H + E_{ert_iplm} + \left(t_{AG} + \frac{U}{R} \right) P_{TX}}{BI} \right] + (1 - CZ_{UC}) P_U \end{array} \right\} \quad (4.70)$$

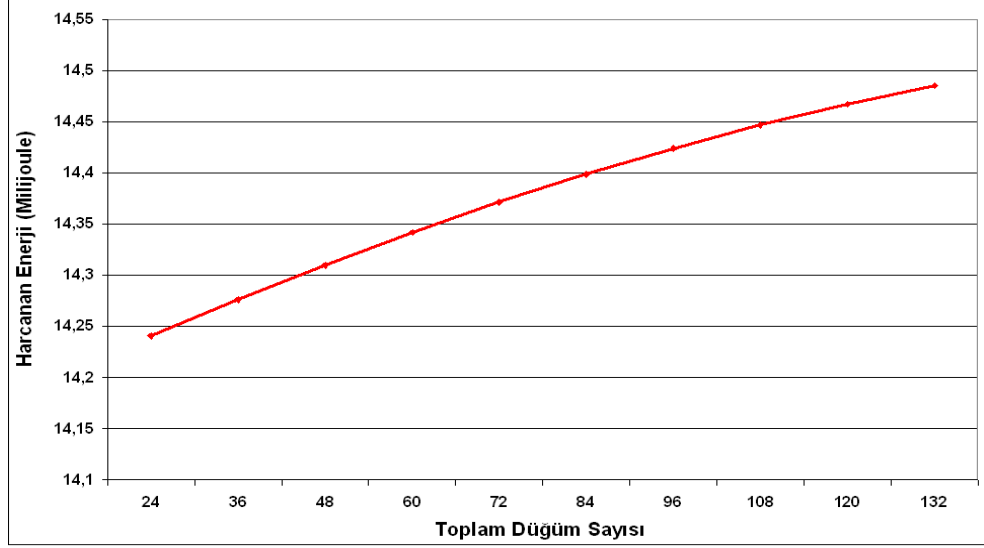
OEK'nin ağ haberleşmesine etkisi, her bir işleme ait olasılıklarla tanımlanır. Düğüm sayısına, ağ trafiğine, yönlendirme protokolüne bağlı olan bu olasılıklar, farklı işlemlerde geçen sürelerdeki değişimi de ifade etmektedir. İşlem süreleri, düğümlerde harcanan enerji miktarını doğrudan etkilediğinden, yönlendirme ve OEK'nin düğümlerin güç tüketimleri üzerindeki etkisi bu olasılıklar kullanılarak modele dahil edilir:

$$P_{UC} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(t_{LIFS} + [v_{SC} + 1] \times t_{UH}) P_H}{BI} + \frac{v_{SC} \times E_{ert_iplm}}{BI} + \frac{v_{SC} \times \frac{1}{P_{BAS}} \times \left(t_{AG} + \frac{U}{R} \right) \times P_{TX}}{BI} \\ + \frac{(t_{RX_KLVZ} - t_{LIFS} - t_{UH} + v_{AT} \times [t_{HA} + (2^{BO} + 1) \times (960 \times 4 / R)]) \times P_{RX}}{BI} + (1 - CZ_{UC}) P_U \end{array} \right\} \quad (4.71)$$

Bir uç düğümün bir saniyede harcadığı enerji miktarı aşağıda gibi hesaplanır:

$$E_{UC} = \frac{1}{BI} \times P_{UC} = \frac{R \times P_{UC}}{2^{BO} \times 960 \times 4} \text{ joule}$$

Şekil 4.10'da ağdaki düğüm sayısı arttığında, herhangi bir uç düğümün, bir saniyede harcadığı enerji miktarındaki değişim görülmektedir. Düğüm sayısının artmasıyla, ortama erişimdeki başarı azalmaktadır. Paket boyutu değişmediğinde, paketin iletiminde harcanan enerji de değişmezken, grafikte görülen artışın nedeni, OEK'nin harcanan enerji miktarı üzerindeki etkisidir.



Şekil 4.10 : OEK'in bir uç düğümde harcanan enerji miktarına etkisi

Koordinatör düğümler, ağ içerisinde daha aktif ve kritik rol oynadıklarından, uç düğümlere nispeten performansları daha yüksek, enerji sınırlamaları daha düşük olarak seçilirler. Bir koordinatörün enerji tüketim modelinde, kılavuz alım-gönderim, alt düğümlerden toplanan verilerin bir üst kademedeki koordinatöre yada merkez istasyona gönderilme ve ağ tarama işlemleri dikkate alınır. Ayrıca koordinatörler, bahsedilen bu işlemler dışında, paket kayıplarını önlemek için, süper çerçeve süresince alıcı durumunda beklerler. Kılavuz aralığı süper çerçeve süresine eşit değilse, koordinatör, güç tasarrufu için aradaki süreyi uyku modunda geçirebilir. KAA'nın k kademesindeki bir koordinatörün enerji tüketimi, çalışma zamanı (CZ_{KOOR}) da göz önünde bulundurularak, aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_{k.KOOR} = \frac{E_{TXB} + E_{RXB}}{BI} + v_{SC} \times \frac{(E_{TX})}{BI} + \frac{(SD_{SO} - T_{CAP}) \times P_{RX}}{BI} + v_{AT} \times \frac{t_{AT}}{BI} + (1 - CZ_{KOOR}) P_U \quad (4.72)$$

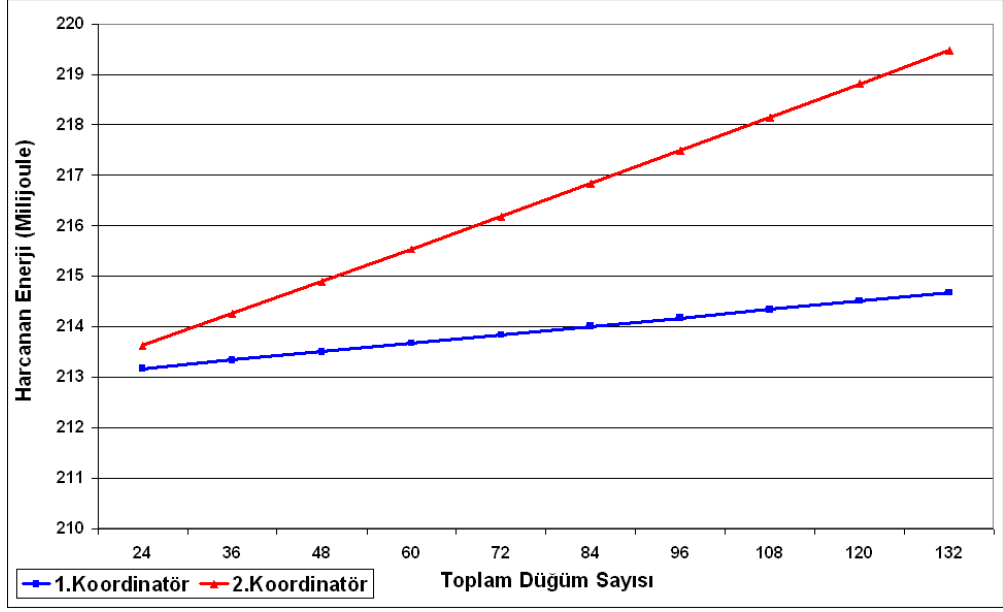
Yönlendirme ve OEK'nin etkisi enerji tüketim modeline eklenmelidir. Bu sebeple, L_k , k kademesindeki koordinatörün göndereceği paket boyutu olmak üzere, erteleme, kanal kullanılabilirlik testlerindeki başarı ve kanal kullanılabilirlik olasılıkları denklem (4.73)'de modele dahil edilmiştir.

$$P_{k.KOOR} = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\{t_{RX_KLZ} - t_{LIFS} - t_{UH}\} + \{SD_{SO} - T_{CAP}\} + v_{AT} \times \{t_{HA} + (2^{BO} + 1)(960 \times 4 / R)\}}{BI} \right] P_{RX} \\ + \left[\frac{t_{TX_KLZ} + \frac{v_{SC}}{P_{BAS}} \left(t_{AG} + \frac{L_k}{R} \right)}{BI} \right] P_{TX} + \frac{v_{SC} \times E_{eri_iplm}}{BI} + \frac{[t_{LIFS} + (v_{SC} + 1) \times t_{UH}] P_H}{BI} \\ + (1 - CZ_{KOOR}) P_U \end{array} \right\} \quad (4.73)$$

KAA'da k kademesindeki bir koordinatörün bir saniyede harcadığı enerji miktarı $P_{k.KOOR}$ formülü kullanılarak aşağıda gibi ifade edilir:

$$E_{k.KOOR} = \frac{1}{BI} \times P_{k.KOOR} = \frac{R \times P_{k.KOOR}}{2^{BO} \times 960 \times 4} \quad (\text{joule}) \quad (4.74)$$

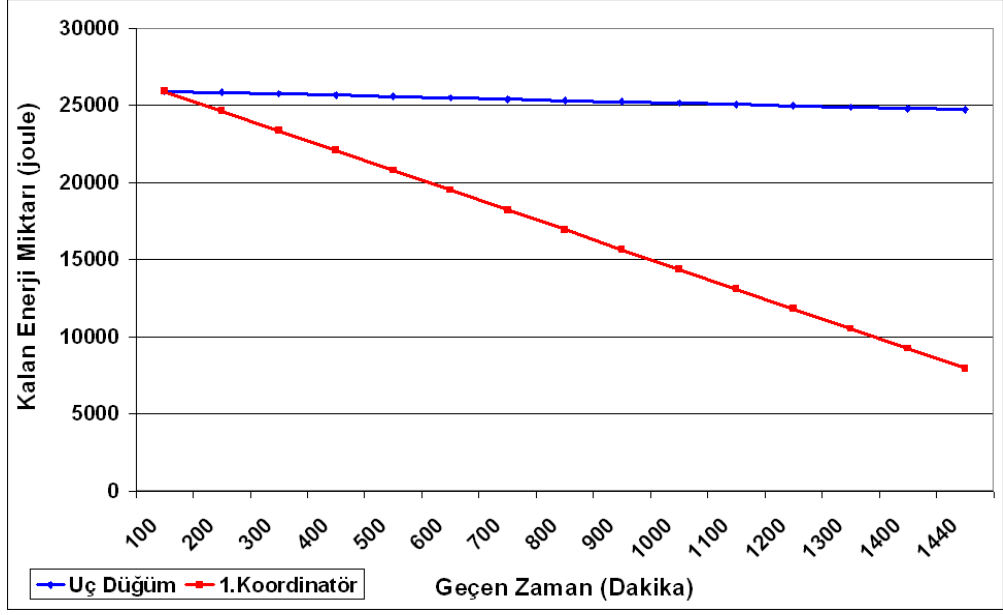
Şekil 4.11'de düğüm sayısındaki artışın 1. ve 2. kademedeki koordinatörlerde harcanan enerji miktarlarına etkisi görülmektedir. Koordinatörlerde harcanan enerji miktarı uç düğümlere nispeten daha fazladır. Uç düğümlerde paket boyutu sabit olduğundan, Şekil 4.10'daki enerji tüketim grafiğinde görülen değişimin nedeni OEK'nin etkisidir. Koordinatörlerde harcanan enerji miktarlarındaki artış, ortam erişim mekanizmasının yanı sıra, paket boyutlarındaki artışın sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. 2. koordinatör üzerinden aktarılan paket boyutları (alınan ve gönderilen), alt seviyedeki diğer koordinatörlerden daha büyük olduğundan, 2. koordinatörde harcanan enerji miktarı daha fazla olmaktadır. Düğümlerin birbirleri üzerinden haberleştikleri durumlarda, merkez istasyona yakın koordinatörlerdeki yönlendirme yükünün fazla olması, koordinatörlerde harcanan enerji üzerinde önemli bir artışa neden olmaktadır [49].



Şekil 4.11 : Yönlendirme ve OEK'in koordinatörlerde harcanan enerjiye etkisi

Düğümün yaşam sürelerini harcadıkları enerji miktarları ve sahip oldukları güç kaynakları belirler. Düğümün başlangıçta sahip oldukları enerji miktarından harcadığı enerji miktarları çıkarılarak, kalan ömrü ya da yaşam süresi hakkında kestirim yapılabilir. Bir düğüme ait kalan enerji miktarı $E_{KALAN} = E_{ILK} - E_{HARCANAN}$ formülü ile hesaplanabilir.

KAA'da kullanılan düğümlerin aynı özelliklere sahip olduğu ve kullanılan güç kaynağının 2 adet AA (1200 mAh) pilden meydana geldiği varsayıldığında, bu pillerin başlangıçta sahip oldukları enerji miktarı ortalama 25920 joule'dir. Bir gün sürecinde, bir uç düğüm ve 1. kademede koordinatöre ait kalan enerji miktarlarındaki değişim grafiği Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Bir günlük süreçte bir uç ve 1.seviyedeki koordinatör düğümde kalan enerji

4.3. Sonuç

Bu bölümde, IEEE 802.15.4 OEK protokolünü kullanan algılayıcı düğümlerden oluşan, sağlık alanında kullanılan örnek bir KAA uygulama senaryosunun, yönlendirme protokolü baz alınarak tümeşik analitik modellemesi yapılmıştır. Ortam erişim için kullanılan dilimli CSMA/CA mekanizması, ayrık Markov zinciri kullanılarak üç kısımda ele alınmıştır. İlk kısımda haberleşme kanalının boş bulunma olasılığı, ortama erişimden önceki erteleme süresi ve tekrar deneme basamak sayısı; ikinci kısımda çarpışma olasılığı; üçüncü kısımda ise ortam erişim işlev süreleri modellenmiştir.

Modellenen KAA'daki düğümlerin, algıladıkları/topladıkları verileri birbirleri üzerinden merkez istasyona ulaştırabilmeleri için, kümelenmiş-ağaç (cluster-tree) ağ topolojisine uygun bir yönlendirme protokolü kullanılmıştır. Bu tür bir ağda çalışan, bir cihaz ve bir koordinatöre ait analitik modellerle bütün önemli çalışma zamanı işlemleri tanımlanabilmektedir [47]. Bu sebeple, bir koordinatör ve bir uç düğüme ait iş çıkarma oranı, uçtan uca gecikme, harcanan enerji miktarı için iki ayrı başarımlı değerlendirme modeli elde edilmiştir.

KAA başarım modelinde, iş çıkarma ve uçtan-uca gecikme incelenmiştir. İş ıkarma modelinde yönlendirme ile OEK'in etkileri birlikte, aynı denklem üzerinde ifade edilmiştir. Uçtan-uca gecikme modelinde ise, yalnız OEK'in ve yönlendirme ile OEK'in birlikte, uçtan-uca gecikme üzerindeki etkileri ayrı ayrı ifade edilerek karşılaştırılmıştır.

Enerji tknetimi, KAA düğümlerinin ya da KAA protokollerinin kullanılabilirlikleri ve seçimleri konusunda belirleyici bir özelliğe sahiptir. Enerji tknetim modelinde, OEK, haberleşme ve bekleme esnasında düğümlerde harcanan enerjiler ifade edilmiştir. Bir uç düğüm ve birinci kademedeki koordinatörün bir gün sürecinde harcadığı/kalan enerji miktarları modellenerek, grafik üzerinde gösterilmiştir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

İnsanların bilgiye olan talebi geçen yıllarla orantılı olarak artmaktadır. Bu süreçte bilgiye olduğu kadar ona ulaşmak için kullanılacak teknik ve yöntemler de ön plana çıkmıştır. Olumsuz koşullar, vahşi hayat gibi bilgiye doğrudan ulaşmanın imkansız olduğu durumlar teknolojik gelişmeleri güdülemiştir. Karşılıklı bu arz-talep ilişkisi olumlu sonuçlar vermiş, mikro-elektromekanik sistemlerin gelişmesi ve KAA'nın güncel bir konu haline gelmesiyle, bilgiye ulaşma adına önemli bir adım daha atılabilmektedir.

KAA'nın kullanım alanları potansiyel olarak çok fazladır. Çevresel veri toplama, casus izleme, canlıların ya da araçların takibi ve bunların türevleri olarak ortaya çıkan uygulamalar çok farklı dallarda kendilerine stratejik yer bulmuştur. KAA kullanımına olan talebin artmasıyla sunulan mevcut sistemlerin donanımsal ve yazılımsal olarak geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ayrıca, algılayıcı düğümlerin sınırlı özellikleri dahilinde, güç tüketimlerini azaltabilecek, başarıyı artıracak iletişim kuralları üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde bu alanda yapılmış birçok örnek bulunmaktadır.

Geliştirilen mevcut algılayıcı düğümler farklı amaçlara yönelik birçok KAA uygulamalarında kullanılmaktadır. Düğümlerin sınırlı özellikleri göz önüne alındığında, başarı ve ortaya çıkabilecek problemler hakkında kestirim yapılabilecek sistemlere olan gereksinim gündeme gelmiştir. Bu gereksinimin karşılanması amacıyla da modelleme yöntemleri geliştirilmiştir. İlk örnek (prototip), benzetim ve analitik model olmak üzere üç temel modelleme yöntemi vardır. Analitik modelleme diğer modelleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok daha az maliyetlidir.

Bu çalışmada analitik modelleme yöntemi kullanılarak, sağlık alanında örnek bir KAA'nın tümleşik analitik modeli çıkarılmıştır. Ortama erişim kontrol mekanizması

üç başlık altında modellenmiştir. CSMA/CA mekanizması ayrık-Markov zinciri kullanılarak modellenmiş, ağdaki bir düğümün ortamı boş bulma olasılığı analitik olarak ifade edilmiştir. Başarılı kanal kontrol testlerine rağmen, ortaya çıkabilecek çarpışmaların olasılığı ve bir düğümün ortama erişim ve ortamı kullanım süreçleri modellenmiştir. Modelleme işlemleri yönlendirme protokolü baz alınarak yapılmış, ilk olarak KAA'yı tanımlayıcı ifadeler türetilmiştir. Bu ifadeler kullanılarak haberleşme kanalının kullanım oranı hesaplanmıştır. Başarım analitik modelinde iş çıkarma ve uçtan-uca gecikme, yönlendirme ile OEK'in etkileri dahil edilerek ifade edilmiştir. Yalnız OEK ve yönlendirmeli OEK uçtan uca gecikmesi ayrı ayrı grafik üzerinde gösterilerek, yönlendirmenin ve düğüm sayısının başarım üzerindeki etkileri grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Düğümlerin bekleme, ortama erişim ve paket iletimlerindeki harcadıkları enerji dikkate alınarak, uç düğümler ve koordinatörler için tüketilen ve kalan enerji modeli çıkarılmıştır.

Bir KAA'yı tüm bileşenleriyle bütünlük olarak ifade eden bir analitik bir model oluşturulmasıyla, bu alandaki önemli bir eksikliğin giderildiği değerlendirilmektedir. amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma ile probleme dair önemli bir yol kat edilmiştir. Bununla birlikte eklenmesi gereken bazı özel durum ve gereksinimler sonraki çalışmalara bırakılmıştır. Bu çalışma, bilindiği kadarıyla tümleşik bir KAA analitik modellemesi adına ilk örnektir ve bu alanda çalışacak diğer araştırmacılara ve yapılacak benzer çalışmalara örnek teşkil edecektir.

Öneriler:

KAA'daki tüm düğümler aynı süperçerçeve içerisinde çekişme halindedir. Bu şekilde bir kullanımda düğüm sayısının fazla olması ortama erişimdeki başarımı azaltırken çarpışma olasılığını artırmaktadır. Koordinatörler farklı süperçerçevelerde haberleştirilerek, çalışma zamanları azaltılarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Çünkü BO değerine de bağlı olarak, kullanılmadığı zamanlarda koordinatörler uyku durumuna geçebilirler. Diğer durumda, paket kaybını önlemek için radyosunu açık tutmak zorunda olduğu süre daha uzundur. Bu sebeple gereksiz güç tüketimine yol açmaktadır. Bununla birlikte, aynı anda çekişme halindeki düğümlerin sayısı daha az olacağından, ortama erişim ve çarpışma olasılıklarında önemli düzeltilmeler olabilir.

Çünkü bir koordinatör kendi alt birimleriyle haberleşirken, ortamda yabancı başka bir radyonun bulunmaması çarpışma olasılığını azaltacaktır. Ayrıca, birbirlerine yakın alt-ağlardaki karışma (interference) olasılığı da azaltılabilir. ZigBee buna benzer bir yöntem kullanmaktadır. Bahsedilen çalışma şekilleri de modellenebilir.

Yapılan çalışmada elde edilen enerji harcama modelinin grafiği incelendiğinde koordinatörlerdeki enerji tüketiminin uç düğümlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ağaç topolojisinde bir üst kademedeki düğümlerle olan haberleşme, aynı kademedeki düğümlerden yalnız biri seçilerek sağlanır. Seçilen düğüme verilen bu ek görev enerji tüketiminin diğerlerinden daha fazla olmasına neden olur. Bu koordinatörün enerjisi daha erken tükeneceğinden alt düğümleriyle olan bağlantı kesilecektir. Bu durumun önüne geçilebilmesi ve enerji tüketiminin dengelenebilmesi için alt koordinatörler bu görevi kendi aralarında değişimli olarak başarabilirler. Bu sorun kısmen çözülmüş durumdadır ve modele dahil edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Lukošius, A., “Opportunistic Routing in Multi-Sink Mobile Ad Hoc Wireless Sensor Networks”, Master Thesis, *Bremen University Communication Networks*, Bremen, Germany, 9, (2007)
- [2] Römer, K., Friedemann, M., “The Design Space of Wireless Sensor Networks”, *IEEE Wireless Communications*, Volume: 11, 54 – 61, (2004).
- [3] Akyıldız, I.F., Su, W., Sankasubramaniam, Y., Çayırıcı, E., “Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Computer Networks*, 393 – 422, (2002).
- [4] Bianchi, G., “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volume: 18, Issue : 3, 535 – 547, (2000).
- [5] Wu, H., Peng, Y., Long, K., Cheng, S., “A simple model of IEEE 802.11 wireless LAN”, *The International Conferences on Info-tech and Info-Net*, Volume: 2, 514 – 519, Beijing, China, October 29 – November 1 (2001).
- [6] Foh, C.H., Zukerman, M., “Performance Analysis of the IEEE 802.11 MAC Protocol”, *The European Wireless 2002 Conference*, Florence, Italy, February 27 (2002).
- [7] Park, T.R., Kim, T.H., Choi, S., Kwon, W.H., “Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA”, *Electronics Letters*, Volume: 41, Issue : 18, 1017 – 1019, (2005).
- [8] Tao, Z., Panwar, S., Gu, D., Zhang, J., “Performance analysis and a proposed improvement for the IEEE 802.15.4 contention access period”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2006*, Volume: 4, 1811 – 1818, Las Vegas, Nevada, April (2006).
- [9] Koubaa, A., Alves, M., Tovar, E., “GTS allocation analysis in IEEE 802.15.4 for real-time wireless sensor Networks”, *20th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2006)*, Rhodes Island, Greece, April 25 – 29 (2006).
- [10] Kim T.O., Park, J.S., Choi, B.D., “Analytic Model of IEEE 802.15.4 with Download Traffic”, *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW '07)*, Volume: 2, 231 – 235, Niagara Falls, Ontario, Canada, May 21-23 (2007).

- [11] Chen, Z., Lin, C., Wen, H., Yin, H., “An Analytical Model for Evaluating IEEE 802.15.4 CSMA/CA protocol in Low-rate wireless application”, *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW '07)*, Volume: 2, 899 – 904, Niagara Falls, Ontario, Canada, May 21-23 (2007).
- [12] Gao, B., He, C., Jiang, L., “Modeling and Analysis of IEEE 802.15.4 CSMA/CA with Sleep Mode Enabled”, *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS 2008)*, 6 – 11, Guangzhou, China, November 19 – 21 (2008).
- [13] He, J., Tang Z., Chen, H., Wang, S., “An Accurate Markov Model for Slotted CSMA/CA Algorithm in IEEE 802.15.4 Networks”, *IEEE Communication Letters*, Volume: 12, Issue : 6, 420 – 422, (2008).
- [14] Sahoo, P.K., Sheu, J.P., Chang, Y.C., “Performance evaluation of wireless sensor network with hybrid channel access mechanism”, *Journal of Network and Computer Applications*, Volume: 32, Issue : 4, 878 – 888, (2009).
- [15] Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D., “Wireless sensor network survey”, *Computer Networks*, Volume: 52, Issue: 12, 2292–2330, (2008).
- [16] Diamond, S. M., Ceruti, M.G., “Application of Wireless Sensor Network to Military Information Integration”, *2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Volume: 1, 318, July (2007).
- [17] Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D., “Wireless Sensor Network Survey”, *Computer Networks*, Volume: 52, Issue: 12, Syf: 2313 , (2008).
- [18] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, “Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume: 12, Issue: 3, 493 – 506, June, (2004).
- [19] Timmons, N.F., Scanlon, W.G., “Analysis of the Performance of IEEE 802.15.4 for Medical Sensor Body Area Networking”, *IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'04)*, Santa Clara, USA, 16-24, October (2004).
- [20] Al-Karaki, J., Kamal, A.E., "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Communications*, Volume: 11, 6- 28, (2004).
- [21] Chuang, S., Chen, C., Jiang C., “Minimum-Delay Energy-Efficient Source to Multisink Routing in Wireless Sensor Networks”, *2007 International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, Taiwan, China, 1- 8, December (2007).
- [22] Akkaya, K., Younis, M., “A survey on routing protocols for wireless sensor networks", *Elsevier Ad Hoc Networks*, Volume: 3, Issue: 3 , 325-349, (2003).

- [23] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H., “Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks”, *The 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, Volume: 2, Hawaii, USA, January (2000).
- [24] Lindsey, S., Raghavendra, C.S., “PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems”, *The IEEE Aerospace Conference*, Volume:3, Los Angeles, USA, 1125-1130, March (2002).
- [25] Lindsey, S., Raghavendra, C.S., Sivalingam, K., “Data gathering in sensor networks using the energy*delay metric”, *15th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, San Francisco, CA, 2001-2008, April (2001).
- [26] Younis, M., Youssef, M., Arisha, K., “Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks”, *The 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS 2002)*, Fort Worth, Texas, October (2002).
- [27] Sadagopan, N., Krishnamachari, B., Helmy, A., “The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks”, *Sensor Network Protocols and Applications*, 149-155, May (2003).
- [28] Younis, M., Munshi ,P., Al-Shaer, E.S., “Architecture for efficient monitoring and management of sensor Networks”, *Management of Multimedia Networks and Services*, Volume: 2839, 488 – 502, (2003).
- [29] Xu, Y., Heidemann, J., Estrin, D., “Geography-informed energy conservation for Ad Hoc routing”, *International Conference on Mobile Computing and Networking*, Rome, Italy, Page: 70 – 84, (2001).
- [30] Karl, H., Willig, A., “Protocols and Achitectures for Wireless Sensor Networks”, *John Wiley & Sons, First Edition*, 85-109, (2005).
- [31] Pathan, A.S.K., Hyung-Woo L., Choong S. H., “Security in wireless sensor networks: issues and challenges”, *The 8th International Conference on Advanced Communication Technology*, ICACT, Volume: 2, 1048-1054 , February 20-22 (2006).
- [32] Karlof, C., Sastry, N., Wagner, D., “TinySec: A Link Layer Security Architecture for Wireless Sensor Networks”, *SenSys’04: 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Baltimore, Maryland, USA, 162-175, November 3–5, (2004).
- [33] Lighfoot, L.E., Ren, J., Li, T., “An Energy Efficient Link-Layer Security Protocol For Wireless Sensor Networks”, *IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT 2007)*, 233-238, May 17-20 (2007).

- [34] Woo, A., Culler, D., “Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-Power Wireless Networks”, *Technical Report, Report ID : CSD-03-1270*, UC Berkeley, (2003).
- [35] K. S. Pister, 2001, “The 29 Palms Fixed/Mobile Experiment: Tracking vehicles with a UAV-delivered sensor network” [Online], Berkeley University, <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/29Palms0103/>, (**Ziyaret Tarihi: 24 Şubat 2009**)
- [36] Merrill, W. M., Newberg, F., Sohrabi, K., Kaiser, W., Pottie, G., “Collaborative Networking Requirements for Unattended Ground Sensor Systems”. *IEEE Aerospace Conference*, Volume: 5, March, (2003).
- [37] K. L. Rider, 2002, “Self-Healing Minefield : Advanced Vehicle Maneuver Denial System” [Online], <http://www.dtic.mil/ndia/2002mines/rider.pdf>, (**Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2009**).
- [38] Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., Anderson, J., “Wireless sensor networks for habitat monitoring”, *The 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, Atlanta, Georgia, USA, 88 – 92, September, (2002).
- [39] Burrell, J., Brooke, T., Beckwith, R., Vineyard computing: sensor networks in agricultural production”, *IEEE Pervasive Computing*, Volume: 3, Issue: 1, 38-45, (2004).
- [40] H. Baldus, K. Klabunde, and G. Muesch. “Reliable Set-Up of Medical Body-Sensor Networks”, *Proceedings EWSN 2004*, Berlin, Germany, 353 – 363, January 19-21 (2004).
- [41] Buzen, J.P., “A Simple Model of Transaction Processing”, *Tenth International Computer Measurement Group Conference*, San Francisco, USA, December, (1984).
- [42] Caliri, G.V., “Introduction to Analytical Modeling”, *26th International Computer Measurement Group Conference*, Orlando, USA, December, (2000).
- [43] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, “TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks”, *The 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April (2001).
- [44] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, “Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks”, *The 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’00)*, Boston, MA, August (2000).
- [45] Estrin, D., Govindan, R., Heidemann, J., Kumar, S., “Next century challenges: scalable coordination in sensor networks”, *The 5th annual ACM/IEEE*

International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99), Seattle, WA, August (1999).

- [46] M. I. Brownfield, “Energy-efficient Wireless Sensor Network MAC Protocol”, *Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University*, Doctor of Philosophy, Blacksburg, Virginia, 103, (2006).
- [47] Kohvakka, M., Kuorilehto, M., Hannikainen, M., Hämäläinen, T.D., “Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications”, *The 3rd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks (PEWASUN'06)*, Terromolinos, Spain, 48-57, October (2006).
- [48] “Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)”, *IEEE Std. 802.15.4 Std.*, (2003).
- [49] Guimaraes, G., Souto, E., Sadok, D., Kelner, J., “Evaluation of Security Mechanisms in Wireless Sensor Networks”, *The 2005 Systems Communications (ICW'05)*, Washington, DC, 428 – 433, , August (2005).
- [50] Ramachandran, I., Das, A.K., Roy, S., “Analysis of the Contention Access Period of IEEE 802.15.4 MAC”, *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, Volume: 3, Issue: 1, (2007).
- [51] Elmenreich, W., Pitzek, S., 2003, “Smart Transducers - Principles, Communications and Configuration,” [Online] <http://www.vmars.tuwien.ac.at/~wilfried/papers/2003/rr-10-2003.pdf>, (**Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2009**)
- [52] VERTEL Corporation, 2003, “Smart Transducer Interface Specification” [Online], <http://www.omg.org/docs/formal/03-01-01.pdf>, (**Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2009**)
- [53] “Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators—Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats”, *IEEE Std. 1451.0 Std.*, (2007).
- [54] “Advantages of Using Smart Sensors and Wireless Sensor Networks” [Online], http://www.smartsensorsystems.com/Advantages_of_using_wireless_sensors.htm, (**Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2009**).
- [55] Song, E.Y., Kang Lee, “Understanding IEEE 1451-Networked smart transducer interface standard - What is a smart transducer?” , *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Volume: 11, Issue: 2, 11 – 17, (2008).
- [56] “Crossbow TelosB Mote Datasheet” [Online], http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/TelosB_Datasheet.pdf, (**Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2009**).

- [57] Vieira, M.A.M, Coelho, C.N., Junior, D.C.S., Mata, J.M., "Survey on Wireless Sensor network Devices", *Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'03*, Volume: 1, 537-544, September (2003).
- [58] Lewis, F.L., "Wireless Sensor Networks", *Smart Environments: Technologies, Protocols, Applications*, D.J. Cook ve S.K. Das, Wiley, 11-46 , (2004).
- [59] Ali, S.J., Roy, P., "Energy Saving Methods in Wireless Sensor Networks", Master Thesis, *School of Information Science, Computer and Electrical Engineering Halmstad University*, Halmstad, Sweden, 17 , (2008).
- [60] "Crossbow MICAz Mote Datasheet" [Online], http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAZ_Datasheet.pdf, (**Ziyaret Tarihi : 28 Haziran 2009**).

ÖZGEÇMİŞ

1984'te İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini Tekirdağ'da, orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2002 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Öğretmenliği Bölümü'nden 2006 yılında Elektronik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir. 2008 yılından beri Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.