

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RADYO YAYILIM MODELLERİNİN KABLOSUZ ALGILAYICI
AĞLARIN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Sinan KURT

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Ağustos 2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkan V.

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **121217702** numaralı Doktora Öğrencisi olan **Sinan KURT**'un ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**RADYO YAYILIM MODELLERİNİN KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**" başlıklı tezi **05.08.2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Bülent TAVLI**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Ali KARA (Başkan)**
Atılım Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Harun Taha HAYVACI
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Reza Zare HASSANPOUR
Çankaya Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Sinan KURT

ÖZET

Doktora Tezi

RADYO YAYILIM MODELLERİNİN KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Sinan KURT

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Tarih: Ağustos 2016

Kablosuz Algılayıcı Ağların (KAA) pratikte gerçekleşmesi hedeflenen işlevi en uygun şekilde yerine getirebilmeleri ancak algılayıcı düğümler arasındaki yol kaybı değerlerinin gerçekçi yol kaybı modelleri vasıtasıyla doğru olarak belirlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Birçok araştırma için kritik olan yol kaybı değerlerinin hesaplanmasında basit modellerinin kullanılması yanlış sonuçlar alınmasına ve tasarlanan KAA'nın gerçekçi olmayan değerler sebebiyle öngörülenden düşük performansla çalışmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeplerle KAA'larda gerçekçi yol kaybı modellemesi başarılı KAA tasarımı ve analizi için kritiktir. Bu amaçla temel Radyo Frekansı (RF) yayılım mekanizmaları, genel kablosuz haberleşme yol kaybı modelleri incelenmiştir. Ayrıca bu modeller içinden KAA karakteristiklerine uygun ve gerçekçi sonuçlar verebilen yol kaybı modelleri araştırılmıştır. Bu modeller nicel veriler ışığında karşılaştırılarak güçlü ve zayıf oldukları noktalar belirlenmiştir. Böylece KAA alanında çalışacak olan araştırmacılar için yol kaybı modeli seçimine yardımcı olacak bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca nicel karşılaştırması yapılmış olan modeller ile KAA'larda ağ yaşam süresi enbüyüklemesine yönelik karışık tamsayılı programlama temelli eniyileme modelleri tasarlanmıştır. Böylece yol kaybı modellemelerinin ağ yaşam süresine etkisi ve yanlış modellerin kullanımı ile oluşabilecek muhtemel hataların değerlendirilmesi yapılmıştır.

Son olarak ağ yaşam süresi enbüyüklemesine yönelik karışık tamsayılı programlama temelli eniyileme modelleri aracılığı ile kaynak ataması eniyilemesi yapılmıştır. Bu sayede akıllı şebeke uygulamalarına yönelik olarak algılayıcı düğümler arası haberleşmede kullanılan veri paketi boyutunun kablosuz algılayıcı ağının yaşam süresine etkisi

incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz algılayıcı ağlar, RF yol kaybı modelleri, Ağ yaşam süresi, Paket boyutu eniyileme, Matematiksel programlama.



ABSTRACT

Doctor of Philosophy

ANALYSIS OF THE IMPACT OF RADIO PROPAGATION MODELS ON WIRELESS SENSOR NETWORK LIFETIME

Sinan KURT

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Date: August 2016

Wireless Sensor Networks (WSNs) are to be operated on the aimed performance if and only if they are designed according to realistic path loss models for the links between sensor nodes. Most of the researches on WSNs uses simple path loss models that cause wrong results and designed WSN to operate at lower performance than the desired one. Realistic path loss modeling is critical for WSN design and analysis. Therefore basic propagation mechanisms, wireless communication models and models that are especially proposed for WSNs are examined. WSN specific path loss models are numerically analyzed and compared. For the researchers on WSN area, selection criterion for path loss modeling is presented.

Also these WSN specific path loss models are used in lifetime maximization framework based on mixed integer programming. Impact of path loss modeling is analyzed for network lifetime. Furthermore, errors caused by wrong path loss model usage is evaluated.

Moreover, a joint optimization scheme including transmission power control and packet size optimization for lifetime maximization in smart grid WSN applications is proposed. Effect of packet size in network lifetime is investigated.

Keywords: Wireless sensor networks, RF propagation loss models, Network lifetime, Packet size optimization, Mathematical programming.

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora çalışmam süresince değerli arkadaşlığını ve kıymetli yönlendirmelerini benden esirgemeyen saygıdeğer tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Bülent Tavlı'ya teşekkürlerimi ve saygımı sunarım. Bununla birlikte bu çalışmalar için uygun ortamı sağlayan, çalışana olmaktan gurur duyduğum ASELSAN A.Ő. çalışanları ve yöneticileri ile TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi ailesine sağladığı araştırma bursu ve desteğı için şükranlarımı sunmayı borç bilirim.

Tez çalışmalarım boyunca çalışmalarımın iyileşmesi noktasında değerli görüşleri için tez komitesi üyeleri "Atılım Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliğı" bölümünden Sayın Prof. Dr. Ali Kara'ya ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Harun Taha Hayvacı'ya, ayrıca tez savunmamda geliştirici görüşlerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Hakan Gültekin ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Reza Zare Hassanpour'a da teşekkür ederim.

Bu çalışmanın olgunlaşması noktasında değerli katkıları dolayısıyla Dr. Hüseyin Uğur Yıldız'a, emeklerini esirgemeyen Dr. Gökhun Selçuk ve Burak Söker'e içten teşekkürlerimi sunarım.

En önemlisi kendilerinden ödünç alınmış süreyi anlayışla karşılayan sevgili hayat arkadaşım Müzeyyen, anlayışlı çocuklarımız Ahmet Melih ve Selim Erdem'e minnet borçluyum.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | vi |
| TEŞEKKÜR | vii |
| İÇİNDEKİLER | viii |
| ŞEKİL LİSTESİ | x |
| ÇİZELGE LİSTESİ | xii |
| KISALTMALAR | xiii |
| SEMBOL LİSTESİ | xiv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 KAA'ların Kullanım Alanları | 2 |
| 1.2 Çalışmanın Amacı | 3 |
| 1.3 Katkılar | 4 |
| 2. RF YOL KAYBI MODELLERİ | 5 |
| 2.1 Kablosuz Haberleşmede RF Yol Kaybı | 7 |
| 2.1.1 Boşlukta yayılım modeli | 7 |
| 2.1.2 İki ışın yansıma modeli | 10 |
| 2.1.3 Logaritmik mesafe modeli | 13 |
| 2.1.4 Logaritmik gölgeleme modeli | 13 |
| 2.2 KAA Kısıtları | 14 |
| 2.3 KAA'lara Özgü Yol Kaybı Modelleri | 15 |
| 2.3.1 Basitleştirilmiş iki eğimli iki ışın yansıma modeli | 15 |
| 2.3.2 Tek eğimli logaritmik gölgeleme modeli | 17 |
| 2.3.3 İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli | 18 |
| 2.3.4 Basitleştirilmiş iki ışın yansıma modeli | 19 |
| 2.3.5 Değişken toprak yansıtma katsayısı modeli | 20 |
| 2.3.6 Açık alan yayılım modeli | 20 |
| 3. KAA'LARA ÖZGÜ YOL KAYBI MODELLERİNİN NİCEL KARŞILAŞTIRMASI | 23 |
| 3.1 Karşılaştırmada Kullanılan Veriler ve Yöntem | 24 |
| 3.2 Yol Kaybı Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi | 27 |
| 3.3 Sonuçlar, Değerlendirmeler ve Açık Konular | 39 |
| 4. KAA'LARDA YERE YAKIN ANTENLER İÇİN YOL KAYBI MODELLEMESİNİN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ | 43 |
| 4.1 Fiziksel Katman Parametreleri | 44 |
| 4.2 Matematiksel Programlama Modeli | 48 |
| 4.3 Analiz | 50 |
| 4.4 Sonuç | 54 |
| 5. KAA'LARDA PAKET BOYUTU ENİYİLEMESİ | 55 |
| 5.1 Giriş | 55 |
| 5.2 Fiziksel Katman Parametreleri | 57 |
| 5.3 Matematiksel Programlama Modeli | 62 |

| | |
|--|-----------|
| 5.4 Analiz | 64 |
| 5.5 Sonuç | 72 |
| 6. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR | 77 |
| KAYNAKLAR | 79 |
| ÖZGEÇMİŞ | 91 |



ŞEKİL LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1: İki ışın modeli gösterimi | 10 |
| Şekil 3.1: Beton Zemin için 868 MHz yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri 13 cm. | 28 |
| Şekil 3.2: Park için 868 MHz yol kaybı değerleri. Almaç ve göndermeç anten yükseklikleri 13 cm. | 28 |
| Şekil 3.3: Üniversite Bahçesi için 868 MHz yol kaybı değerleri. Almaç ve göndermeç anten yükseklikleri 13 cm. | 29 |
| Şekil 3.4: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 868 MHz'de senaryo karşılaştırması. | 30 |
| Şekil 3.5: Çayır için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m). | 31 |
| Şekil 3.6: Çayır için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m). | 31 |
| Şekil 3.7: Çayır için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m). | 31 |
| Şekil 3.8: Çayır için 2400 MHz deneysel modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m). | 32 |
| Şekil 3.9: Çayır için 2400 MHz deneysel modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m). | 33 |
| Şekil 3.10: Çayır için 2400 MHz deneysel modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m). | 33 |
| Şekil 3.11: Plaza için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m). | 33 |
| Şekil 3.12: Plaza için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m). | 34 |
| Şekil 3.13: Plaza için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m). | 34 |
| Şekil 3.14: Yürüyüş alanı için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m). | 34 |
| Şekil 3.15: Yürüyüş alanı için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m). | 35 |
| Şekil 3.16: Yürüyüş alanı için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m). | 35 |
| Şekil 3.17: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 2400 MHz'de senaryo karşılaştırması. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m). | 36 |
| Şekil 3.18: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 2400 MHz'de senaryo karşılaştırması. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m). | 37 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.19: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 2400 MHz’de senaryo karşılaştırması. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m). . | 37 |
| Şekil 3.20: LOS ve NLOS durumlar için 3500 MHz’de senaryo karşılaştırması (0.3m, 2.1m). | 37 |
| Şekil 3.21: LOS ve NLOS durumlar için 3500 MHz’de senaryo karşılaştırması (2.1m, 2.1m). | 38 |
| Şekil 4.1: Matematiksel programlama modeli. | 49 |
| Şekil 5.1: Matematiksel programlama modeli denklemleri. | 63 |



ÇİZELGE LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Çizelge 3.1: KAA'lara özgü önerilmiş olan yol kaybı modelleri | 24 |
| Çizelge 3.2: 868 MHz için tek eğimli gölgeleme modeli parametreleri [1] . . . | 25 |
| Çizelge 3.3: 2400 MHz için tek eğimli gölgeleme modeli parametreleri [2] . . . | 25 |
| Çizelge 3.4: 3500 MHz için tek eğimli gölgeleme modeli parametreleri [3] . . . | 25 |
| Çizelge 3.5: 868 ve 2400 MHz için iki eğimli gölgeleme modeli parametreleri [1] | 26 |
| Çizelge 4.1: Her bir güç seviyesi l için CC1000 radyosu kullanan Mica2 düğüm- lerinin gönderme devreleri güç tüketimi ($P_{tx}^{crc}(l)$ mW cinsinden) ve anten çıkış gücü ($P_{tx}^{ant}(l)$ mW cinsinden) | 46 |
| Çizelge 5.1: Her bir göndeme güç seviyesi- l için gönderme devreleri güç tüke- timi ($P_{tx}^{crc}(l)$ mW cinsinden) ve ilgili gönderme güç seviyesi ($P_{tx}^{ant}(l)$ dBm cinsinden). | 59 |
| Çizelge 5.2: Değişik akıllı şebeke ortamları için yol kaybı modeli parametreleri [4] | 60 |
| Çizelge 5.3: Belirlenen mesafeler ($d_{int} = d_n^m$), için başarılı tokalaşma olasılığı aralıkları ($E[p^{HS,s}]$), byte cinsinden eniyi paket boyutu (EPB) ve ay cinsinden ağ yaşam süresi (OUS-L,N, UNT-L,N senaryoları). . . | 66 |
| Çizelge 5.4: Belirlenen mesafeler ($d_{int} = d_n^m$), için başarılı tokalaşma olasılığı aralıkları ($E[p^{HS,s}]$), byte cinsinden eniyi paket boyutu (EPB) ve ay cinsinden ağ yaşam süresi (IMP-L,N senaryoları). | 67 |

KISALTMALAR

| | |
|---------------|---|
| ACK | : Veriyi Onaylayan Paket (İng. Acknowledgment Packet) |
| FOM | : Açık Alan Yayılım Modeli (İng. Free-Space Outdoor Model) |
| FSK | : Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (İng. Frequency Shift Keying) |
| GAMS | : Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (İng. The General Algebraic Modeling System) |
| KAA | : Kablosuz Algılayıcı Ağ (İng. Wireless Sensor Network) |
| KTDP | : Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (İng. Mixed Integer Linear Programming) |
| MATLAB | : MATris LABORatuvarı (İng. Matrix Laboratory) |
| MP | : Matematiksel Programlama (İng. Mathematical Programming) |
| O-QPSK | : Öteli Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama (İng. Offset Quadrature Phase Shift Keying) |
| PRR | : Paket Alma Oranı (İng. Packet Reception Rate) |
| RAM | : Rastgele Erişim Hafızası (İng. Random Access Memory) |
| RF | : Radyo Frekansı (İng. Radio Frequency) |
| RSSI | : Radyo Sinyal Seviyesi Göstergesi (İng. Radio Signal Strength Indicator) |
| SNR | : Sinyal Gürültü Oranı (İng. Signal-to-Noise Ratio) |
| TCP | : İletim Kontrol Protokolü (İng. Transmission Control Protocol) |
| TDMA | : Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (İng. Time Division Multiple Access) |
| VSR | : Değişken Toprak Yansıtma Katsayısı (ing. Variable Soil Reflectivity) |
| WIMAX | : Mikrodalga Erişim için Birlikte Çalışılabilirlik (ing. Worldwide Interoperability for Microwave Access) |

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler | Açıklamalar |
|--------------------------|--|
| d_0 | Referans uzaklık (1 m) |
| d_{ij} | i düğümü ile j düğümü arasındaki mesafe (m) |
| $E[Y_{ij}]$ | (i, j) linki üzerinde ortalama yol kaybı değeri (dB) |
| E_b/N_0 | Bit başına düşen SNR |
| E_{DA} | Veri alma enerjisi |
| $E_{rx,ji}^D(l, k)$ | Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle alıcı tarafta tüketilen toplam enerji miktarı (J) |
| $E_{tx,ij}^D(l, k)$ | Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle verici tarafta tüketilen toplam enerji miktarı (J) |
| $E[E_{rx,ji}^D(l, k)]$ | Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle alıcı tarafta tüketilen ortalama enerji miktarı (J) |
| $E[E_{tx,ij}^D(l, k)]$ | Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle verici tarafta tüketilen ortalama enerji miktarı (J) |
| $E_{rx}^{HS,f}$ | Başarılı olmayan bir tokalaşma için alıcı tarafta harcanan enerji miktarı (J) |
| $E_{rx}^{HS,s}(k, M_A)$ | Alıcı tarafta başarılı tokalaşma sonucu harcanan enerji miktarı (J) |
| $E_{tx}^{HS}(l, M_P)$ | Verici tarafta bir aralık süresi boyunca harcanan enerji miktarı (J) |
| $E[P_{rx,ij}^{ant}(l)]$ | (i, j) linki için ortalama alıcı sinyal gücü (dBm) |
| $E[P_{ij}^{HS,s}(l, k)]$ | (i, j) linki için ortalama başarılı tokalaşma olasılığı |
| E_{pp} | Paket işleme enerjisi |
| $E_{tx}^P(l, \varphi)$ | φ -bayt uzunluklu paketin l güç seviyesi ile iletilmesi için gereken enerji (J) |
| E_{rx} | 1 bit verinin alınması için gereken enerji (J) |
| $E_{tx,ij}$ | Düğüm- i 'den düğüm- j 'ye 1 bit veri göndermek için gereken enerji miktarı (J) |
| f_{ij}^{lk} | i düğümünden j düğümüne l güç seviyesi ile iletilen, bunun karşılığında k güç seviyesinde onaylanan paket sayısı |
| $G = (V, A)$ | Ağ topolojisini temsil eden yönlü grafik |
| I_{jn}^i | Girişim fonksiyonu |
| l_{mak} | Maksimum güç seviyesi |
| l_{min} | Minimum güç seviyesi |
| k_{ji}^{opt} | j düğümünden i düğümüne iletilen bir ACK paketi için seçilen optimum güç seviyesi |
| l_{ij}^{opt} | i düğümünden j düğümüne iletilen bir veri paketi için seçilen optimum güç seviyesi |
| M_A | ACK paket boyutu |
| M_P | Veri paket boyutu |

| | |
|------------------------|---|
| n | Yol kayıp katsayısı |
| N_N | KAA'daki düğüm sayısı |
| N_{rnd} | Ağ yaşam süresi (tur) |
| $P_{rx,ij}^{ant}(l)$ | (i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde iletim sonucu alıcı sinyal gücü (dBm) |
| $P_{tx}^{ant}(l)$ | Anten çıkış gücü |
| P_{rx}^{crc} | Alma güç harcaması |
| $P_{tx}^{crc}(l)$ | l güç seviyesi ile iletim güç harcaması (mW) |
| P_{DA} | Veri işleme için gereken güç |
| P_e | Bit hata olasılığı |
| $p_{ij}^f(l, \varphi)$ | (i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde iletilen φ -bayt uzunluklu paketin başarısız alınma olasılığı |
| $p_{ij}^{HS,f}(l, k)$ | Başarısız tokalaşma olasılığı |
| $p_{ij}^{HS,s}(l, k)$ | Başarılı tokalaşma olasılığı |
| P_n | Gürültü gücü (dBm) |
| $p_{ij}^s(l, \varphi)$ | (i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde iletilen φ -bayt uzunluklu paketin başarılı alınma olasılığı |
| P_{slp} | Uyku modunda güç tüketimi |
| P_{sns} | Hassasiyet seviyesi |
| R_{net} | KAA yarıçapı (m) |
| s_i | Her turda düğüm- i 'nin ürettiği veri paketi sayısı |
| S_L | Güç seviyeleri kümesi |
| $T_{bsy,i}$ | i düğümü için toplam meşgul olma süresi (ms) |
| T_{DA} | Veri işleme zamanı |
| T_{grd} | Koruma zamanı |
| T_{rnd} | Tur süresi |
| T_{rsp} | Gecikme zamanı |
| T_{slot} | Aralık süresi |
| $T_{tx}(\varphi)$ | φ -bayt uzunluklu paketin iletim süresi (ms) |
| V | Baz istasyonu dâhil olmak üzere tüm düğümlerin kümesi |
| W | Algılayıcı düğümler kümesi |
| X_σ | Ortalaması 0 ve standart sapması σ olan Gauss değişkeni (dB) |
| $\lambda_{ij}(l, k)$ | (i, j) linki üzerinde ortalama yeniden iletim oranı |
| ρ | Algılayıcı düğümlerin batarya enerjisi |
| σ | Gölgeleme Gauss değişkeninin standart sapması |
| Υ_0 | Referans uzaklıktaki yol kaybı |
| Υ_{ij} | (i, j) linki üzerinde yol kaybı (dB) |
| $\Psi_{ij}(l)$ | j düğümünde i düğümünün l güç seviyesinde iletiminden kaynaklı SNR (dB) |

1. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağları (KAA) değişik amaçlar için kullanılacak algılayıcılar (sıcaklık, nem, basınç vb.) vasıtası ile fiziksel ve çevresel durumların izlenmesine imkan sağlayan, kendi kendine çalışan ve her bir algılayıcının topladığı veriyi ortak bir noktaya iletmek üzere birbirine yardım edebilen düğümlerden oluşur [5]. Bu düğümlerden her biri kullanım amacına uygun bir algılayıcı (nem, sıcaklık, aydınlık vb.), bu algılayıcıların derlediği veriyi işleyen bir işlemci ve veriyi iletmek-almak işlemini sağlayan bir haberleşme ünitesinden oluşmaktadır. Düğümlerin her birinin topladığı veri merkezi bir şekilde kullanılmak üzere bir baz istasyonunda toplanır ve uygulamadaki ihtiyaca uygun olarak işlenir.

Kablosuz algılayıcı ağlarındaki en temel kısıt pil ile çalışan algılayıcıların enerjisini verimli bir şekilde kullanabilmektedir. İlk olarak kablosuz algılayıcı ağlarının gelişmesi bir çok diğer teknolojik gelişim gibi askeri uygulamalardaki sağladığı avantaj tarafından desteklenmiş olsa da zamanla bir çok endüstriyel ve ticari uygulamalarda da kendine ciddi bir yer bulmuştur.

Tarihsel olarak ilk gelişim alanının Vietnam savaşına kadar uzandığı söylenebilir [6]. Her ne kadar bu zamanlarda kullanılan algılayıcılar büyük ve pahalı olsa da günümüz algılayıcı düğümleri gayet küçük, kabiliyetli ve ucuz olarak temin edilebilir durumdadır [7], [8]. Bu özellikleri sebebiyle kablosuz algılayıcılar günümüzde haberleşme, lojistik, güvenlik, sınır gözetleme ve koruma, bölgesel gözetleme, endüstriyel otomasyon, akıllı şebekeler vb. bir çok alanda kendilerine geniş bir yer edinmişlerdir.

Bu algılayıcı düğümleri ihtiyaca göre değişken işlem gücü, boyut, enerji harcaması ve fiyat özelliklerine sahiptir. Temel olarak tüm ağlarda enerji kaynağı (pil), işlem gücü için işlemci, haberleşme için radyo frekansı (RF) almaç-göndermeç birimi ve havaya yayın yapıp havadaki yayını almak üzere anten birimleri bulunmaktadır. Bu birimlerin özellikleri uygulamaya yönelik olarak belirlenerek temelde enerji tüketimi, boyut, işlem gücü ve fiyat değişkenleri bakımından farklılaşmış düğüm alternatifleri ortaya çıkarmıştır.

Günümüzde KAA'lar ile ilgili yayınlanmış kitap, dergi, makaleler ve düzenli olarak tertip edilen uluslararası konferanslar araştırma konusunun endüstri ve akademik dünya açısından önemini ve gelişmeye açık yönünü ortaya koymaktadır.

1.1 KAA'ların Kullanım Alanları

KAA'ların kullanım alanları her ne kadar burada sıralayacağımız alanlarla kısıtlı olmasa da şu anda aktif olarak kullanıldığı önemli uygulama alanlarından bazıları şunlardır:

1. **Sağlık İzleme:** İnsanların sağlık durumunun evde veya hastanede düzenli izlenmesi ve kaydedilmesi amacıyla kullanılabilen algılayıcı düğümler genelde iki ana grup altına toplanabilir; giyilebilen ve vücut içine entegre edilebilen algılayıcılar. Bu algılayıcılar kişinin ölçülebilen sağlık değişkenlerinin izlenmesini kolaylaştırmaktadır [9, 10, 11].
2. **Akıllı Enerji Uygulamaları:** Enerjinin üretimi, dağıtımı, depolanması, kullanımını ve hatta fiyatlanması ile ilgili olarak parametrelerin takip edilmesi ve ihtiyaca göre arz-talep dengesinin düzenlenmesi noktasında KAA'lar ciddi bir kullanım alanına sahiptir [12, 13, 14, 15].
3. **Sınır - Alan Gözetleme:** Özellikle hareket algılama, izinsiz giriş tespiti uygulamaları KAA'ların askeri uygulamalarının başında gelmektedir. Ayrıca petrol ve gaz hatlarının güvenliğinin sağlanması da bu alandaki önemli uygulamalardandır [16, 17].
4. **Hassas Tarım Uygulamaları:** Temel olarak belirli bir bölgenin sıcaklık ve nem bilgilerinin izlenmesi ve ihtiyaca göre iyileştirici önlemlerin alınmasına imkan sağlayan bu uygulama alanı ürün verimliliğinin artırılmasını desteklemektedir [18, 19].
5. **Orman Yangını Algılama:** Orman arazisine yerleştirilecek sıcaklık, nem ve gaz algılayıcı düğümler sayesinde orman yangınının erken tespiti ve genişleme yönünün belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Böylece yangına erken ve doğru müdahale imkanı doğmaktadır.
6. **Otomasyon ve Cihaz Bakım İhtiyacı Belirleme:** Özellikle otomasyonun etkili olduğu endüstriyel alanlarda makinelerin bakım-arıza durumunun takip edilmesinde ciddi kaynak tasarrufu sağlanabilmektedir. Ayrıca hareketli aksamaların durumunun izlenmesinde kablolu sistemlerde var olan dezavantaj KAA'lar için söz konusu değildir.
7. **Su Miktarı ve Kalitesi Takip:** Nehir, göl, baraj, yeraltı sularının miktar ve kirlilik seviyelerinin ölçümünde kullanılabilen KAA'lar insan ve canlı sağlığı için kritik olan temiz su dağıtımını noktasında çok elverişli bir ağ oluşturmaktadır. Ayrıca sel-su baskını gibi afetlerin izlenmesi için kurulacak alt yapıların da temel yapı taşı olabilirler.
8. **Hava Kirliliği Tespiti:** Özellikle büyük şehirlerde hava kirliliği parametrelerini izlemek için KAA'lar kullanılabilir ve şu anda dünya üzerinde bazı şehirlerde aktif olarak kullanılmaktadır.

Bu alanlarla birlikte binaların sağlık durumu, veri kaydetme, toprak kayması tespiti, lojistik vb. bir çok alan daha KAA'ların uygulama alanı içerisinde sıralandırılır. Genel donanım özellikleri ve uygulama alanlarından bahsettikten sonra yazılım özellikleri (işletim sistemi) ve benzetim araçlarından da kısaca bahsetmek uygun olacaktır. Algılayıcı düğümler genel işlev yapılarından ziyade belirli ve spesifik işleri yapması beklendiğinde sahip oldukları işlemcilerin çok gelişmiş olmasına gerek yoktur. Hatta enerji tüketiimi ve fiyat açısından mümkün olan en basit işlemciler tercih edilebilir. Dolayısıyla işletim sisteminin belirli amaca hizmet etmesi yeterlidir [20]. KAA'lara özel olarak tasarlanmış olan TinyOS işletim sistemi bu mantıkla oluşturulmuştur. Bu işletim sistemi özel olarak veri paketi alma veya algılayıcı okuması gibi işlemlerle başlatılan fonksiyonlara sahiptir. Bu işlemlerin başlatılması süregelen diğer fonksiyonları teleyebilir. Benzer diğer işletim sistemleri [20] çalışmasında incelenebilir.

Ayrıca tüm bu bahsedilen yönleri ile KAA'ların gerçekçi ve sağlıklı kurulumunun tasarlanması, kullanım esnasında olabilecek aksaklıkların tahmini için benzetim araçları kullanılmaktadır. Bu benzetim araçlarından nde gelenleri OPNET, NS-2, OmNeT ++, ve TOSSIM olarak sıralanabilir [21, 22].

1.2 Çalışmanın Amacı

Çalışmada ncelikli olarak KAA'larda kullanılabilcek gerçekçi yol kaybı modellerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca yönelik olarak RF yayılımının temel mekanizmaları incelenmiş ve kablosuz haberleşmede yaygın olarak kullanılan yol kaybı modelleri araştırılmıştır. Ayrıca literatürde KAA'lara özgü olarak önerilmiş yol kaybı modelleri incelenmiştir. Bu yol kaybı modellerinin ayrıntılı sayısal karşılaştırmaları yapılarak çalışma frekansları ve anten yüksekliliği gibi önemli parametreleri farklı olan senaryolar için hangi modellerin kullanılabilceği belirlenmeye çalışılmıştır.

İkinci olarak bu yol kaybı modeli çalışmasının da yardımı ile 868 MHz'de çalışan algılayıcı düğümleri için gerçekçi fiziksel katman parametrelerini içeren karışık tamsayılı matematiksel programlama altyapısı oluşturulmuştur. Bu altyapı ile yere yakın anten yksekliliklerine sahip senaryolarda yol kaybı modellerinin ağ yaşam süresi tahminine etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu incelemeler farklı ağ yyklkleri ve yoğunluklarını içerecek şekilde geniş bir perspektifte yapılmıştır.

Son olarak benzer bir karışık programlama altyapısı 2.4 GHz'de yaygın olarak kullanılan KAA düğümleri için gerçekçi enerji tüketim değerleri ile fiziksel katman parametrelerini içerecek şekilde oluşturulmuştur. Bu model yardımı ile akıllı şebeke uygulamalarına yönelik olarak yapılmış yol kaybı ölümü sonuçları, oluşturulmuş fiziksel katman modelinde kullanılarak gerçekçi 6 farklı senaryo için düğümlerin kullandığı paket boyutunun ağ yaşam süresine etkisi derinlemesine incelenmiştir. Bu incelemeler, paket boyutu yaşam süresi ilişkisi, ağ yoğunluğuna göre bu etkinin değişimi, düğüm hassasiyet seviyesinin bu modellemedeki etkisi, düğüm çiftleri arasındaki sinyal gücünün paket boyutu seçimine etkisi gibi bir çok farklı yn içerecek şekilde çok boyutludur.

1.3 Katkılar

Çalışmanın KAA alanındaki katkıları şu şekilde sıralanabilir:

1. KAA'lara yönelik çalışmaların çoğu çok basit ve gerçekçi olmayan yol kaybı modellerini kullanmaktadır. Hatta genel olarak RF yayılım mekanizmaları ve modelleri ile ilgilenen araştırmacıların çok üstünkörü göreceği modeller çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla RF yayılım konularına uzak olan KAA araştırmacıları için mütevazı bir yol kaybı modellemesi rehberi olarak kullanılabilir.
2. Literatürde bulunan yol kaybı modellerinden KAA'lara özgü olarak önerilmiş olanların hangi senaryolar için avantajları hangi senaryolar için dezavantajları vardır karşılaştırmalı olarak görülebilir.
3. Yol kaybı modellerinin ilgilenilen senaryo için seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar ve varsayımlar öğrenilebilir.
4. Yol kaybı modellerinin ağ yaşam süresine etkisini inceleyen başka bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun tek örneği bu çalışmaların sonucu olarak yayınlanmış konferans bildirisi [23].
5. 2.4 GHz'de çalışan algılayıcı düğümler için enerji tüketimi, yol kaybı modellemesi içeren karışık tamsayı matematiksel modelleme altyapısı oluşturulmasıdır.
6. İlgili modelleme altyapısı ile veri paket boyutu ve gönderme güç kontrolünün ağ yaşam süresine birlikte etkisinin akıllı şebeke uygulamalarına yönelik KAA'lar için incelenmesidir.

Tezin ilerleyen kısımlarında öncelikle Bölüm 2'de kablosuz haberleşmede kullanılan RF yol kaybı modelleri incelenmiştir. Sonrasında Bölüm 3'te KAA'lara özgü yol kaybı modelleri anlatılmakta ve bu modellerin nicel karşılaştırılması yapılmaktadır. Bölüm 4'te KAA'larda yol kaybı modellemesinin ağ yaşam süresine etkisi, Bölüm 5'te ise enbüyük yaşam süresi için eniyi paket boyutu incelenmektedir. Son olarak Bölüm 6'da sonuçlar sunulmuştur.

2. RF YOL KAYBI MODELLERİ

KAA için pozisyon tahmini, ortam erişim kontrolü, eşleme, modülasyon, hata düzeltme, güvenlik, yönlendirme atama vb. alanlarda yapılan araştırma çalışmalarının bir çoğu dolaylı olarak yayılım ortamı ve algılayıcı düğümler arasındaki gerçekçi bir RF yol kaybı modeli ile yakından ilintilidir [24]. Bu modelin doğruluğu, hassasiyeti ve gerçeğe uygunluğu düğümlerin kapsama alanı, bu alan için gerekli gönderme güç seviyesi seçimi, algılayıcı düğümlerin ilgili alana dağılımının belirlenmesini, düğümler arası haberleşme için harcanan enerjiyi ve dolayısıyla tüm ağın toplam yaşam süresini doğrudan etkilemektedir [25].

Kurgulanan KAA topolojilerinin pratikte hedeflenen görevi en uygun şekilde yerine getirebilmeleri ancak algılayıcı düğümler arasındaki yol kaybı değerlerinin gerçekçi yol kaybı modelleri vasıtasıyla doğru olarak belirlenmesi ile mümkün olabilmektedir [26]. KAA'lar için yönlendirme atama protokolleri tasarlanırken basit yol kaybı modellerinin kullanılması pratik uygulamalarda bu protokollerin düzgün çalışmasının önünde büyük bir engel olacaktır. Ayrıca gönderme güç kontrolü mekanizmasının kullanılmasında önemli bir parametre olan SNR'nin (Sinyal gücü gürültü oranı, İng. Signal-to-Noise Ratio) belirlenmesinde de en önemli etken yine yol kaybı modellenmesinin gerçekçi olarak yapılabilmesidir [27, 28]. Bunlar göz önüne alındığında KAA yaşam süresi de temel olarak eniyi gönderme güç seviyesi ayarlaması ve paket kayıplarından kaynaklanan tekrar paket gönderme dolayısıyla harcanan ekstra enerjinin etkisi de yine doğru yol kaybı hesaplanması ile ilgilidir. Genel olarak incelendiğinde yol kaybının gerekirci değil de olasılıksal olduğu görülür. Ayrıca yol kaybı senaryoya, kullanılan haberleşme frekansına göre ve de zamana göre hızlıca değişebilmektedir. Dolayısıyla bu etkileri yansıtabilmek için olasılıksal yol kaybı modelleri genel olarak ortalama değer ve standart sapma gibi istatistiksel tanımlayıcılar kullanırlar.

Hücre sel haberleşme ve telsiz gibi geleneksel kablosuz haberleşme sistemleri için uzun yıllar boyunca kullanılan ve doğruluk ve hassasiyet değerleri kendini ispat etmiş olan yol kaybı modelleri bulunmaktadır [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]. Bu modeller zaman içerisinde saha ölçümleriyle elde edilen değerler vasıtasıyla uyarlamalar ve düzeltmeler ile güncellenmiştir. Buna rağmen KAA'lar için yapılan çalışmalarda sıklıkla yol kaybı hesapları yapılırken kullanılan modellerle ilgili frekans, anten yüksekliği, senaryo vb. parametrelerle ilgili varsayımlara dikkat edilmeden uygulamaya uygun olmayan modeller kullanılmaktadır [38]. Bu da doğal olarak KAA mimarileri ve protokollerinin hatalı olarak tasarlanması veya analiz edilmesine yol açmaktadır.

Kablosuz haberleşme literatüründe açık alana ve kapalı alan RF yayılım mekanizmaları incelenmiştir ve özgül uygulamalar için değişik deneysel ve istatistiksel modeller oluşturulmuştur [39, 40, 41]. Fakat KAA'ların genel uygulamaları düşünüldüğünde literatürdeki bir çok modelin direk kullanılmadığı görülmektedir. Literatürdeki gözden geçirme makaleleri KAA yayılım ve yol kaybı modelleri ile ilgili kısıtlı bölümler içermektedir.

Bu makalelerin ağırlık verdiği konular ağ davranışı, ağ topolojisi, sistem seviyesi modelleme [42], KAA genel uygulama alanları ve karakteristikleri [38, 43], KAA benzetim ve hata ayıklama araçları [44, 45, 46] ve de KAA problemlerinin çözümü için katmanlar arası yaklaşımla tasarım [47, 48, 49, 50] alanlarında yoğunlaşmıştır.

KAA'larda düğümler arası sinyal haberleşmesi için yayılım mekanizmalarının etkisi, sinyal algılama, güç tüketim verimliliği, frekans seçimi ve üretimi gibi fiziksel katmanla ilgili parametrelerin önemi vurgulanmıştır [51]. Sinyal yayılımının farklı yönlerinin araştırması ve düğümler arası link kalitesi göstergesi önerisi yapılmıştır [52]. Bunların ötesinde özgül KAA uygulama alanlarına, örneğin yeraltı uygulamalarına, yönelik gözden geçirme çalışmaları da bulunmaktadır [53]. Ne yazık ki KAA uygulamalarına özgül parametrelere dikkat edilerek oluşturulmuş yol kaybı modelleri noktasında literatürde bir boşluk bulunmaktadır. Genel kablosuz haberleşme modellerinden hangilerinin kullanılabileceği, aradaki farklılıkların ne olduğu veya hangi modellerin neden kullanılmayacağına yönelik bilgiler noktasında ciddi bir farkındalık eksikliğinden bahsedilebilir. Dolayısıyla bu noktalardaki boşluğun doldurulmasının, bu hususta ağ parametreleriyle ilgilenen araştırmacılar için fiziksel katman parametrelerine dair farkındalık oluşturmanın ve doğru yol kaybı modelleri kullanımına katkı sağlamanın önemli olduğu düşünülmektedir. Özellikle KAA'ların geniş bir uygulama alanı olduğunu düşündüğümüz açık alan karasal uygulamalarına yönelik bir gözden geçirme çalışması bulunmamaktadır, sadece karasal kablosuz haberleşmeyi hedefleyen ve KAA'lar için direk kullanılması mümkün olmayan modelleri içeren teknik rapor [54] dışında bu alanda kapsamlı bir çalışmadan söz etmek zordur.

Özellikle KAA'ya özgül fiziksel parametreler göz önünde bulundurularak yapılacak böyle bir çalışmanın KAA alanında araştırma yapan fakat fiziksel katman, yayılım mekanizmaları, yaklaşımlar ve modeller noktasında kısıtlı bilgi sahibi araştırmacılar için sağlayacağı destek yadsınamaz olacaktır. Dolayısıyla bu ve takip eden bölümlerin temel hedeflerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- Kablosuz haberleşme için kullanılan yayılım-yol kaybı modellerinin kısa bir özetini vermek.
- Açık alan karasal KAA uygulamalarında kullanılan özgün teorik yol kaybı modellerini açıklamak ve genel yayılım mekanizmalarını açıklayarak okuyucuyu kullanılacak modellerin özgül uygulamaya uygunluğunu değerlendirebilir hale getirecek bilgiyi sağlamak.
- Teorik modeller dışında araştırmacılar tarafından raporlanmış KAA'lara özgü yol kaybı modellerini listeleyerek genel olarak kullanılan modeller ve dezavantajlı oldukları noktalar hakkında farkındalık sağlamak.
- Farklı senaryolar altında ve farklı frekanslar için teorik ve deneysel modellerin

karşılaştırmalarını yapabilecek şekilde sayısal analizler sunmak.

Bu çalışmada açık alan KAA'larda, hareketli algılayıcı düğümler için ve 2.1m'den düşük anten yükseklikleri için yol kaybı modellerinin özellikle hedeflendiğini vurgulamak gerekmektedir. KAA uygulamaları öngörülen bu alanlarla kısıtlı değildir, araç içi araçlar arası, bina içi, yeraltı, insan vücudu gibi çok farklılaşan yayılım ortamları KAA uygulamalarının alanına girmektedir ancak hepsi ayrı ayrı ele alınması gereken ortamlardır. Örneğin bina içi KAA uygulamalarına yönelik bir çok çalışma bulunmaktadır [55, 56, 57, 58]. Dolayısıyla bu kısımda verilecek yol kaybı modellerinin her KAA için direk kullanılmayacağı aşikardır.

Bu bölümde öncelikle yayılım mekanizmalarından kısaca bahsedilecek ve genel kablolu haberleşme yol kaybı modelleri verilecektir. Daha sonra KAA'lara özgü kısıtlar ele alınacak ve son olarak da KAA'lara özgü olarak önerilmiş yol kaybı modelleri incelenecektir. Bu modellerin karşılaştırması ise sonraki bölüme bırakılacaktır.

2.1 Kablosuz Haberleşmede RF Yol Kaybı

RF yayılım modelleri temel olarak belirli bir göndermeç almaç arası mesafe için ortalama güç düşüşünü ve bu belirli mesafe etrafındaki küçük mesafe değişimleri için alınan güç kaybındaki değişimlerle ilgilenir [59]. Güç düşüşündeki değişiklik yayılım yolu üzerinde gerçekleşen değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Göndermeç ve almaç arası göreceli mesafenin değişimi, almaç ve göndermeç sabit olsa bile ikisi arasında gölgelemeye sebep olan nesnelere veya ikisi arasındaki hareketli nesnelere dolayısıyla güç düşüşü değişebilmektedir. Uzaysal veya zamansal değişime göre yol kaybı modelleri büyük ölçekli ve küçük ölçekli yol kaybı modelleri olarak iki gruba ayrılabilir [60]. Büyük ölçekli yol kaybı modelleri uzaysal olarak geniş ölçekli göndermeç almaç mesafesi değişimleri ve zamansal olarak uzun süreli zaman periyotlarındaki ortalama güç düşüşü değişimlerini karakterize ederler. Büyük ölçekli yol kaybı temelde RF gücünün küresel yayılımından ve yol üzerinde gölgeleme yapan engellerden etkilenir. Büyük ölçekli yol kaybı modelleri kapsama alanı tahminlerinde kullanılmak üzere çok faydalıdır. Diğer taraftan küçük ölçekli yol kaybı modelleri ise göreceli küçük uzaysal değişimlerdeki (burada küçüklük ilgi konusu olan dalga boyu ile orantılı olarak değerlendirilmelidir) veya kısa zaman değişimindeki güç düşüşü değişimleri ile ilgilenir [61]. Burada daha çok büyük ölçekli yol kaybı modelleri üzerinde durulacaktır. Çünkü açık alan KAA'ların veri hızı ve haberleşme süreleri düşünüldüğünde küçük ölçekli değişimlerden çok fazla etkilenmedikleri varsayılabilir [1].

Gelişmiş yol kaybı modellerini anlamaktaki temel olarak kullanılacak model boşlukta yayılım modelidir.

2.1.1 Boşlukta yayılım modeli

Boşlukta yayılım modelindeki temel varsayım göndermeç ve almaçın kendileri dışında herhangi bir engel olmadan tamamen boşlukta bulunduğu ve RF sinyallerin küresel

yayılımına engel olacak herhangi bir cismin ne almaç göndermeç yolu üzerinde ne de yansıtıcı olarak herhangi bir noktada bulunmadığıdır [62]. Almaç ve göndermeç arasında engel olmaması durumu görüş hattının temiz olduğu durumlardır (ing. Line-of-sight, LOS). Dolayısıyla boşlukta yayılım durumunda LOS yol dışında herhangi bir yansıtıcı yüzey etkisi oluşturacak nesne olmaması kritiktir. Ayrıca bu model almaç ve göndermeç antenlerinin birbirlerinin uzak alan bölgesinde olmasının garantilendiği Fraunhofer mesafesinde olduğu durumda geçerlidir [61]. Fraunhofer mesafesi, d_f ,

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada D antenlerin en büyük boyutunu ve λ ise ilgili frekanstaki dalga boyunu göstermektedir.

Boşlukta yayılım modeli Friis aktarım denkleminde dayanmaktadır [63]. Bu denklemde RF gücün küresel olarak yayılımı esnasında uzayda oluşan güç yoğunluğu temel alınmıştır ve bu güç yoğunluğunun almaç anteninde antenin efektif alma alanı ile çarpılarak toplam alınan güç hesaplanmıştır.

$$P_r = \frac{P_{tot}}{4\pi d^2} A_e \quad (2.2)$$

Burada d , almaç göndermeç arası mesafeyi, A_e ise efektif anten alanını göstermektedir. P_{tot} ise toplam gönderme gücünü göstermektedir ve göndermeç gücü, P_t ile göndermeç anteninin kazancının, G_t , çarpımı olarak $P_{tot} = P_t G_t$, şeklinde hesaplanır.

Efektif anten alanı, A_e almaç anteninin fiziksel boyutu ile alakalıdır ve

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad (2.3)$$

denklemleri ile hesaplanır. G_r almaç anteni kazancını ve λ ise dalga boyunu göstermektedir. Denklem 2.3 ve Denklem 2.2 birlikte kullanılarak boşlukta yayılım modeli elde edilir:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2.4)$$

Modeli tamamlamak üzere sistem kayıpları, L , da denkleme eklenebilir. Denklem 2.4'te görüldüğü üzere boşlukta yayılım modelinde alınan güç almaç göndermeç arası mesafenin karesi ile azalmaktadır. Gerçek hayatta boşlukta yayılım modelinin birebir uygulanabileceği çok az durum vardır. Çünkü temiz LOS yol dışında bir çok durumda engeller, yansıtıcı yüzeyler bulunmaktadır. Dolayısıyla diğer yayılım etkilerinin de yol kaybı modellerine dahil edilmesi gerekmektedir. Temel yayılım mekanizmaları şu ana başlıklara ayrılabilir:

- Yansıma
- Saçılım

- Kırınım

Bu mekanizmaların önemi ise her biri gönderme sinyalinin farklı genlik ve fazlara sahip yeni kopyalarının oluşmasına sebep olmasından kaynaklanmaktadır. Bu farklı kopyaların almaçta toplanması ile de genlik ve faz farklılıklarına göre toplam alınan sinyalin seviyesi değişmektedir. Bu etkilerin toplamı ile LOS yoldan alınan sinyale göre değişim olur ve bu değişim farklı yollardan gelen sinyallerin genlik ve fazlarının durumuna göre iyileşme veya kötüleşme şeklinde olabilir. Bu mekanizmaların her birini kısaca incelemek uygun olacaktır.

Yansıma yayılan dalganın kendi dalga boyuna göre düz sayılan (nesnenin pürüzlülüğünün dalga boyuna göreceli olarak düşük olduğu durumda) ve dalga boyundan büyük boyutlara sahip bir nesne ile karşılaştığı zaman gerçekleşir. Dolayısıyla yansıtıcı yüzeyin karakteristiği ilgili dalganın frekansı ile ilintilidir. Bundan ötürü bir frekansta yansıtıcı olarak davranan bir yüzey başka bir frekansta normal bir yansıtıcıdan ziyade dalgayı kıran veya dağıtan bir nesne olarak davranabilir. Örneğin duvar sıvası GHz altı frekanslar için yansıtıcı olarak iş görürken milimetre dalga boylarında ise pürüzlü bir yüzey olarak davranmaya başlamaktadır. Buna rağmen genel olarak GHz altı frekanslar için bina yüzeyleri, duvarlar vb. yüzeyler yansıtıcı yüzeylere örnek verilebilir.

Saçılım ise yansımada olduğu gibi çarpan dalganın genel karakteristiği bozulmadan belirli yönde yansıtılması değil de değişken yönlere doğru saçılması ve dağılmasını ifade etmektedir. Dalga boyuna göre nesnenin pürüzlülüğü arttığı durumda ise ilgili nesne yansımadan daha çok saçılıma sebep olmaya başlamaktadır. Ayrıca dalga boyuna göre boyutları küçük olan çok sayıda engel grubu ile karşılaşan dalga da pürüzlü yüzeyle karşılaşmış gibi etkise maruz kalır ve her bir küçük engel dalganın farklı yönlerde saçılmasına ve dağılmasına sebep olabilir. Saçılım temel olarak farklı yönlere doğru yeniden yayılımın toplam etkisidir. Aslında saçılımın bir çok durumda LOS sinyalin bozulması yönünde etkisi olmakla birlikte, özellikle milimetre dalga boylarındaki sinyaller için kapsama alanlarında engellerden kaynaklanan gölgelenmiş alanlara sinyalin ulaşmasına sebep olmak gibi pozitif bir etkisi de olabilmektedir. Saçılım ile ilgili olarak Rayleigh kriteri kullanılabilir [64]. Bu kriter gereğince eğer bir yüzeyin en büyük pürüz seviyesi kritik pürüzlülük seviyesinden daha fazla ise o zaman yansıma katsayısının bir de saçılım katsayısı ile çarpılarak kullanılması gerektiğini ifade etmektedir. Kritik pürüzlülük seviyesi ise

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (2.5)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada θ_i dalganın yüzeyin normali ile olan isabet açısını göstermektedir.

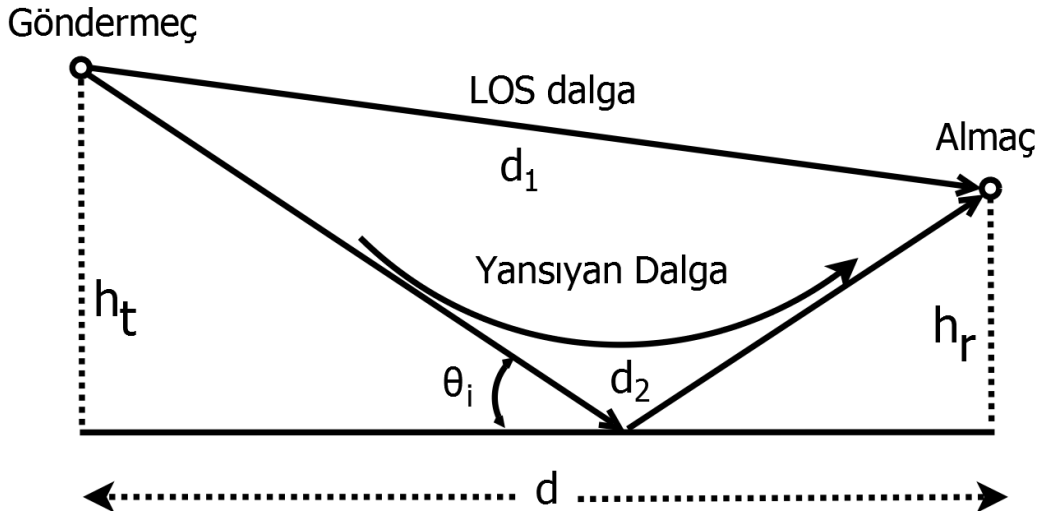
Kırınım ise genel olarak bir göndermeç almaç yolu üzerindeki bir engelin kenarlarında oluşmaktadır ve bu etki keskin veya yuvarlak kenarlarda da oluşabilmektedir [65], [66]. Kırınım yine saçılımda olduğu gibi LOS sinyali belli seviyede bloklayan engellere rağmen kırılan dalgalar sayesinde direk görüşü olmayan noktalara gönderme sinyallerinin ulaşmasına neden olabilmektedir. Ağaç tepeleri, bina kenarları, tepeler kırınımına sebep olabilen nesnelere örnek verilebilir. Kırınım etkisi yükseklik değişimlerinin korelasyon uzunluğu gibi parametrelere bağlıdır [67]. Genel olarak kırınım kaybı göndermeç almaç arasındaki LOS yolun bloklanma yüksekliği arttıkça artmaktadır.

Kablosuz haberleşme için elektromanyetik dalganın yayılımı modellenirken bu bahsedilen mekanizmaların göz önüne alınması ayrıca göndermeç almaç pozisyonunun, engellerin durumunun ve çevresel koşulların değerlendirilmesi gerekmektedir. Bununda ötesinde modelleme çalışmaları esnasında alınan ölçüm sonuçları ile model oluşturulurken veya var olan modeller için düzeltmeler yapılırken bu mekanizmaları anlamak gerçekçi modellerin oluşturulmasında ve değerlendirilmesinde yok sayılmaz bir değere haizdir.

Bu mekanizmalar düşünüldüğünde tek başına boşlukta yayılım modelinin ilgililenen senaryonun durumuna göre açık alan karasal kablosuz haberleşme ve özellikle KAA'lar için ne kadar yanlış sonuçlara sebep olabileceği aşıkardır. Dolayısıyla KAA'lara özel olarak önerilen yol kaybı modellerine geçmeden önce diğer yaygın olarak bilinen kablosuz haberleşme yol kaybı modellerini incelemek faydalı olacaktır.

2.1.2 İki ışın yansıma modeli

Boşlukta yayılım modelindeki LOS yol üzerinden ulaşan tek dalganın yanında yerden yansıyan sinyalde baskın olarak almaca ulaştığı karasal haberleşme durumlarında yaygın olarak kullanılan iki ışın yansıma modeli ismini de baskın olarak yerden yansıyan sinyalde hesaplamalara katılmasından almaktadır. Temel olarak LOS sinyal ile birlikte yansıyan sinyalin de genlik ve fazının geometrik optik yardımı ile bulunması ve toplam sinyalin mesafeye göre hesaplanması mantığına dayanmaktadır. Bu modelde düz Dünya varsayımı yapılmaktadır. Temelde varsayılan senaryo Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: İki ışın modeli gösterimi

Almaçtaki sinyali hesaplamak için LOS elektrik alan vektörü, E_{LOS} , ve yansıyan elektrik alan vektörü, E_{Γ} kullanılır. Bu elektrik alan vektörleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$E_{LOS}(d_1, t) = \frac{E_0 d_0}{d_1} \cos \left(w_c \left(t - \frac{d_1}{c} \right) \right) \quad (2.6)$$

$$E_{\Gamma}(d_2, t) = \Gamma \frac{E_0 d_0}{d_2} \cos \left(w_c \left(t - \frac{d_2}{c} \right) \right) \quad (2.7)$$

Burada E_0 , d_0 referans mesafesindeki boşlukta yayılım elektrik alanı, Γ yüzeyin yansıma katsayısı, d_1 ve d_2 ise sırasıyla LOS dalganın ve yansıyan dalganın kat ettiği mesafeleri göstermektedir. Bu iki dalga arasındaki faz farkının hesaplanması için d_1 ve d_2 mesafeleri arasındaki fark da önemli olacaktır ve geometrik bağıntılar yardımıyla Denklem 2.8'deki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta = d_2 - d_1 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (2.8)$$

Yüzeyin yansıma katsayısı bir çok pratik kullanımda çok önemsenmemesine rağmen çarpma yüzeyi ile sahip olunan polarizasyonun durumuna göre paralel polarize ve dik polarize dalgalar için değişmektedir.

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{-\varepsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\varepsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (2.9)$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (2.10)$$

Bu denklemlerde ε_r yer yüzü dielektrik sabitini göstermektedir ve toprağın nemlilik durumuna göre 4 ile 25 arasında değişkenlik göstermektedir [39]. Dikkat edilirse çok küçük θ_i değerleri için ε_r ve dalganın polarizasyonundan bağımsız olarak Γ 'nın 1'e çok yakın bir değer aldığı (aslında paralel polarize durum için -1 'e dik polarize durum için ise $+1$ yaklaşmaktadır fakat genlik açısından önemli değildir) görülecektir. θ_i değerinin çok küçük olması ancak d değerinin göndermeç anten yüksekliği h_t ve almaç anten yüksekliği h_r dan çok büyük olması durumunda gerçekleşebilmektedir. Dolayısıyla çok büyük d değerleri için Denklem 2.6 ve 2.7'de görüleceği üzere elektrik alan genlik değerleri birbirine yaklaşık eşit hale gelmektedir. Bu durumda iki elektrik alan vektörü arasındaki faz farkı baskın faktör haline gelmektedir. Dolayısıyla bu varsayım ve yaklaşımlar altında $t = d_2/c$ anındaki toplam elektrik alan E_{tot} , Denklem 2.7 ve 2.8'in de kullanımı ile paralel polarize dalga için,

$$E_{tot}(d) = \frac{E_0 d_0}{d_1} \cos \left(w_c \frac{\Delta}{c} \right) + (-1) \frac{E_0 d_0}{d_2} \cos 0 \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada dik polarize dalgalar için -1 'in $+1$ alınması gerektiğine dikkat etmek gerekmektedir. $\theta_{\Delta} = w_c \Delta / c$ şeklinde tanımlayarak ve trigonometrik eşitlikleri kullanarak vektör toplamının genliği elde edilir,

$$|E_{tot}(d)| = 2 \frac{E_0 d_0}{d} \sin \left(\frac{\theta_{\Delta}}{2} \right) \quad (2.12)$$

Böylece elektrik alan vektörünün genliği Denklem 2.12 ile hesaplanmış olur. Ayrıca

fazı da hesaplayabilmek için d değerinin göndermeç anten yüksekliği h_t ve almaç anten yüksekliği h_r dan çok büyük olması varsayımı ile Denlem 2.8 şu hale gelir:

$$\Delta \approx \frac{2h_t h_r}{d} \quad (2.13)$$

Eğer $\theta_\Delta/2$, 0.3 radyandan küçük ise trigonometrik eşitlikler vasıtasıyla $\sin(\theta_\Delta/2) \approx \theta_\Delta/2$ yaklaşımında bulunabiliriz ve bu durumda aşağıdaki şartlı eşitsizlik geçerli olur:

$$\frac{\theta_\Delta}{2} \approx \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} < 0.3 \text{rad} \Rightarrow d > \frac{20\pi h_t h_r}{3\lambda} \quad (2.14)$$

Dolayısıyla temelde çok büyük d varsayımı altında bu yaklaşık değerler ile Denklemler 2.12 şu hale gelir:

$$E_{tot}(d) \approx 2 \frac{E_0 d_0}{d} \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \propto \frac{1}{d^2} \quad (2.15)$$

Bu durumda almaçtaki güç de elektrik alanın karesi ile orantılı olacağı için,

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Böylece iki ışın yansıma modeli için yol kaybı çok büyük d varsayımı için dB cinsinden,

$$PL = 40 \log d - 10(\log G_t + \log G_r + 2 \log h_t + 2 \log h_r) \quad (2.17)$$

şeklinde kullanılır. Burada dikkat edilmesi elzem olan ancak modelin yaygın kullanımında göz ardı edilen nokta Denklem 2.17'nin geçerli olduğu varsayımların ilgili uygulamada sağlanıp sağlanmadığıdır. Şu da unutulmamalıdır ki eğer d değeri anten yüksekliklerine göreceli olarak yeterince büyük değilse yaklaşımlarla elde edilen Denklem 2.15 yerine Denklem 2.11 kullanılmaya devam edilmelidir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta iki ışın modeli için yaygın olarak bilinen ve Denklem 2.16'da da gözükken gücün $1/d^4$ ile düşmesi fenomeni ancak belirli bir mesafeden sonra gerçekleşmesidir ve bu mesafe genellikle kritik kırılım noktası olarak adlandırılır. Bu kritik kırılım noktası d_b ,

$$d_b = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade elde edilirken Denklem 2.13 için yansıyan sinyalin fazının tam olarak döndüğü $\theta_\Delta = \pi$ koşulu kullanılarak elde edilmiştir. İleride tekrar değinileceği gibi bu mesafe için çıkarılan ifade deneysel sonuçlarla da teyit edilmektedir [1], [2].

İki ışın yansıma modeli uygun senaryolarda kullanılması durumunda kablosuz haberleşme için gerçekten kendini ispat etmiş çok kullanışlı bir teorik modeldir. Ancak teorik bir model olarak tabiki elektromanyetik yayılım mekanizmalarının hepsinin etkisini yansıtmakta eksik kalmaktadır. Bu sebeple teorik modellerin pratik uygulamalarda kullanılırken gerçeğe daha yakın hale getirilebilmesi için saha ölçüm sonuçlarının mo-

dellenmesi mantığına dayanan deneysel modeller de literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada ölçüm sonuçları belirli bir fonksiyona veri uyumlaması yöntemi ile uyumlanarak benzer senaryolar için artık bu fonksiyonun sayısal değerlerinin kullanılması temel alınmaktadır. Bu deneysel modellerin en büyük artısı teorik modeller tarafından dahil edilemeyen yayılım mekanizmalarının etkisinin ölçüm verileri içerisinde dolaylı olarak dahil edilmiş olmasıdır. Takip eden alt bölümlerde yaygın olarak kullanılan deneysel modeller verilmiştir.

2.1.3 Logaritmik mesafe modeli

Teorik olarak elde edilen modeller ve deneysel ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda yol kaybı değerinin almaç göndermeç arası mesafenin belirli bir kuvveti ile değişen değerlerinde logaritmik olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu ilişki matematiksel olarak,

$$PL_{ort}(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.19)$$

denklemini gösterilmektedir. Burada $PL_{ort}(d)$ d mesafesi için ortalama yol kaybı değerini, $PL(d_0)$, d_0 göndermeç yakınlarında alınan bir referans mesafesinde ölçülen yol kaybını, n yol kaybı oranını göstermektedir. Uygulamaya bağlı olarak d_0 1 m, 10 m veya 100 m gibi değerler alınabilir. Eğer $PL(d_0)$ referans mesafesi için yol kaybı ölçümü alınmamış ise genel yaklaşım d_0 mesafesi için boşluk yol kaybı değerini kullanmak yönündedir. Bu modelde en önemli parametre n yol kaybı oranıdır. Bu parametre ortama ve senaryoya göre değişmektedir ve yapılan deneysel çalışmalar 2 ile 6 arasında geniş bir aralıkta değişebildiğini göstermektedir [68]. Dikkat edilirse daha önce verilen boşlukta yayılım ve iki ışın yansıma yol kaybı modelleri için bu değerlerin sırasıyla 2 ve 4 olduğu görülür. Genel eğilim olarak çalışma frekansı yükseldikçe n değeri de yükselmektedir. Ayrıca sabit bir çalışma frekansı için almaç ve göndermeç antenlerinin yerden yüksekliği arttıkça n değerinin düşmeye başladığı gözlenmektedir [32]. Bununla birlikte yine çalışmalar göstermektedir ki n değerinin 4 ten büyük olduğu ortamlar bina içi veya gölgelemelere sebep olan yoğun engelli açık alan ortamlarıdır. Örneğin Avrupa’da ormanlık alanlarda yapılan ölçümlerde $n = 4.96$ değeri raporlanmıştır [69].

2.1.4 Logaritmik gölgeleme modeli

Şu ana kadar incelenilen boşlukta yayılım, iki ışın yansıma ve logaritmik mesafe modellerinin hiç birinde istatistiksel bir değişken yoktur. Ayrıca bu modellerde yol kaybı göndermeç almaç arası ve almaç göndermeç arası eşit olacak şekilde simetriktir. Ancak ortam gürültüsündeki değişiklikler, yansıtıcı veya saçılıma sebep olan nesnelereki değişiklikler ve gölgelemeye sebep olan nesnelere hareketleri sebebiyle yol kaybında rastgele değişiklikler olabilmektedir. Dolayısıyla aynı göndermeç almaç arası mesafeye sahip farklı noktalarda veya aynı noktada farklı zamanlarda yol kaybı farklılaşabilmektedir. Bu aynı zamanda göndermeç almaç arası mesafe artarken yol kaybının da tamamen logaritmik artış eğilimine uymaması ve ortalama da logaritmik artışa uysa bile her bir ayrı örneklemin belli sapmalar göstermesi anlamına gelmektedir. Dola-

yısıyla böyle olasılıksal değişimleri göz önüne alabilmek için istatistiksel bir modele ihtiyaç vardır. Bu anlamda istatistiksel modeller içinde en yaygın ve basit olanı da bu rastgele değişimin de logaritmik mesafe modeline katılarak elde edilen logaritmik gögeleme modelidir [70]. Bu model,

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.20)$$

denklemi ile ifade edilmektedir. Görüldüğü üzere logaritmik mesafe modeline X_σ rastgele değişkeni eklenmiştir. X_σ değişkeni standart sapması σ ve ortalama değeri sıfır olan bir Gauss rastgele değişkenidir. Pratik uygulamalarda model oluşturulurken ölçülen değerler lineer uyumlama ile logaritmik bir eğriyle eşleştirilmekte ve ölçüm ile model arasında ortalama kare hata (İng. Mean Square Error, MSE) değeri en aza indirilecek şekilde n ve σ değerleri belirlenmektedir.

Kablosuz haberleşmede kullanılan genel modeller ve temel yayılım mekanizmaları hakkındaki verilen bilgilerden sonra KAA'lara özgü modellere geçmeden önce KAA'lara özel kısıtlar sonraki bölümde ortaya konulmuştur.

2.2 KAA Kısıtları

Uydu, hücresel haberleşme, UHF (İng. Ultra High Frequency) ve VHF (İng. Very High Frequency) telsiz haberleşme sistemlerinde geçerli yaygın modeller vadır. Bu teorik modellerin deneysel ölçümlerle de geliştirilmiş olarak kullanılması yaygındır [35]. Bu modellerin geniş ölçümlerle elde edilen düzeltme faktörleri de belirlenmiştir [71, 34]. Fakat bu modellerde kullanılan yaklaşımları ve bu yaklaşımların sebep olabileceği etkileri düşünmeden direk KAA uygulamalarında kullanmamak için KAA'lara özgü kısıtların gözden geçirilmesinde fayda bulunmaktadır. Bu kısıtlar şu şekilde sıralanabilir:

1. **Düşük Anten Yükseklikleri:** Askeri ve sivil bir çok KAA uygulaması bulunmaktadır. Bu uygulamalardan askeri hava platformlarının kullanıldığı bazı durumlarda, güneş paneli uygulamalarında veya şehir içi akıllı uygulamalar ve bina içi bazı izleme uygulamalarında yerden yüksekte antenler kullanılabilir. Ancak açık alan KAA uygulamalarının bir çoğunda antenler yaygın olarak 2m yükseklikten daha aşağıdadır. Hatta bir çok uygulamada KAA düğümleri ve baz istasyonları direk yere yerleştirilmektedir. Bu durumda da ilgili antenler yere çok yakın durumda kalmaktadır [72]. KAA uygulamalarında kazanç sağlayacağı durumlarda baz istasyonunu yükseğe yerleştirme alternatifi değerlendirilebilir ancak çok sayıda algılayıcı düğümün yüksekliğinin bu şekilde artırılması her zaman mümkün olmayabilir ya da pratik olmayacaktır. Dolayısıyla kablosuz haberleşmede yaygın olarak kullanılan fakat baz istasyonu ve bağlı bulunan düğümler için anten yükseklikleri ilgili KAA senaryolarındaki antenlerden daha yüksek olduğu durumlar için çıkarılmış modellerin kullanılmaması gerekmektedir.
2. **Düşük Gönderme Gücü:** KAA'larda kullanılan algılayıcı düğümlerin RF sinyal gönderme çıkış güçleri bir çok kablosuz haberleşme sistemine göre göreceli

olarak düşük olmaktadır. Tipik KAA düğümlerinin gönderme çıkış güçleri 100 mW'lar mertebesinde [73, 74]. Dolayısıyla ilgilenilen en yüksek menzil değerleri de bir çok düşük hızlı kablosuz haberleşme sisteminin menzil değerlerinin çok altında kalmaktadır [75].

3. **Hareketsiz Ağ Topolojisi:** Hareketli düğümlerden oluşan KAA'lar da bulunmasına rağmen açık alan karasal KAA'lar çok büyük bir kısmı hareketsiz düğümlerden oluşmaktadır [51]. Dolayısıyla göndermeç ve almanın birbirine göre yüksek hızlı göreceli hareketinin sebep olabileceği Doppler etkisi gibi etkilerin veya diğer sönümlenme etkilerini göz ardı eden modellerin açık alan KAA uygulamalarının bir çoğu için yeterli olması söz konusudur.
4. **Antenlerin Yönlülüğü:** Yönlülüğü yüksek dolayısıyla dar hüzme genişlikli antenlerin her yöndeki düğümlerin birbiriyle haberleşmesinin avantajının kullanılması istenen ağ yapıları için uygun olmadığı aşikardır. Dolayısıyla KAA uygulamalarının hemen hepsinde yönsüz her yöne yayın yapan antenler tercih edilmektedir. Fakat bu antenlerin mükemmel yönbağımsız anten olduğu varsayımı da doğru değildir. Özellikle ucuz algılayıcı düğümlerinin kullanıldığı KAA uygulamaları için kullanılacak yol kaybı modellerinde bu etken de unutulmamalıdır [76, 26].

Bu kısıtlar ışığında sonraki bölümde KAA'lara özgü yol kaybı modellerini değerlendirmek uygun olacaktır.

2.3 KAA'lara Özgü Yol Kaybı Modelleri

Aslında KAA'lara özgü olmasa bile kullanılabilir en basit modellerden olması dolayısıyla Denklem 2.4'te verilen boşlukta yayılım yol kaybı modeli KAA çalışmalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Hatta bu model daha da basitleştirilerek,

$$P_r(d) = \frac{P_0}{\left(\frac{d}{d_0}\right)^2} \quad (2.21)$$

denklemindeki haliyle kullanılmıştır. Burada P_0 , d_0 referans mesafesinde ölçülen referans güç değerini göstermektedir. Bu modelin popülerliği basitliğinden gelmektedir. Fiziksel katman hakkında herhangi bir alt yapısı bulunmayan araştırmacıların yol kaybı modeli olarak kullanmak üzere ilk başvurduğu modeldir. Yol atama protokollerinin enerji tüketimine odaklanmış (temelde ağ yaşam süresi ve enerji verimliliğine odaklanan) bir çok KAA çalışmasında bu modelin kullanıldığını görmek mümkündür [77, 78, 79, 80].

2.3.1 Basitleştirilmiş iki eğimli iki ışın yansıma modeli

Boşlukta yayılım yol kaybı modelinden daha gerçekçi bir model kullanmak isteyen, KAA alanında araştırma yapan bir çok araştırmacı en çok iki ışın yansıma modeline

yönelmekte fakat bu modeli de olabildiğince basitleştirerek kullanmaktadır. [81] çalışmasında göndermeç almaç arası mesafeye göre kritik bir eşikten önce yol kaybının d^2 ile arttığı bu kritik mesafeden sonra ise d^4 ile arttığı varsayımı modellenmiştir:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + lE_{fs} \times d^2 & \text{if } d < d_b \\ lE_{elec} + lE_{mp} \times d^4 & \text{if } d \geq d_b \end{cases} \quad (2.22)$$

Bu modellemede d_b kırılım noktasını, l gönderilen bit sayısını, E_{elec} elektronik devrelerin enerji tüketimini, E_{fs} ve E_{mp} ise mesafeye göre değişen güç yükselteç enerji sabitlerini göstermektedir. Buradaki parametrelerin seçiminde $E_{fs}d_b^2 = E_{mp}d_b^4$ olmasına dikkat edilmiştir ve böylece $E_{Tx}(l, d)$ mesafeye göre tekdüze düşen sürekli bir fonksiyonun olması sağlanmıştır. Dikkat edilirse bu modellemede yol kaybının kendisi yerine ihtiyaç duyulan gönderme çıkış gücünün belirlenmesinin temel alındığı ve modelin bu haliyle tam bir yol kaybı modelinden ziyade hibrit bir yapıda olduğu görülmektedir. Ayrıca iki ışın yansıma modelinde geçerli olan kritik kırılım noktasına benzer şekilde bir kırılım noktası belirlenmiş fakat bu noktanın hangi parametrelere göre belirlendiği belirtilmemiştir. Tüm bunlara rağmen modelin senaryosuna bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir birlikte boşlukta yayılım modeli gibi bir modele göre KAA uygulamaları için daha gerçekçi olduğu söylenebilir. Dolayısıyla KAA araştırmalarında kendine yaygın bir yer bulmuştur [79]. Bununla birlikte modelin yer yansıma katsayısı, anten deseni ve yükseklikleri gibi parametreleri dahil etmediği de unutulmamalıdır.

Bu çalışmanın yapıldığı zamana kadar önerilen KAA yol kaybı modelleri içerisinde hem gerçekçiliği açısından başarılı olduğunu ispatlamış hem de araştırmacılar açısından yaygın olarak kullanıldığı iddia edilebilecek bir model ne yazık ki yoktur. Hatta en yaygın olarak kullanılan modeller çok basitleştirilerek ve fiziksel katman parametrelerine neredeyse hiç dikkat edilmeden kullanılmaktadır. Son yıllarda KAA uygulamalarına yönelik, yaygın kullanılan algılayıcı düğüm platformları ile yapılmış bazı sahada ölçüm çalışmaları bulunmaktadır [1], [2]. Bazı çalışmalar da modelleme yapmaktan ziyade anten yüksekliği ve mesafe gibi değişkenlerin yol kaybını nasıl etkilediğine dair çalışmalar yapmıştır [82]. Literatürde raporlanan KAA'lara özgü yol kaybı modellemesi çalışmalarında genel olarak şu bulguların vurgulandığını görmekteyiz:

- Ortalama sinyal güç düşümleri göndermeç almaç arası mesafenin artması ile artmaktadır.
- Anten yüksekliklerinin arttırılması yansıma ve engellenme etkilerinin azalmasını sağlamaktadır.
- Ortalama güç düşüşü dışında güç düşüşünde rastgele değişimler gözlenmektedir.

Dolayısıyla takip eden kısımlarda sadece bu bulgularla kalmayıp KAA'lara yönelik şu ana kadar sunulan modellerden daha gerçekçi ve doğru olma iddiasında olan modelleme önerileri verilmektedir.

2.3.2 Tek eğimli logaritmik gölgeleme modeli

Tek eğimli logaritmik gölgeleme modeli Denklem 2.20'yi kullanmaktadır. Belirli bir senaryo için anten yüksekliği ve frekans değerleri sabitlenerek yapılan ölçümler sonucunda MSE'yi en küçük yapacak şekilde yapılan eğri uyumlamasıyla elde edilecek $PL(d_0)$, n , ve σ ile bu modeli kullanmak benzer bir senaryo için gerçekçi bir sonuç verecektir. Bununla birlikte bu modelin genel bir referans parametre seti ile sanki analitik bir model imiş gibi senaryodan bağımsız olarak kullanıldığı durumlar da vardır [83]. Örneğin bu çalışmada $PL(d_0) = 55$ dB, $d_0 = 1$ m, $n = 4$ ve $\sigma = 4$ alınmıştır. Bunun yanında [1] ve [2] çalışmalarında bu model için sırası ile 868 MHz ve 2.4 GHz frekanslarında ölçüm sonuçları paylaşılmıştır.

868 MHz de yapılan ölçümler için anten yükseklikleri göndermeç ve almaç için 13 cm alınmıştır [1]. Göndermeç çıkış gücü sabit tutulmuş ve göndermeç almaç arası mesafe değiştirilerek mesafeye bağımlı olarak alınan sinyal seviyesi değerleri elde edilmiştir. 3 m mesafeye kadar 0.5 m aralıklarla ölçümler alınmış, 3 ila 10 m arasında ölçüm aralıkları 1m ye çıkarılmış ve 10m den sonra ise her 2m de bir ölçüm alınmıştır. Ölçümler alınan güç seviyesi -85 dBm seviyesinin altına düşünceye kadar devam ettirilmiş ve bu seviyenin altına düşülen uzaklıklar en uzun menzil olarak değerlendirilmiş ve ölçümler sonlandırılmıştır. Uzaysal ortalama almak için her bir ölçüm noktası etrafında 50 cm çapındaki alanda 5 farklı noktada ölçüm alınmış ve her bir ölçüm noktası için bu ortalama kullanılmıştır. Ayrıca zamansal ortalama için de her bir ölçüm değeri 5 farklı zamanda kaydedilmiş ve bunların ortalama değeri kullanılmıştır. Elde edilen ham veri üzerinde zamansal ve uzaysal ortalamalar alınarak ölçümden kaynaklanabilecek dalgalanmaların ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Ölçülmüş ve bu şekilde işlenmiş veriler üzerinden ise tek eğimli logaritmik gölgeleme denklemine eğri uyumlaması yapılarak ilgili $PL(d_0)$, n , ve σ değerleri elde edilmiştir.

2.4 GHz'de yapılan ölçümlerdeki çalışmada ise anten yüksekliklerinin değiştirilmesinin etkisi de gözlenmek istenmiştir. Bu amaçla göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (h_t, h_r) şu değerleri alacak şekilde değiştirilmiştir[2]:

- $(h_t, h_r) = (1\text{m}, 1\text{m})$
- $(h_t, h_r) = (3\text{cm}, 1\text{m})$
- $(h_t, h_r) = (3\text{cm}, 2\text{m})$

Böylece göndermeç anteni 1m ve 3cm yüksekliklerinde almaç anteni ise 1m ve 2m yüksekliklerinde değiştirilerek ölçümler alınmıştır. Bu çalışmada da göndermeç çıkış gücü sabit tutulmuş ve göndermeç almaç arası mesafe değiştirilerek mesafeye bağımlı olarak alınan sinyal seviyesi değerleri elde edilmiştir. 10 m mesafeye kadar 1 m aralıklarla ölçümler alınmış, 10m den sonra ise her 2m de bir ölçüm alınmıştır. Ölçümler 100m'ye kadar devam ettirilmiştir. Uzaysal ortalama almak için her bir ölçüm noktası etrafında 20 cm çapındaki alanda 10 farklı noktada ölçüm alınmış ve her bir ölçüm noktası için bu ortalama kullanılmıştır. Ayrıca zamansal ortalama için de her bir ölçüm değeri 20 farklı zamanda kaydedilmiş ve bunların ortalama değeri kullanılmıştır. Elde edilen ham veri üzerinde zamansal ve uzaysal ortalamalar alınarak ölçümden kaynaklanabilecek dalgalanmaların ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Ölçülmüş ve bu şe-

kilde işlenmiş veriler üzerinden ise tek eğimli logaritmik gölgeleme denkleminde eğri uyumlaması yapılarak ilgili $PL(d_0)$, n , ve σ değerleri elde edilmiştir.

2.3.3 İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli

Tek eğimli logaritmik gölgeleme modeli yanında [1] ve [2] çalışmalarında Bölüm 2.3.2’de anlatılan senaryolar için 868 MHz ve 2.4 GHz frekanslarında alınan ölçüm değerleri ile aşağıda verilen iki eğimli logaritmik gölgeleme denklemi oluşturulmuştur. Bu model,

$$PL(d) = \begin{cases} PL(d_{01}) + 10n_1 \log\left(\frac{d}{d_{01}}\right) + X_{\sigma 1} & \text{if } d \leq d_b \\ PL(d_{02}) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_{02}}\right) + X_{\sigma 2} & \text{if } d > d_b \end{cases} \quad (2.23)$$

denklemi ile ifade edilmektedir. Denklem 2.20 ile ifade edilen bu modelde eğim bölgeleri bir kırılma noktası ile ayrıştırılmış ve böylece fiziksel olarak iki ışın yansıma modeline benzer bir mantıkla belirli bir mesafeden sonra yol kaybının artan eğimle artması fenomenini matematiksel olarak yansıtabilecek bir model öngörülmüştür. Böylece ölçüm verilerine tek eğimli logaritmik gölgeleme modelinden daha yüksek doğrulukla yaklaşabilen bir model oluşturulmak istenmiştir. Her iki çalışmada da iki eğimli logaritmik gölgeleme modelinin tek eğimli modelden daha başarılı bir şekilde ölçüm sonuçlarına yaklaştığı vurgulanmıştır [1], [2]. Bu ortak vurgunun yanında [1] çalışmasında aynı anten yükseklikleri olmasına rağmen 3 farklı açık alanda ölçümler tekrarlanmış ve ortama göre değişiklikler gözlemlenmek istenmiştir. Özellikle vurgulanan üç nokta bulunmaktadır. Birincisi, kırılma noktası d_b anten yükseklikleri değişmese bile ortam özellikleri ile değişebilmektedir. Bu değişim ortamların engelcilik farklılıklarından kaynaklı olarak antenlerin Fresnel alanlarının ihlal edilmiş olmasına bağlanmıştır. İkincisi, iki eğimli logaritmik gölgeleme modelinin tek eğimli modele göre maksimum menzili daha az tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Üçüncüsü ise park alanı, düz beton zemin ve üniversite bahçesi olmak üzere 3 alanda yapılan ölçüm sonuçlarında elde edilen (n_1, n_2) çiftleri sırasıyla şu şekilde olmuştur:

- $(n_1, n_2) = (2.09, 4.01)$
- $(n_1, n_2) = (2.34, 3.73)$
- $(n_1, n_2) = (2.76, 4.00)$

Bu parametreler belirlenirken yine tek eğimli modelde olduğu gibi ölçüm verileri eğri uyumlaması yapılırken en küçük MSE elde edilecek şekilde değerler bulunmuştur. Ayrıca tek eğimli ve iki eğimli modellerin ağ topolojisi benzetimindeki performansı görülmek üzere 10 düğümlü ağ benzetimleri çalıştırılmıştır. Performans parametresi olarak da ağ genelinde düğüm başına düşen komşu düğüm (başarılı haberleşme yapılabilen düğüm) sayısı kullanılmıştır. Burada da iki eğimli modelin tek eğimli modelden daha gerçekçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

2.4 GHz de yapılan ölçüm sonuçlarında da 3 farklı ortam ve 3 farklı anten yükseklik seti olmak üzere toplam 9 farklı parametre kümesi için yine iki eğimli logaritmik gölgeleme modelinin tek eğimliden daha doğru ve gerçekçi sonuçlar verdiği teyit edilmiştir [2]. Hatta bu çalışmada modelin doğrulaması için ölçüm değerleri üzerinden elde edilen parametrelerle model vasıtasıyla elde edilen değerler yeniden yapılan ölçümlerle tekrar karşılaştırılmıştır. Bu durumda da iki eğimli modelin tek eğimli modele göre doğruluk üstünlüğü tekrar teyit edilmiştir. İki eğimli model için yol kaybı değeri tahmin hatası 0.28-6.66 dB aralığında iken bu hata aralığı tek eğimli model için 5.17-20.45 dB olmuştur. Bu çalışmada [2], [1] çalışmasından farklı olarak anten yükseklikleri de değiştirildiği için kırılım noktasının belirlenmesinde senaryonun, ölçüm ortamının mı yoksa anten yüksekliklerinin mi daha baskın olduğunu belirlemek mümkün olmuştur. Bu noktada iki önemli bulgu vardır. Birincisi, ortamların değişmesi ile kırılım noktasında ufak farklılıklar olabilmektedir ancak anten yüksekliği değişimleri ile gelen farklılıklar çok daha fazladır ve aynı anten yükseklik kümesinde elde edilen kırılım noktası mesafeleri farklı ortamlar için birbirine yakındır. İkincisi, anten yüksekliklerine göre kırılım noktası mesafesi Denklem 2.18 ile h_t , h_r ve λ bağlı olarak bulunan değere yakın bir değerdir ve antenler alçaldıkça kırılım noktası göndermeç düğümüne yaklaşmaktadır. Kırılım noktasından sonraki eğimlerin de arttığını göz önünde bulundurunca yere yakın antenler için yol kaybının artmaya başladığını söylemek mümkündür.

2.3.4 Basitleştirilmiş iki ışın yansıma modeli

IEEE 802.15.4 standardının fiziksel katmanının benzetimine yönelik olarak iki ışın yansıma modelinin basitleştirilmiş halini kullanan bir çalışma yapılmıştır [84]. Önerilen model Denklem 2.16'yı kullanmakta ve dolayısıyla en azından anten yükseklikleri ve anten kazançlarını yol kaybı modeline dahil etmektedir. Bu çalışmada, göndermeç ve almaç anten yükseklikleri 1m olan [74] çalışmasında elde edilen ölçüm sonuçları önerilen modelin yol kaybı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca model TOSSIM (İng. Tiny Operating System Simulator) benzetim programında kullanılmıştır. Bu benzetim programında kullanılmasıyla birlikte benzetim programında önceden tanımlı iki fiziksel katman yaklaşımıyla elde edilen sonuçlarla kıyaslama da yapılmıştır. Bu iki tanımlı yaklaşım ise KAA benzetim uygulamalarında yol kaybı modelleri kullanımının ne kadar basitleştirilerek kullanılabilirdiğini ortaya koymaktadır:

1. **Kayıpsız ortam modeli:** Tüm düğümlerin birbiriyle haberleşebildiği model.
2. **Kayıplı ortam modeli:** Düğümlerin birbiri ile haberleşmesinin bir rastgele sayı üretici çıktısı atanarak karar verildiği model.

İlgili çalışmada fiziksel katman ile ilgili bu derece basit yaklaşımlar kullanmakla bir yol kaybı modeli kullanılması arasında ortaya ne kadar farklı ağ tasarım ve analiz sonuçlarının ortaya çıkabildiği de göstermektedir.

2.3.5 Değişken toprak yansıtma katsayısı modeli

İki ışın yansıtma modelinin basitleştirilmiş haliyle değil de toprağın değişken yansıtma katsayısını hesaba katarak kullanılması temeline dayanan değişken toprak yansıtma katsayısı (İng. Variable Soil Reflectivity, VSR) modeli KAA'larda kullanım için önerilmiştir [85]. Modelde toprağın yansıtma katsayısının değişken olarak alınması yanında kullanılan antenlerin yönlülüğünün de hesaba katılması düşünülmüştür. Önerilen model özellikle algılayıcı düğümlerin düz bir toprak yüzeyinden belirli bir anten yüksekliğinde sabitlendiği ekin alanlarının izlenmesine yönelik uygulamalar için önerilmiştir ki bu durum ekin alanları için genelde karşılaşılan durumu yansıtmaktadır [86]. Model,

$$P_r = \frac{P_0}{d^2} \left(1 + \frac{R^2 D^2}{(r/d)} + \frac{2RD}{(r/d)} \cos(\delta) \right) \quad (2.24)$$

denklemleri ile ifade edilmiştir. Burada P_0 referans mesafedeki gücü, D antenlerin yönlülüğünü, d ve r ise sırasıyla LOS ve yansıyan dalgaların kat ettiği mesafeyi göstermektedir. Ayrıca δ da bu iki yol arasındaki mesafe farkını temsil etmektedir. Model doğrulaması için de 1.4m yükseklikteki göndermeç ve almaç antenleri ile ekin alanında yapılan ölçümler kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada boşluk yayılım modeli ve iki ışın yansıtma modeli ile değişken toprak yansıtma katsayısı modeli kıyaslaması da verilmiştir. Bu çalışmada doğrulama için yapılan ölçümler sırasında iki ışın yansıtma modeli tarafından yansıyan dalganın fazının direk dalga fazı ile 180 derece farkla geldiği durumlarda oluşan ekstra yol kaybı bölgelerinin gözlemlendiği de raporlanmıştır.

2.3.6 Açık alan yayılım modeli

Yerden yansıtma, anten yayılım deseni ve yol kaybındaki rastgele değişiklikler düşünerek önerilmiş bir diğer model de açık alan yayılım modelidir (İng. Free-space Outdoor Model, FOM) [87]. Model,

$$\bar{P}_r(d) = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left(K_1^2 + K_2^2 \Gamma^2 + 2K_2 \Gamma \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L\right) \right) \quad (2.25)$$

$$P_r(d) = \bar{P}_r(d) + X_{\sigma(\bar{P}_r)} \quad (2.26)$$

denklemleri ile verilmektedir. Gösterimde \bar{P}_r ortalama alınan gücü, X_{σ} ise yol kaybındaki rastgele değişimi ifade etmektedir. Ayrıca Γ , yer yansıtma katsayısını, K_1 ile K_2 direk dalga ile yansıyan dalga için anten deseni düzensizliklerini ve ΔL da bu iki dalganın kat ettiği mesafeler arasındaki farkı temsil etmektedir. FOM modeli aslında 4 ayrı yapı taşından oluşmaktadır. İlk iki yapı taşı analitik boşlukta yayılım ve iki ışın yansıtma modelleridir ve Denklem 2.25 bu iki model yardımıyla oluşturulmuştur. Üçüncü yapı taşı almaca ulaşan güçteki rastgele değişikliklerdir ve bu da Denklem 2.26 verilen $X_{\sigma(\bar{P}_r)}$ ifadesi ile gösterilmektedir. Buradaki rastgele değişken Gauss değişkeni olarak ifade edilmiştir. Bu değişkenin standart sapmasının ve ortalama değerinin belirlen-

mesi için farklı anten yükseklikleri ve farklı mesafelerde ölçümler alınmıştır. Ayrıca bu değişkenin standart sapması ortalama alınan gücün fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Yani, $X_{\sigma}(\bar{P}_r)$ şeklinde bir fonksiyon ile ifade edilmiştir. Bu fonksiyon üçüncü dereceden iki polinomun bölünmesi ile oluşan bir fonksiyon olarak modellenmiştir. Modelin oluşturulmasında kullanılan dördüncü yapı taşı ise antenlerin yayılım desenlerinin etkisi ile alakalıdır. Bu etki K_1 ve K_2 yönlülük parametreleri ile modellenmiştir ve kullanılan antenlerin özelliklerine göre değişmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için anten desenini belirlemeye yönelik ölçümler yapılması gerekmektedir. Model doğrulama amacıyla K_1 ve K_2 belirlemek için yapılan ölçümlerde Tmote Sky algılayıcı düğümleri kullanılmıştır [8]. Bu algılayıcılardan biri yerden 70 cm yukarıda olacak şekilde yerleştirilmiş ve 12 m yarı çapında mesafeden 15° 'lik açılarla ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerde elde edilen güç değerleri normalize edilmiş ve K_1 , K_2 değerleri bu normalize değerler üzerinden belirlenmiştir.

Son olarak bu modelin doğrulanması amacı ile 0.12 m, 0.7 m, 1.5 m, ve 1.97m yüksekliklere yerleştirilmiş düğümlerle ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler Tmote Sky düğümlerindeki CC2420 radyolarının çalışma frekansı olan 2.4 GHz' de yapılmıştır. Sonuç olarak FOM modelinde K faktörlerinin modele dahil edilmesi dışında, genel yaklaşım olarak Bölüm 2.3.2'de verilen tek eğimli gölgeleme modeline benzemektedir. Yalnız ortalama yol kaybının hesaplanmasında deneysel sonuçları yerine analitik iki ışın yansıma modeli kullanılmaktadır.

Son olarak KAA'lara özgü bir modelleme çalışmasından ziyade almaç ve göndermeç arası mesafe ile doğru paket alma oranı arasındaki ilişkiye dair yapılan çalışmalar da vardır [88]. Bu çalışma 433 MHz ve 916 MHz frekanslarında yapılmış ve şu anten yükseklikleri ile ölçümler alınmıştır:

- 0.08 m
- 0.30 m
- 0.90 m
- 1.50 m

Raporlanan önemli bir gözlem yine yakın göndermeç almaç mesafelerine rağmen düşük paket alma oranı olan bölgelerin gözüktüğünün raporlanmasıdır ki bu iki ışın yansıma modeli ile açıklanabilecek bir fenomendir. Dolayısıyla yayılım mekanizmaları ve yol kaybı modellerini anlamak, gerçekçi KAA tasarım ve analizleri yanında pratik KAA uygulamalarında gözlemlenen fiziksel durumları anlamakta da yardımcı olmaktadır. Bu bilgiler ışığında verilen modellerden gerekli parametreleri raporlanmış olanlarla ilgili sayısal karşılaştırmalar ve değerlendirmeler takip eden bölümde verilmiştir.

3. KAA'LARA ÖZGÜ YOL KAYBI MODELLERİNİN NİCEL KARŞILAŞTIRMASI

Bu bölüme kadar verilen KAA'lara özgü yol kaybı modellerinin değerlendirmesini yapmak ve hangi senaryo için hangi modelin kullanılmasının uygun olacağına karar verebilmek için modeller arası nicel karşılaştırmalar faydalı olacaktır. Şu ana kadar incelenmiş olan modellerin kısa bir özeti Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelge oluşturulurken her bir modelin analitik mi yoksa ölçüm verileri üzerinden oluşturulmuş deneysel modeller mi olduğu verilmiştir. Ayrıca modeller için anten yüksekliği ve deseninin modele dahil edilip edilmediği de gösterilmiştir. Son olarak modellerin yol kaybındaki olasılıksal değişimleri içerip içermediği bilgisi de çizelgeye dahil edilmiştir.

Dikkat edilirse boşlukta yayılım ve iki ışın yansıma modeli hariç KAA'lara özgü önerilmiş olan diğer modellerin hepsinde rastgele değişimleri modele dahil eden istatistiksel tanımlayıcılar bulunmaktadır. Logaritmik gölgeleme modelleri, VSR ve FOM modellerinde bu istatistiksel tanımlayıcılar, ortalama değeri ve standart sapması verilen Gauss rastgele değişkeni olarak tanımlanmıştır. Özellikle iki eğimli logaritmik gölgeleme modelinde olduğu gibi farklı iki mesafe bölgeleri için bu rastgele değişimlerin ayrı Gauss rastgele değişkenleri ile tanımlanmasına izin veren modellerin yol kaybı değerini tahmin etmede ölçüm sonuçlarına daha yakın dolayısıyla daha gerçekçi oldukları görülmektedir.

Anten yüksekliğinin modellere dahil edilmesi incelendiğinde boşlukta yayılım modeli dışındaki modellerin anten yüksekliğini içerdiğini görmekteyiz. Aslında iki ışın yansıma modeli dışındaki modellerin matematiksel ifadelerinde anten yüksekliklerini direk görmemekteyiz. Fakat tek ve iki eğimli logaritmik gölgeleme, VSR ve FOM modellerinde farklı anten yüksekliklerinde yapılan ölçüm değerlerinin farklılaşması ve modellerdeki parametrelerin bu değerlerin etkisini içerdiğini gözden kaçırmamak gerekmektedir. Dolayısıyla bu modeller kullanılırken alınacak parametre kümelerinin doğru anten yükseklikleri için elde edilmiş olmasına dikkat edilmelidir.

Bu özet çizelge ve genel değerlendirmelerden sonra KAA'lara özgü önerilmiş olan yol kaybı modellerinin nicel karşılaştırması yapılacaktır. Bu karşılaştırma sırasında tabii ki çalışma frekansı, anten yüksekliği ile deseni ve ortam gibi önemli değişkenler sabit tutularak değerlendirmeler yapılacaktır. Bu değerlendirmeler ışığında KAA'lara özgü yol kaybı modelleri için araştırmacılara çok faydalı olacağına inandığımız çıkarımlar paylaşılacaktır.

Çizelge 3.1: KAA'lara özgü önerilmiş olan yol kaybı modelleri

| Model Adı | Model Tipi | Anten Yüksekliği | Yansıma Katsayısı | Anten Deseni | Rastgele Değişimler |
|---|------------|------------------|-------------------|--------------|---------------------|
| Boşlukta Yayılım [63] | Analitik | Hayır | Hayır | Hayır | Hayır |
| İki Işın Yansıma [39] | Analitik | Evet | Evet | Hayır | Hayır |
| Tek Eğimli Logaritmik Gölgeleme [1],[2],[3] | Deneysel | Evet | Evet | Hayır | Evet |
| İki Eğimli Logaritmik Gölgeleme [1],[2] | Deneysel | Evet | Evet | Hayır | Evet |
| VSR [85] | Analitik | Evet | Evet | Hayır | Hayır |
| FOM [87] | Analitik | Evet | Evet | Evet | Evet |

3.1 Karşılaştırmada Kullanılan Veriler ve Yöntem

KAA'larda kullanılan bir çok algılayıcı düğümü lisanssız kullanılabilen ISM (İng. Industrial, Scientific and Medical) bandlarında geçen 868 MHz, 915 MHz ve 2400 MHz frekanslarını kullanmaktadır [89, 90, 91], [92, 73]. Lisanslı olan daha yüksek frekansların KAA uygulamaları için kullanılmasına yönelik de muhtemel kullanım senaryoları düşünülmektedir. Bu kullanımlar için bilişsel radyo konsepti ile birincil kullanıcılara girişim oluşturmayacak şekilde ikincil kullanıcılara izin verilmesi düşünülmektedir [93]. Örneğin 3500 MHz frekans bandı WIMAX (ing. Worldwide Interoperability for Microwave Access) kullanıcıları için lisanslıdır ancak KAA uygulamalarında da ikincil kullanıcı olarak kullanılması planlanmaktadır.

KAA'lara özgü yol kaybı modellerinin performanslarını değerlendirmek için ölçüm sonuçları ile elde edilmiş veriler baz alınmıştır. Dolayısıyla KAA'lara yönelik 868 MHz, 2400 MHz ve 3500 MHz frekanslarında ölçüm yapmış ve sonuçlarını raporlamış olan [1, 2],[3] çalışmalarındaki sayısal değerler kullanılmıştır. Modeller karşılaştırılırken de iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli ölçüm sonuçlarını en az hata ile gösteren model olarak raporlandığı için bu model diğer modellerin değerlendirilmesinde referans model olarak kullanılmıştır. İki eğimli gölgeleme modelinde kullanılan parametre sayısı ve farklı bölgeler için farklı parametreler kullanılması sebebiyle model kompleksliği diğer modellerden yüksektir ancak bu yüksek doğruluk ve gerçekçi model elde edilmesi için ödenebilecek bir bedeldir. Deneysel çalışmaların doğrulaması yapılırken iki eğimli gölgeleme modeli bu açılarından farklı çalışmalarda [1, 2] kendini ispatladığı için diğer modelleri bu model ile kıyaslamak fikir vermek açısından doğru olacaktır. Bununla birlikte iki eğimli gölgeleme modeli parametreleri sadece 868 MHz ve 2400 MHz frekanslarında yapılan ölçümler için vardır. 3500 MHz de yapılan ölçümlerde sadece tek eğimli gölgeleme modeli için parametreler üretilmiştir ve ham veri raporlanmadığı için iki eğimli model parametrelerinin türetilmesi mümkün değildir. Ancak 3500 MHz ölçümleri de LOS ve NLOS (ing. Non Line-of-Sight, direk görüş hattının olmadığı durum) senaryoları için sonuçlar içerdiğinden yol kaybı modelleri açısından bu etkinin incelenmesi için faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada NLOS senaryo için almaç göndermeç arasındaki yol iki sıra çalılık ve küçük ağaçlarla kaplı

Çizelge 3.2: 868 MHz için tek eğimli gölgeleme modeli parametreleri [1]

| Frekans | Senaryo | h_t/h_r | $PL(d_0)$ | n | σ |
|---------|--------------------|-------------|-----------|------|----------|
| 868 MHz | Park | 13 cm/13 cm | 31 | 3.69 | 1.42 |
| 868 MHz | Beton Zemin | 13 cm/13 cm | 31 | 3.12 | 1.83 |
| 868 MHz | Üniversite Bahçesi | 13 cm/13 cm | 31 | 3.57 | 3.27 |

Çizelge 3.3: 2400 MHz için tek eğimli gölgeleme modeli parametreleri [2]

| Frekans | Senaryo | h_t/h_r | $PL(d_0)$ | n | σ |
|----------|---------------|-----------|-----------|------|----------|
| 2400 MHz | Plaza | 1 m/1 m | 42.86 | 1.86 | 3.25 |
| 2400 MHz | Plaza | 3 cm/1 m | 51.51 | 2.21 | 4.34 |
| 2400 MHz | Plaza | 3 cm/2 m | 53.81 | 1.86 | 4.62 |
| 2400 MHz | Yürüyüş alanı | 1 m/1 m | 40.36 | 1.99 | 2.45 |
| 2400 MHz | Yürüyüş alanı | 3 cm/1 m | 50.91 | 2.47 | 5.74 |
| 2400 MHz | Yürüyüş alanı | 3 cm/2 m | 52.49 | 2.14 | 5.23 |
| 2400 MHz | Çayır | 1 m/1 m | 40.51 | 1.90 | 3.02 |
| 2400 MHz | Çayır | 3 cm/1 m | 51.08 | 2.48 | 5.19 |
| 2400 MHz | Çayır | 3 cm/2 m | 53.56 | 2.08 | 5.59 |

olacak şekilde ölçüm alınmıştır [3].

Bu üç çalışmanın sonucu olarak elde edilmiş parametreler Çizelge 3.2’de 868 MHz çalışma frekansı, Çizelge 3.3’te 2400 MHz çalışma frekansı ve Çizelge 3.4’te 3500 MHz çalışma frekansı ve tek eğimli gölgeleme modeli için verilmiştir.

Ayrıca iki eğimli gölgeleme modeli için 868 MHz ve 2400 MHz çalışma frekanslarında elde edilmiş değerler de Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.4: 3500 MHz için tek eğimli gölgeleme modeli parametreleri [3]

| Frekans | Senaryo | h_t/h_r | $PL(d_0)$ | n | σ |
|----------|---------|-------------|-----------|-----|----------|
| 3500 MHz | LOS | 0.3 m/2.1 m | 43.3 | 2.0 | 1.3 |
| 3500 MHz | NLOS | 0.3 m/2.1 m | 43.3 | 2.8 | 4.3 |
| 3500 MHz | LOS | 2.1 m/2.1 m | 43.3 | 2.1 | 1.3 |
| 3500 MHz | NLOS | 2.1 m/2.1 m | 43.3 | 2.6 | 4.1 |

Çizelge 3.5: 868 ve 2400 MHz için iki eğimli gölgeleme modeli parametreleri [1]

| Frekans | Senaryo | h_t/h_r | $PL(d_{01})$ | $PL(d_{02})$ | n_1 | n_2 | σ_1 | σ_2 | d_b |
|----------|--------------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------|------------|------------|-------|
| 868 MHz | Park | 13 cm/13 cm | 33 | 23 | 2.09 | 4.01 | 0.28 | 0.67 | 0.95 |
| 868 MHz | Beton Zemin | 13 cm/13 cm | 33 | 23 | 2.34 | 3.73 | 0.60 | 0.42 | 6.2 |
| 868 MHz | Üniversite Bahçesi | 13 cm/13 cm | 33 | 23 | 2.76 | 4.00 | 2.98 | 1.82 | 3.2 |
| 2400 MHz | Plaza | 1 m/1 m | 67.68 | 65.61 | 1.52 | 3.74 | 2.49 | 1.85 | 32 |
| 2400 MHz | Plaza | 3 cm/1 m | 57.29 | 60.26 | 1.00 | 2.91 | 1.99 | 2.94 | 5 |
| 2400 MHz | Plaza | 3 cm/2 m | 60.54 | 61.36 | 1.06 | 2.87 | 1.75 | 2.25 | 7 |
| 2400 MHz | Yürüyüş alanı | 1 m/1 m | 69.29 | 67.84 | 1.55 | 3.34 | 3.09 | 1.55 | 38 |
| 2400 MHz | Yürüyüş alanı | 3 cm/1 m | 55.35 | 57.36 | 1.01 | 3.31 | 2.02 | 3.47 | 4 |
| 2400 MHz | Yürüyüş alanı | 3 cm/2 m | 58.87 | 61.44 | 1.05 | 3.29 | 1.69 | 2.01 | 7 |
| 2400 MHz | Çayır | 1 m/1 m | 65.03 | 66.09 | 1.26 | 3.93 | 2.98 | 1.51 | 38 |
| 2400 MHz | Çayır | 3 cm/1 m | 55.69 | 57.57 | 0.65 | 3.62 | 1.37 | 1.90 | 5 |
| 2400 MHz | Çayır | 3 cm/2 m | 62.36 | 64.04 | 1.14 | 3.43 | 1.39 | 1.42 | 9 |

KAA'lara özgü modelleri karşılaştırırken iki ana gruba ayırarak grupların da karşılaştırmasını vermek mümkündür:

1. **Analitik Modeller:** Boşlukta yayılım ve iki ışın yansıma modelleri
2. **Deneysel (ölçüme dayalı) modeller:** Tek eğimli gölgeleme, iki eğimli gölgeleme ve genel gölgeleme modelleri

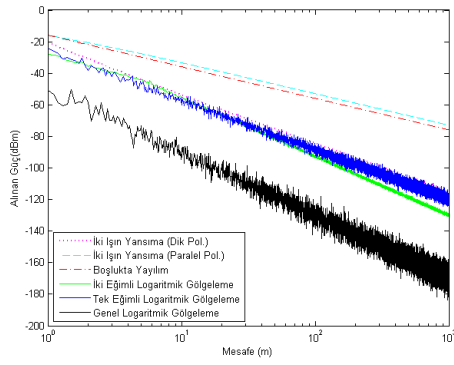
Deneysel modeller içinde en son verilen model (genel gölgeleme modeli) deneysel bir modelin başka bir senaryo için elde edilmiş uyumsuz parametrelerle kullanılmasının ne kadar yanıltıcı olabileceğini göstermek için eklenmiştir. Böyle bir karşılaştırmaya gerek olmadığı düşünülebilir fakat daha önce Bölüm 2'de referansları ile belirtilerek verildiği gibi benzeri hatalar KAA araştırmalarında sıklıkla yapılabilmektedir. Dolayısıyla böyle bir yaklaşımın sebep olabileceği hatanın boyutunu sayısal olarak değerlendirmek için model bu şekilde karşılaştırmalara katılmıştır.

Analitik modeller kullanılmak istendiğinde anten yükseklikleri ve frekans bilgileri kullanılarak senaryo için düşünülen ortamın özellikleri önemsenmeden kullanılabilir. Yalnız bunun senaryoya özel durumlar dahil edilmediğinden doğruluktan belli bir sapmaya sebep olacağı aşikardır. Ölçüm temelli modellerde ise senaryoya uyan başka bir ölçüm sonucunun bulunması ya da özel ölçümün yapılması gerekmektedir ki bu da elde edilen ekstra doğruluk için ödenmesi gereken bir bedeldir.

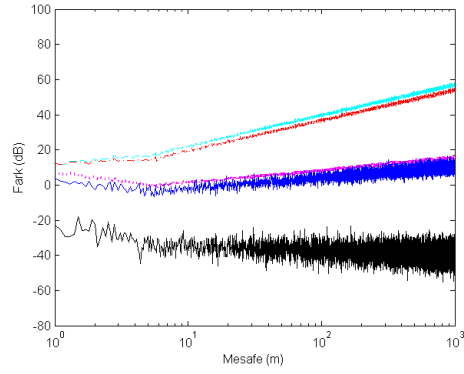
Bölüm 2.3.5 ve Bölüm 2.3.6'da anlatıldığı üzere VSR ve FOM modelleri iki ışın yansıma modelini baz alan modellerdir. Modellere özel durum ise birinde yerin yansıtma katsayısının etkisinin dahil edilmesi, diğerinde ise anten yayılım deseninin etkisinin dahil edilmesi olmuştur. Dolayısıyla bu iki model karşılaştırma şekillerine eklenmiştir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da karşılaştırmada kullanılan iki ışın yansıma modelinde tüm mesafeler için MATLAB aracılığı ile hem yer yansıma katsayısının polarizasyona göre gerçek etkisi hem de yansıyan dalganın genliğinin değişmeden ulaştığı varsayımı yapılmadan mesafeye göre değişimler hesaba katılacak şekilde kullanılmış olduğudur. Yansıma katsayıları polarizasyona göre Denklem 2.9 ve Denklem 2.10'daki gibi hesaplanmış ve dielektrik sabiti de yeryüzü için tipik olarak 15 alınmıştır [39]. Dolayısıyla varsayımlar ve yaklaşımlarla elde edilen Denklem 2.17 değil de direk dalga ve yansıyan dalga anten yükseklikleri ve almaç göndermeç arası mesafeye göre hesaplanmıştır.

3.2 Yol Kaybı Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi

Bu kısımda modellerin yol kaybı tahminlerini kıyaslayabilmek için uygun karşılaştırmalı şekiller kullanılacaktır. Şekil 3.1 ile Şekil 3.19 arasında verilen şekillerde her bir durum için solda ilgili modellerle hesaplanan yol kaybı değerleri, sağdaki şekillerde ise her bir model ile hesaplanan yol kaybı değerinin iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli ile hesaplanan değerden ne kadar farklı olduğu verilmiştir. Bu şekillerde modellerin hata değerlerinin verilmesi modelleri sayısal olarak değerlendirirken kolaylık sağlamak içindir. Burada 868 MHz ve 2400 MHz için iki eğimli logaritmik modelin gerçeğe en yakın değer veren model olduğu için bu şekilde referans alındığını hatırlatalım [1, 2]. Bu durumu Çizelge 3.2, 3.3 ve 3.5'de verilen σ değerlerinden teyit

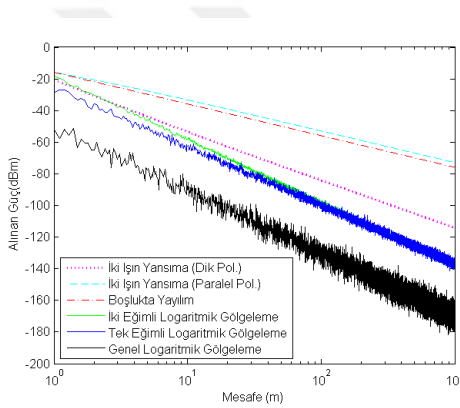


(a) Yol Kaybı Değerleri

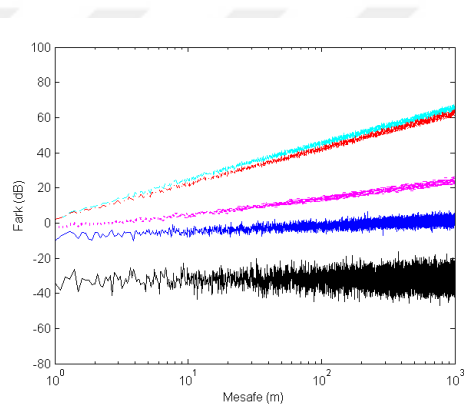


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.1: Beton Zemin için 868 MHz yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri 13 cm.



(a) Yol Kaybı Değerleri



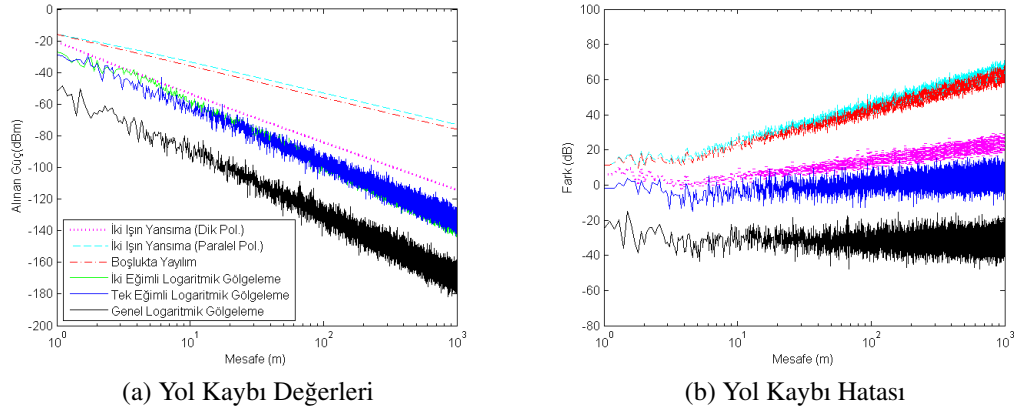
(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.2: Park için 868 MHz yol kaybı değerleri. Almaç ve göndermeç anten yükseklikleri 13 cm.

etmemizde mümkündür. Dikkat edilirse iki eğimli model için elde edilen σ değerleri tüm durumlarda tek eğimli modelden daha iyidir ve modelin ölçüm sonuçlarına uyumdaki gerçekçiliğini göstermektedir. Son olarak Şekil 3.20 ve 3.21’de 3500 MHz için yol kaybı değerleri gösterilmiştir. Burada şekil özellikle LOS ve NLOS durumların etkisini görmeyi kolaylaştırmak üzere tasarlanmıştır. Her bir şekil ile ilgili özellikle vurgulanacak kısımlar belirtilecek ve sonunda genel çıkarımlar verilmeden önce kısa bir özet yapılacaktır.

İlk karşılaştırma seti için [1] çalışmasında verilen üç senaryo için çıkarılan parametreler kullanılarak ilgili her bir model için yol kaybı değerleri hesaplanmış ve Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3’te sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan Mica2 algılayıcı düğümleri 868 MHz’de çalışmaktadır ve antenler yerden 13 cm yüksektedir. Ölçümlerde kullanılan ortamlar şu şekildedir:

- Düz Beton Zemin: İdeale yakın düzlükte geniş bir alan,
- Üniversite Bahçesi: 4 tarafı binalarla çevrili açık bir alan,



Şekil 3.3: Üniversite Bahçesi için 868 MHz yol kaybı değerleri. Almacı ve göndermeç anten yükseklikleri 13 cm.

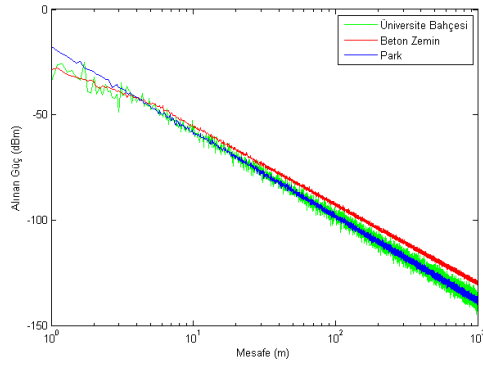
- Park: Hafif eğimli ve çimli bir park alanı.

Bu ortamlar değişik yayılım mekanizmalarının etkisini gözlemlemek açısından iyi örnekler olabilir. Örneğin düz beton zemin yansıma etkileri baskın bir şekilde görebileceğimiz bir ortamdır. Bunun yanında park için ise yansımayla birlikte saçılım etkisinin de dahil olmaya başlayacağı düşünülebilir. Üniversite bahçesi ise çevredeki binalardan kaynaklanabilecek çoklu yansıma etkilerine sebep olabilir.

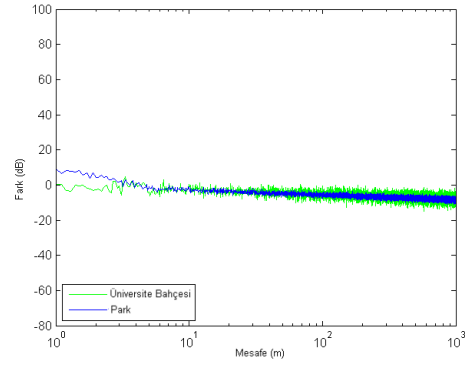
Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'te verilen değerler için ilgili çalışmada kullanılan göndermeç ve almacı antenlerinin kazançları (her bir 5.2 dB'dir) ve gönderme çıkış seviyesi (5 dBm) kullanılarak almaca gelen güç seviyesi hesaplanmıştır. Böylece çalışmada elde edilen sonuçlar burada sunulanlar ile rahatça kıyaslanabilir. Boşlukta yayılım, her iki polarizasyon durumuna göre iki ışın yansıma, tek eğimli ve iki eğimli logaritmik gölgeleme modelleri aynı grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte daha önce açıklandığı üzere $PL(d_0) = 55dB$, $n = 4$ ve $\sigma = 4$ [83] olacak şekilde genel parametreler ile elde edilen sonuçlar da genel logaritmik gölgeleme modeli adıyla gösterilmiştir. Böylece KAA'larda yayılımı etkileyecek frekans, anten yüksekliği ve ortam gibi değişkenler önemsenmeden kullanılan modeller de karşılaştırmaya eklenmiştir.

Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'ü bütüncül olarak değerlendirdiğimizde iki modelin (boşlukta yayılım ve paralel polarizasyonlu dalga için iki ışın yansıma modeli) yol kaybını üç ortam için de sürekli olarak aslından daha az tahmin ettiği görülür. Bununla birlikte tek ve iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli ve dik polarizasyonlu dalga için iki ışın yansıma modelleri göreceli olarak daha doğru değerler tahmin eden bir grup oluşturmuştur. Bu iki grup model için grup içi tahmin farklarının gruplar arası farktan çok daha küçük olduğu da görülmektedir. Üçüncü grup da, aslında tek üyesi genel logaritmik gölgeleme modeli olan grup, ise senaryodan bağımsız parametreler kullanıldığı için sürekli olarak en kötümser yol kaybı tahmin eden model olmuştur.

Referans model ile kıyasladığımızda iki ışın yansıma modeli (dik polarizasyon için) teorik modeller içinde en yakın yol kaybı tahminini yapmıştır. Yalnız eğer paralel polarizasyon için iki ışın modeli kullanıldığında çok fazla hata (30 dB'lere kadar ulaşabilen) oluşmaktadır. Ölçüme dayalı modellerin hepsi de temelde aynı denklem yapısına



(a) Yol Kaybı Değerleri



(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.4: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 868 MHz’de senaryo karşılaştırması.

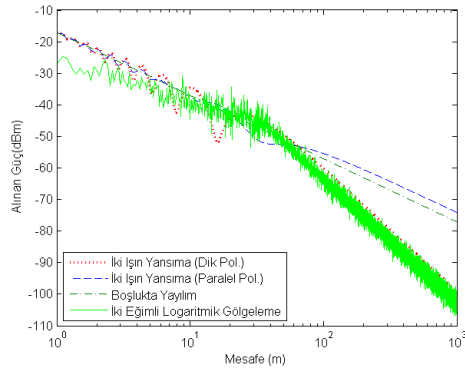
(Denklem 2.20) dayansa da tek eğimli model gerçekçi değerler tahmin etse de genel modelin hata payı da çok yüksek olmaktadır. Dolayısıyla gerçekçi değerler veren bir model kullanmak niyeti doğru model seçilmiş olsa bile yanlış parametre seçimi ile ciddi hatalar yapmanın önüne geçememektedir. Hatta normalde çok gerçekçi sonuçlar veremeyen teorik bir model kullanılmasından bile kötü sonuçlar doğurabilir.

Şekil 3.4’te 3 ortam için yol kaybı mesafeye bağlı olarak iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için çizdirilmiştir. Ayrıca daha rahat karşılaştırabilmek için düz beton zemin ortamına göre diğer ortamlardaki yol kayıplarının farkı da verilmiştir. Böylece belirli bir ortam için alınmış olan ölçüm sonuçlarının ortam dışında parametre değişikliği yapılmadan başka bir ortam için kullanılıp kullanılmayacağı sorusuna cevap aranmıştır. Bu soruya Şekil 3.4 vasıtasıyla alınan cevap aslında sonuçların başka bir ortamda kullanılması gereken doğruluk hassasiyetine bağlı olarak değişir. Eğer ortamlardaki engel yoğunluğu ve karakteristiği çok fazla değişmiyorsa sebep olunan hata çok yüksek olmayabilir. Ölçüm yapılan bu üç senaryoda da LOS koşulunu bozacak engel olmaması ve zemin engebelerinin de çok farklılaşmaması sebebiyle ortamlar arası farkın göreceli olarak az olduğu görülmektedir. Örneğin 3 ortam için yol kaybı tahminleri 10m de 5 dB komşuluğunda ve 100m mesafede de 10 dB komşuluğundadır.

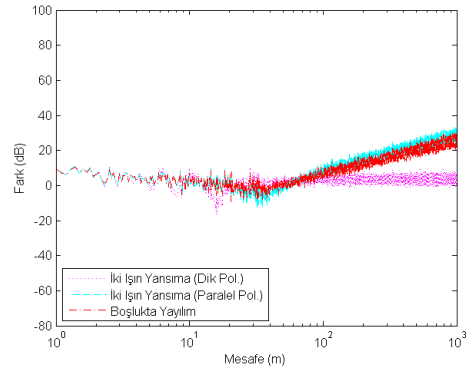
Frekans değişiminin yol kaybına etkisini görebilmek için sonraki grafiklerde 2.4 GHz de yapılan ölçüm sonuçlarında 3 farklı ortam ve 3 farklı anten yükseklik seti [2] için alınan sonuçlar modellere yansıtılmıştır. Ölçüm yapılan üç ortam ve özellikleri kısaca şu şekildedir:

- Çayır: Genel olarak kum ve toprak kaplı düz bir alan.
- Plaza: 100m x 100m boyutlarında ve etrafı binalar ve ağaçlarla çevrili düz bir alan.
- Yürüyüş Alanı: Bir tarafında araç yolu diğer tarafında ise dağınık küçük çalılırlar bulunduğu bir kaldırım.

Şekil 3.5 ile Şekil 3.10 arasında yol kaybı değerleri çayır ortamı için sırasıyla analitik ve deneysel modeller için ve değişen anten yüksekliklerine göre verilmiştir. Analitik

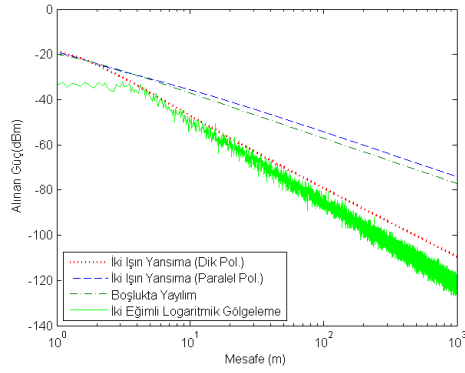


(a) Yol Kaybı Değerleri

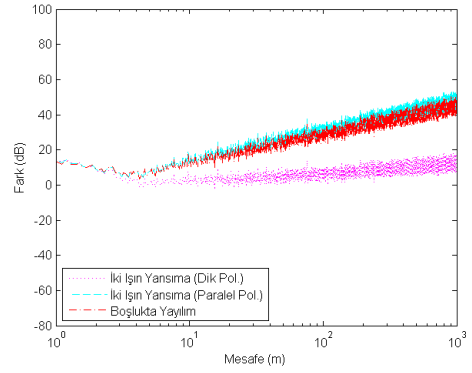


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.5: Çayır için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m).

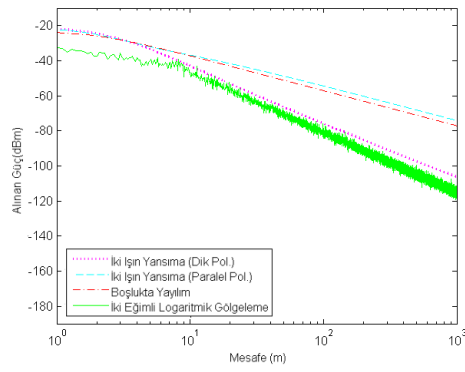


(a) Yol Kaybı Değerleri

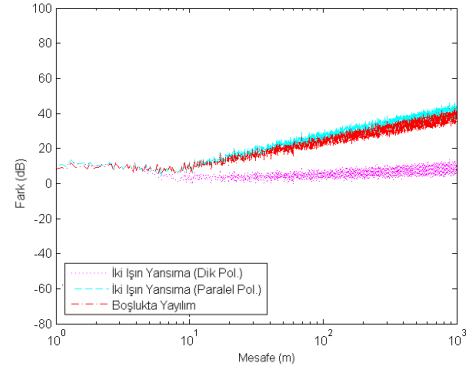


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.6: Çayır için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m).

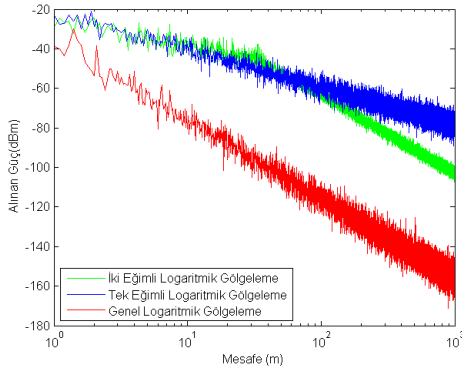


(a) Yol Kaybı Değerleri

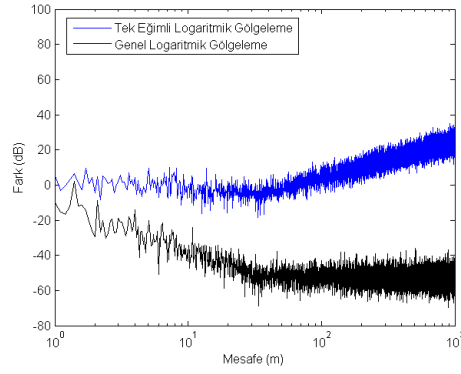


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.7: Çayır için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m).



(a) Yol Kaybı Değerleri



(b) Yol Kaybı Hatası

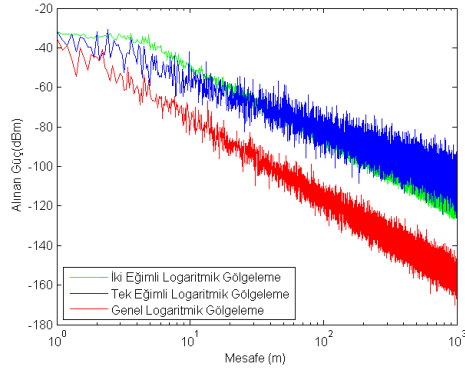
Şekil 3.8: Çayır için 2400 MHz deneysel modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m).

ve deneysel modeller grafik okunurluğunu sağlamak üzere ayrı grafiklerde verilmiştir ve iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli referans olmak üzere her iki grafikte de verilmiştir. 2.4 GHz için oluşan bu grafikleri incelediğimizde özellikle Şekil 3.5'te görüldüğü üzere dik polarizasyon için iki ışın yansıma modeli 10m den daha uzak mesafelerde iyi bir yol kaybı tahmininde bulunmaktadır. Hatta yine deneysel bir model olan tek eğimli logaritmik gölgeleme modelinden daha iyi performans göstermiştir. 868 MHz senaryolarında böyle bir durum görmemiştik, çünkü o frekanstaki ölçümlerde her iki anten de yere çok yakın idi. 2.4 GHz ölçümlerinde de iki ışın yansıma modelinin başarılı olduğu durum özellikle her iki antenin de yerden yüksekte olduğu durumdur. Aslında 2.4 GHz de yapılan çalışma da ne yazık ki her iki anteninde yer de olduğu ölçüm kümesi bir eksiklik olarak görülmektedir. Bu eksikliğı 2.4 GHz tamamlayan bir çalışma literatürde de bulunamamıştır. Böyle bir deneysel çalışma bizler için alt yapı oluşturulabilmesi durumunda gelecekte yapılması planlanan bir çalışmadır.

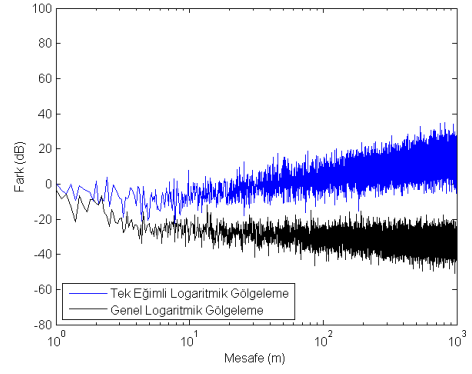
2.4 GHz de yapılan ölçüm sonuçlarına göre teorik iki ışın yansıma modeli doğru polarizasyon ile kullanıldığında deneysel tek eğimli modelden daha iyi yol tahmini yapabilmektedir. Bununla birlikte boşlukta yayılım, genel logaritmik gölgeleme ve farklı polarizasyon için iki ışın yansıma modellerinin yol kaybı tahminlerinde sebep oldukları hatalar yüksektir.

Şekil 3.11 ile Şekil 3.16 arasındaki grafiklerde tek eğimli ve genel logaritmik gölgeleme modelleri verilmemiştir. Böyle modeller tek bir grafik setinde plaza ve yürüyüş alanı ortamları için verilmiştir. Diğer deneysel modellerin verilmemesinin sebebi genel karakteristiklerinin Şekil 3.8,3.9 ve 3.10'da verilen grafiklerle çok benzer olmasıdır. Şekil 3.11 ile 3.16 arasındaki grafiklerde yine boşlukta yayılım, her iki polarizasyona göre iki ışın yansıma ve iki eğimli logaritmik gölgeleme modelleri verilmiştir. Görüldüğü üzere 10m den büyük mesafeler için iki ışın yansıma modeli doğru polarizasyon ile iki eğimli logaritmik gölgeleme modelinin yol kaybı tahminlerine en yakın değerleri tahmin eden model olmuştur.

Dolayısıyla Şekil 3.5 ile Şekil 3.16 arasındaki grafiklerin hepsi birlikte değerlendirildiğinde özellikle göndermeç ve almaç antenlerinin her ikisi de 1m yükseklikte iken iki ışın yansıma modeli kullanılan polarizasyona dikkat edildiğinde yansıma katsayısı

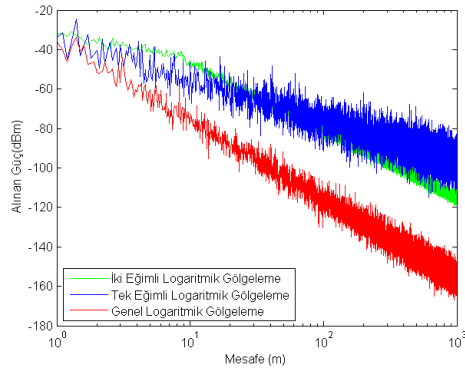


(a) Yol Kaybı Değerleri

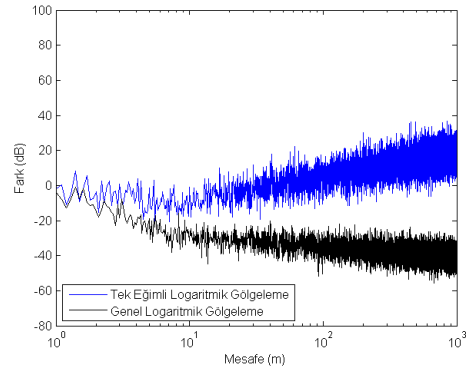


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.9: Çayır için 2400 MHz deneysel modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m).

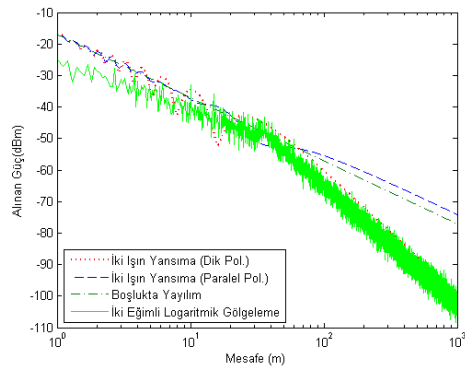


(a) Yol Kaybı Değerleri

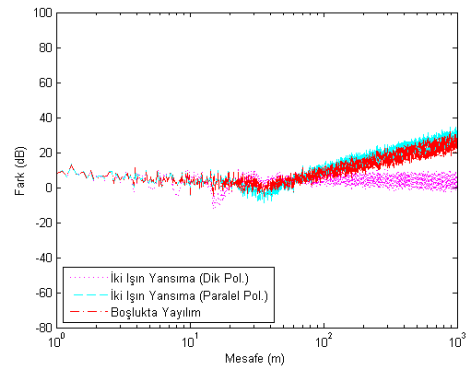


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.10: Çayır için 2400 MHz deneysel modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m).

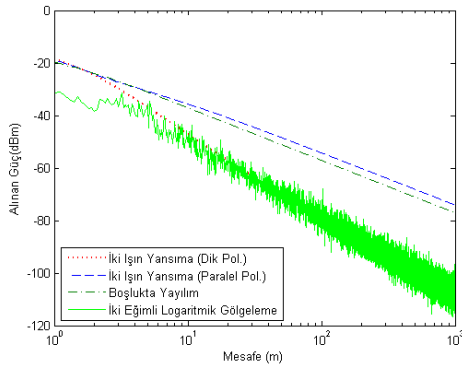


(a) Yol Kaybı Değerleri

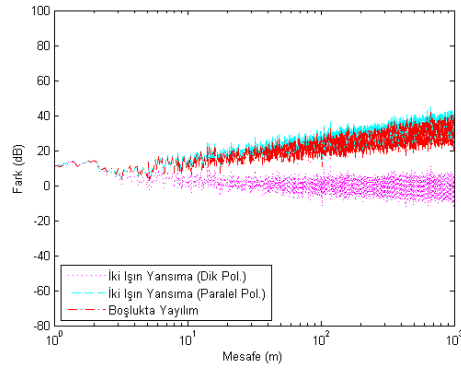


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.11: Plaza için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m).

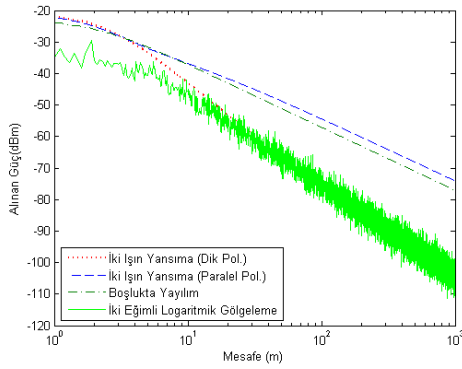


(a) Yol Kaybı Değerleri

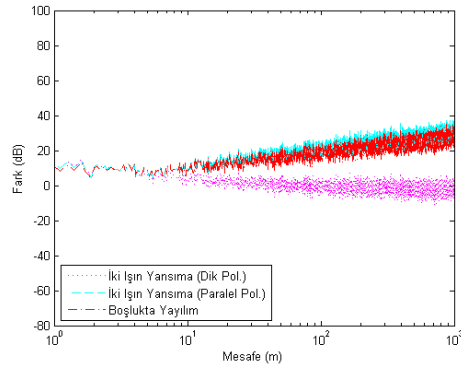


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.12: Plaza için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m).

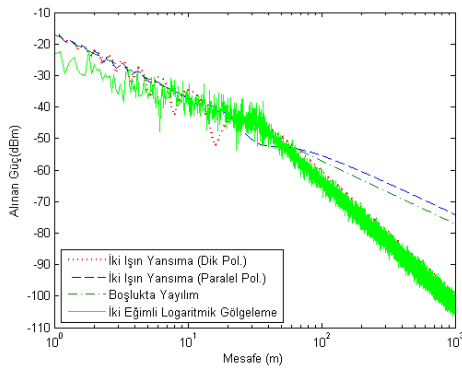


(a) Yol Kaybı Değerleri

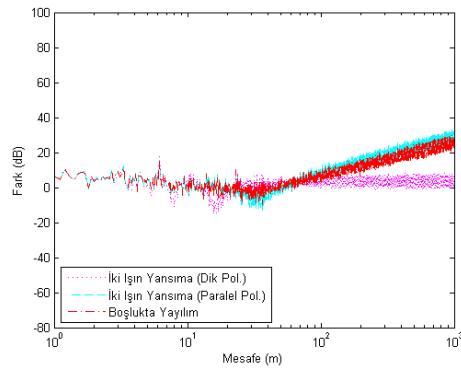


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.13: Plaza için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m).

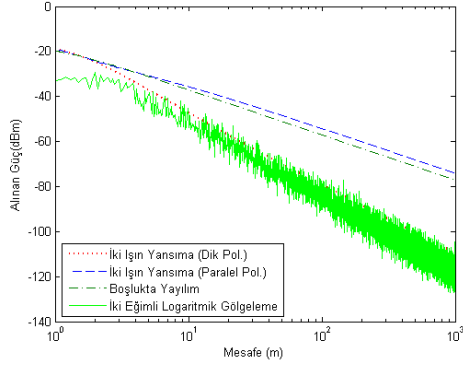


(a) Yol Kaybı Değerleri

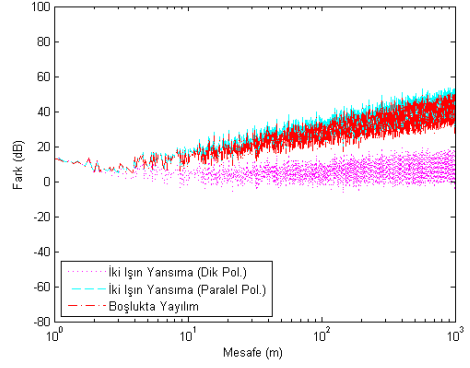


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.14: Yürüyüş alanı için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m).

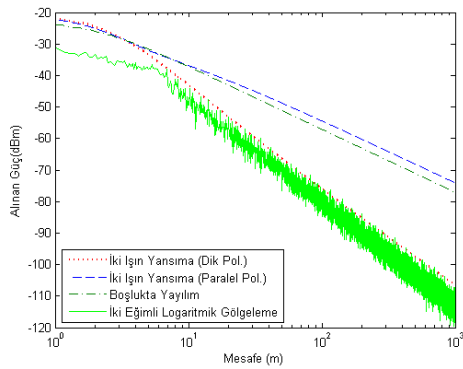


(a) Yol Kaybı Değerleri

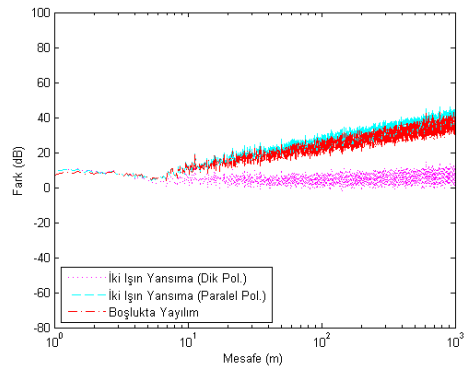


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.15: Yürüyüş alanı için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m).

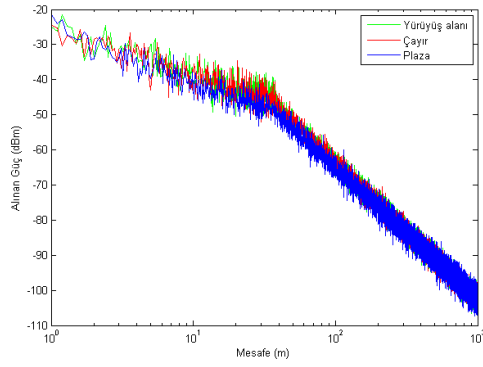


(a) Yol Kaybı Değerleri

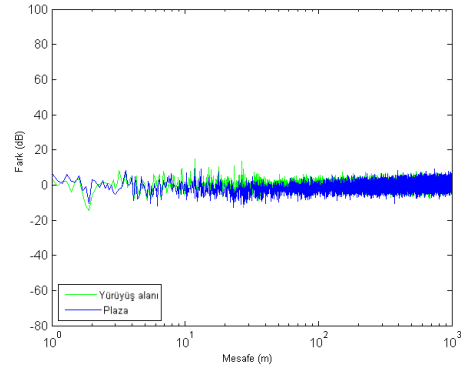


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.16: Yürüyüş alanı için 2400 MHz analitik modellerin yol kaybı değerleri. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m).



(a) Yol Kaybı Değerleri



(b) Yol Kaybı Hatası

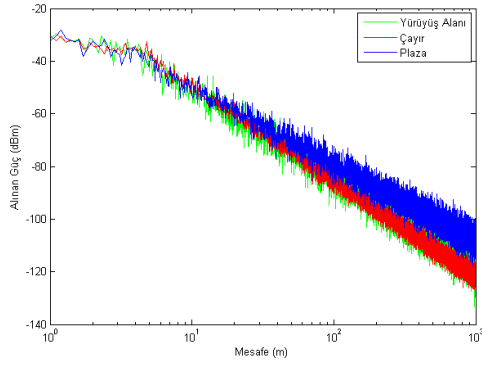
Şekil 3.17: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 2400 MHz'de senaryo karşılaştırması. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (1m,1m).

ile ilgili yaklaşım yapıldığı değil de tam analitik model kullanıldığı durumda iyi bir alternatif olduğu söylenebilir. Dolayısıyla eğer ortama özel veya en azından yakın parametreler ile yapılmış ölçüm sonuçları var ise o sonuçlarla verilen deneysel bir model kullanmak anlamlı bir yaklaşım iken eğer ilgilenilen ortam için kullanılabilir test sonuçları yoksa ve antenler yerden en azından bir kaç dalga boyu yüksekliğinden daha fazla yükseltilmiş ise iki ışın yansımaya modelini yol kaybı tahmini için kullanmak iyi bir alternatif olabilir.

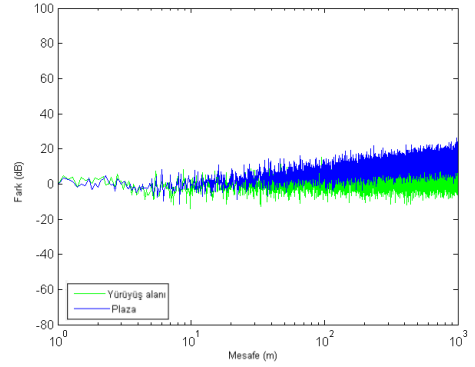
Burada hatırlatmak gerekir ki iki ışın yansımaya modeli, yer yansımaya katsayısını, anten yüksekliklerini ve polarizasyonu dikkate alan bir modeldir ve burada verilen karşılaştırmalar için yansımaya katsayısı ile ilgili genelde yapılan genliğini 1 olarak alma yaklaşımı yapılmamış, analitik model tamamen her bir mesafe için gelen dalganın yüzeye çarpma açısına göre yansımaya katsayısı hesaplanarak kullanılmıştır. Ancak dikkat edilmesi gereken diğer husus ta eğer antenlerden biri bile yere çok yaklaştırılırsa iki ışın yansımaya modelinin tahmin etme doğruluğu bozulmaktadır. Bu durum için en iyi alternatif ölçüm sonuçlarına bağlı modeller ile devam etmektir. Ayrıca iki ışın yansımaya modelinde tahmin edilen kırılım noktası senaryodan ziyade anten yüksekliğine bağlı olacağı yaklaşımı grafiklerdeki gözlemlerle teyit edilmektedir.

Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19'da iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için plaza, çayır ve yürüyüş alanı ortamları için her bir anten yüksekliği setinde ortamlara göre elde edilen yol kaybı değerleri gösterilmiştir. 868 MHz ölçüm sonuçları için yapıldığı gibi belirli bir ortam için alınmış olan ölçüm sonuçlarının ortam dışında parametre değişikliği yapılmadan başka bir ortam için kullanılıp kullanılamayacağı sorusuna cevap aranmıştır. Kullanılması gereken doğruluk hassasiyetine bağlı olarak bu yaklaşımın kullanılıp kullanılamayacağı belirlenebilir.

Ayrıca Şekil 3.17a' da görüldüğü üzere her iki antenin de 1m yükseklikte olduğu durumda ortama göre yol kaybının değişimi antenlerden birinin yerde olduğu duruma, örneğin Şekil 3.18a, göre daha yüksektir. Sayısal olarak bakılırsa Şekil 3.17a'da senaryoların yol kaybını 10 dB komşuluğunda olmasına rağmen, Şekil 3.18a'da bu değer 20 dB kadar farklılaştığı görülmektedir.

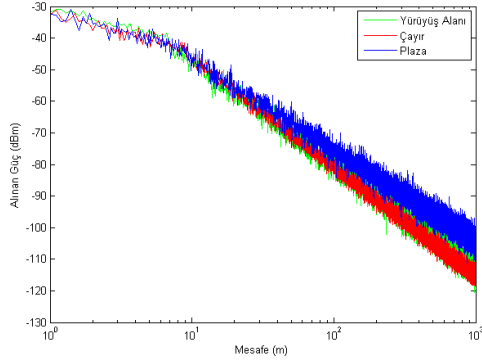


(a) Yol Kaybı Değerleri

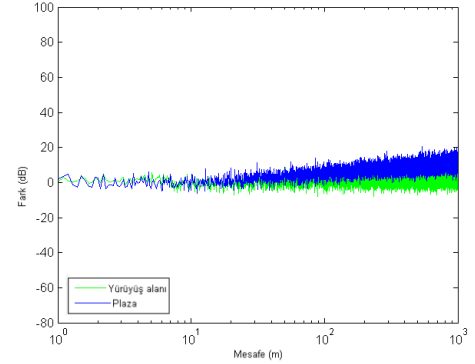


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.18: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 2400 MHz’de senaryo karşılaştırması. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,1m).

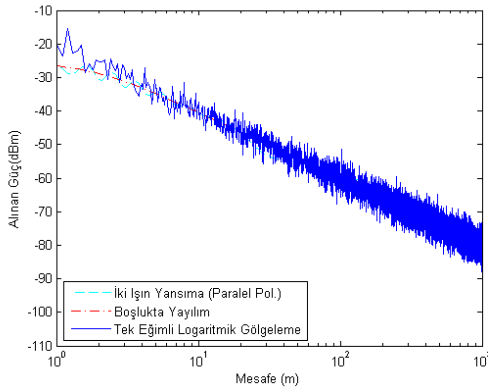


(a) Yol Kaybı Değerleri

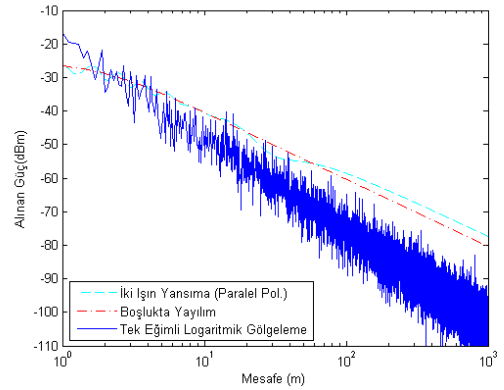


(b) Yol Kaybı Hatası

Şekil 3.19: İki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için 2400 MHz’de senaryo karşılaştırması. Göndermeç ve almaç anten yükseklikleri (3cm,2m).

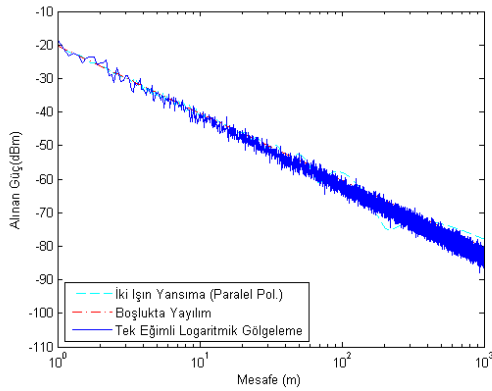


(a) LOS Yol Kaybı (0.3m,2.1m)

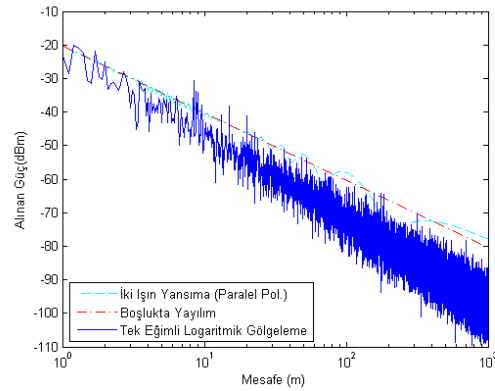


(b) NLOS Yol Kaybı (0.3m,2.1m)

Şekil 3.20: LOS ve NLOS durumlar için 3500 MHz’de senaryo karşılaştırması (0.3m, 2.1m).



(a) LOS Yol Kaybı (2.1m,2.1m)



(b) NLOS Yol Kaybı (2.1m,2.1m)

Şekil 3.21: LOS ve NLOS durumlar için 3500 MHz’de senaryo karşılaştırması (2.1m, 2.1m).

Son olarak Şekil 3.20 ve 3.21’de LOS ve NLOS durumların karşılaştırması için modellerin yol kaybı değerleri gösterilmiştir. İki eğimli logaritmik gölgeleme modelinin değerleri deneysel çalışmada çıkarılmadığı için burada da verilememiştir. Grafikte genel eğilim olarak analitik modellerin (boşlukta yayılım ve iki ışın yansıma) yol kaybı tahminlerindeki hatanın, göndermeç anten yüksekliğinin 0.3m olduğu durumdan (Şekil 3.20a ve Şekil 3.20b) 2.1m’ye çıkarıldığı durumlarda (Şekil 3.21a ve Şekil 3.21b) yani hem LOS hem de NLOS senaryolar için azaldığı görülmektedir. Ayrıca LOS ve NLOS karşılaştırmasına yönelik analitik modellerin deneysel modellere göre hatasının NLOS senaryolarda LOS senaryolara göre daha fazla olduğu da görülmektedir.

Bu bölümde verilen şekillerde görülen sonuçların, gözlemlerin ve çıkarımların rahat takip edilmesi için bu çıkarımlar şu şekilde özetlenebilir:

- Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3 hem analitik hem de deneysel modellerin yol kaybı değerlerini 868 MHz çalışma frekansı için göstermektedir. Bu veriler üç farklı ortam için değerlendirilmiştir. Genel olarak da antenlerin yerde olduğu bu gibi durumlarda analitik modeller veya ortama ve senaryoya uygun olmayan parametrelerle kullanılan deneysel modellerin yol kaybı tahminlerinde önemli hatalara sebep olabildiği görülmektedir.
- Şekil 3.4 868 MHz çalışma frekansında park, üniversite bahçesi ve düz beton zemin ortamları için tahmin edilen yol kaybı değerleri ve ortamların değişmesiyle oluşacak tahmin hatalarını göstermektedir. Gereken doğruluk hassasiyetinin seviyesi de bu şekilde farklı ortamlar için alınmış ölçümlerin birbiri yerine kullanılıp kullanılmayacağını belirleyecektir. Ancak ortam özellikleri ile engebe ve engel koşulları yakın olan ortamlar için farkın azaldığı söylenebilir.
- Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7’te 2400 MHz çalışma frekansında çayır ortamı için farklı anten yüksekliklerinde analitik modellerin, Şekil 3.8, 3.9 ve 3.10’da ise deneysel modellerin yol kaybı değerlerini karşılaştırmaktadır. Yol kaybını en iyi tahmin edebilen analitik model iki ışın yansıma modeli (yansıma katsayısında doğru polarizasyonun hesaba katılması ile) olmuştur ve antenlerin her ikisi de yerden en azından birkaç dalga boyu yüksekte ise tahmin doğruluğu iyi seviyelerdedir.

- Şekil 3.11, 3.12 ve 3.13'te 2400 MHz çalışma frekansında plaza ortamı için farklı anten yüksekliklerinde analitik modellerin yol kaybı değerleri verilmiştir. Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16'da ise aynı şekilde yürüyüş alanı için yol kaybı değerleri verilmiştir. Boşlukta yayılım ve iki ışın yansıma modeli (farklı polarizasyonlu dalga için hesaplandığında) yüksek hatalara sebep olabilen modeller olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca yol kaybındaki eğimin arttığı kırılım noktasının senaryodan daha çok kullanılan anten yüksekliği ile değiştiği görülmektedir.
- Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19'te 2400 MHz çalışma frekansında üç farklı ortam için değişen anten yüksekliklerine göre ortam karşılaştırması verilmektedir. Genel olarak da yol kaybı değerlerinin ortama göre farklılaşmasının anten yükseklikleri azaldıkça arttığı görülmektedir.
- Şekil 3.20 ve 3.21'de 3.5 GHz için LOS ve NLOS ortamlarda farklı anten yükseklikleri ile elde edilen yol kaybı değerleri gösterilmekte ve analitik modellerle karşılaştırması verilmektedir. Analitik modellerin yol kaybı tahmin hataları özellikle NLOS durumlarında daha da artmaktadır.

3.3 Sonuçlar, Değerlendirmeler ve Açık Konular

Yol kaybı modellemesinin KAA'lar için önemi Bölüm 2'de anlatılmıştır. Bu konuda güvenilir, doğruluğu yüksek ve gerçekçi yol kaybı modellemesinin KAA uygulamaları için çok önemli olduğu açıktır. Buna rağmen bir çok akademik KAA çalışmasında çok basit veya senaryoya uygun olmayan dolayısıyla yüksek hatalara sebep olan modeller kullanıldığı görülmektedir.

Çalışmanın bu bölümünün oluşmasında öncelikli olarak kendi çalışmalarımızda kullanabileceğimiz gerçekçi KAA modellerini belirlemek ve bununla birlikte KAA alanında çalışan ve daha çok ağ çalışmalarının fiziksel katmanına dair ayrıntılı bilgisi olmayan araştırmacılara yardımcı olmak isteği etkili olmuştur. Öncelikli olarak Bölüm 2'de elektromanyetik yayılım mekanizmaları kısaca anlatılmış, kablosuz habeleşmede kullanılan genel modeller (boşlukta yayılım, iki ışın yansıma, logaritmik mesafe ve logaritmik gölgeleme modeli) verilmiştir. Ayrıca KAA'lar için geçerli kısıtlar incelenmiş ve KAA çalışmalarında kullanılan veya KAA'lara özgü önerilen yedi model incelenmiştir. Sonuç olarak yol kaybı modelleri arasındaki farkları ve kullanım önerilerini toparlamak için nicel karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu iki bölümün önemli bulgularını şu şekilde sıralamak mümkündür:

1. Belirli bir yol kaybı modelini kullanmaya başlamadan önce ilgilenilen KAA için uygunluğu kontrol edilmelidir. Bunun için model çıkarılırken yapılan varsayımlar ve bu varsayımların ilgili KAA senaryosu için geçerliliği değerlendirilmelidir.
2. Belirli bir model uygulanırken çalışma frekansı, anten yüksekliği, anten polarizasyonu ve yer yansıma katsayısı gibi temel parametrelerin ihmal edilmemesi gerekir. Bu parametrelerin uygun şekilde modele dahil edilmesi modelin doğruluk ve gerçekçiliğini artırır.

3. Saha ölçümleri sırasında gözlemlenen bir çok durum uygun teorik model ile anlamlandırılabilir. Özellikle engel yükseklik ve oranının düşük olduğu açık alan KAA uygulamalarında eğer antenler de yerden belirli bir yükseklikte ise (genellikle bir kaç dalga boyundan fazla yüksekte) gözlemlendiği raporlanmış olgular vardır. Bu olgu yakın mesafeye rağmen yüksek yol kaybı oluşturan aralıklardır. Bu olgu özellikle iki ışın yansıma modelinde açıkça görülen belli mesafelerde yerden yansıyan sinyalin fazının direk ulaşan sinyal ile 180 derece farklı olması durumundaki negatif etkisi ile çok rahat açıklanabilmektedir. Yalnız bu modelin yol kaybı tahminindeki başarısı antenler yere yaklaştığında ve NLOS durumlarında azalmaktadır.
4. Şu ana kadar incelenen modeller içinde KAA'lar için ölçüm sonuçlarına en yakın olarak yol kaybını modelleyebilen model iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli olarak gözükmektedir. Dolayısıyla kullanılan senaryoya uyumlu olarak elde edilmiş parametre kümesi bulunuyorsa en iyi alternatif bu modeli kullanmak olabilir.
5. Bununla birlikte bu modelin uyumsuz bir senaryo için çıkarılmış parametrelerle kullanılması analitik bir modelin sebep olabileceği hatadan daha fazlasına sebep olabilir.
6. Eğer ilgili senaryo (veya engebe ve ortam yapısı benzer bir senaryo) için çıkarılmış deneysel parametreler bulunamıyorsa ve antenler yer seviyesinin hemen üzerinde değilse polarizasyona dikkat edilerek kullanılacak iki ışın yansıma modeli iyi bir yol kaybı modeli olarak öne çıkmaktadır.
7. Bir çok KAA uygulamasında boşlukta yayılım, yanlış polarizasyonlu durum için çıkarılan iki ışın yansıma modeli ve deneysel modelleri genel bir parametre kümesi ile kullanmaya çalışmaktan kaçınmak gerekmektedir. Diğer türlü bu modeller yüksek yol kaybı hatalarına sebep olabilmektedir.

Bu gözlemlerle birlikte KAA'lar için yol kaybı modellemesinde açık görülen ve ileriye dönük çalışma alanları olarak değerlendirilebilecek hususlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Literatürde 868 MHz farklı anten yükseklikleri ile yapılmış, en azından genel ulaşımına açık olarak raporlanmış, bir çalışma bulunmamaktadır. Örneğin (1m, 1m), (3cm, 1m) ve (3cm, 2m) göndermeç ve anten yükseklikleri için yapılacak saha ölçümleri 2.4 GHz de yapılmış olan çalışmayla [2] kıyaslamak için çok faydalı olabilir.
2. Benzer şekilde 2.4 GHz çalışma frekansında (3cm, 3cm) göndermeç ve anten yükseklikleri için gerçekleştirilecek saha ölçümleri, 868 MHz de yapılmış olan çalışmayla [1] kıyaslamak için çok faydalı olabilir.
3. Anten polarizasyonunun KAA kullanımlarındaki etkisine yönelik saha ölçümleri açık bir alan olarak görülmektedir.
4. Mobil baz istasyonu ve/veya algılayıcı düğümler için yere çok yakın anten yüksekliklerinde yol kaybı modellemesine yönelik çalışmalar da faydalı olabilecek bir alandır.

5. Uzun bir süredir çalışılan KAA alanında uygulamaya yönelik senaryo ve ortamlar için uluslararası bir otorite tarafından yönlendirilen ve öneri setine dönüştürülen yol kaybı modelleme çalışmaları çok faydalı olacaktır. Böylece farklı çalışmaların gerçek performans kazançlarını sağlıklı bir şekilde değerlendirmek de mümkün olacaktır.



4. KAA’LARDA YERE YAKIN ANTENLER İÇİN YOL KAYBI MODELLEMESİNİN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ

KAA’lar bir çok durumda ilgilenilen alana tek kullanımlık olarak bırakılıp algılayıcı düğümlerin çalışmak için yeterli enerjileri olduğu müddetçe çalışmaya devam edeceği ve ağ bütünlüğü korunacağı için ağ yaşam süresi KAA’ların performans ölçüleri içerisinde en kritik olanıdır. İlgilenilen KAA uygulaması için ağ yaşam süresi verilerinin doğru değerlendirilebilmesi için kullanılan enbüyükleme modellerinde kullanılan yol kaybı modellerinin doğru olması da değişik sistem parametreleri içerisinde en önde gelenlerindendir.

Bu duruma rağmen bir çok KAA araştırması yol kaybı modeli seçiminde uygulamaya uygun olmayan modeller kullanabilmektedir. Dolayısıyla karışık tamsayı programlama (İng. Mixed Integer Programming, MIP) aracılığı ile yol kaybı modellemesinin KAA’larda ağ yaşam süresine etkisi incelenmiştir. Ağ yaşam süresi enbüyüklemesi tüm ağın enerji tüketiminin dengelenmesi ve azaltılması ile sağlanabilir. Algılayıcı düğümler incelendiğinde temel enerji harcama kalemlerinin işlem gücü ve haberleşme olduğu görülür. Kullanılan düğümlerin karakteristiği incelendiğinde, KAA’larda algılayıcı düğümlerinin enerji harcamaları içerisinde düğümler arası haberleşme için kullanılan enerji en yüksek harcamaya sahip olduğu görülmektedir. Bu ayrıca masaüstü testlerle de gösterilmiştir [94]. Dolayısıyla haberleşme için harcanan enerjinin eniyilemesi ağ yaşam süresi enbüyüklemesi için kritiktir.

Ağ yaşam süresinin en büyüklemesi için oluşturulan modelleme de sırasıyla şu yaklaşım kullanılmıştır:

1. Piyasada yaygın olarak kullanılan algılayıcı düğümler gönderme devrelerinde anten çıkış gücü seviyesinin ayarlanmasına izin vermektedir. Belirli bir KAA topolojisi için her bir algılayıcı düğümü enerji tüketimini en aza indirecek şekilde gönderme çıkış gücü seviyesi belirlenir.
2. Ağda birbiri ile haberleşmesi muhtemel her bir algılayıcı düğüm çifti için mesafeye göre yol kaybı hesaplanır.
3. Belirlenmiş çıkış gücü ve yol kaybı sayesinde her bir düğüm çifti için almaç girişindeki sinyal seviyesi belirlenir.

4. Alma devrelerinin gürültü faktörü ve alınan sinyalin gücü kullanılarak sinyal-gürültü oranı (İng. Signal-to-Noise Ratio, SNR) hesaplanır.
5. Belirlenmiş SNR yardımıyla düğümlerin kullandığı haberleşme kiplemesine göre bit başına hata oranı (İng. Bit Error Rate, BER) hesaplanır.
6. BER hesabı sayesinde haberleşme paketinin boyutuna göre paket alma olasılığı (İng. Packet Reception Rate, PRR) olasılıksal hesaplar ile belirlenir.
7. PRR'a göre doğru alınamayan paketlerin tekrar gönderilme oranı belirlenir.
8. Birbiri ile haberleşen algılayıcı düğümlerinin diğer düğümlere olan girişim etkisi hesaba katılır.

Tüm bu adımlar düşünülerek oluşturulan modelleme ile ağ yaşam süresi enbüyüklemesi yapılmıştır. Yol kaybı hesabı için Bölüm 3'te verilen yol kaybı modelleri kullanılmıştır. Böylece farklı yol kaybı modelleri ile elde edileceği hesaplanan ağ yaşam süreleri arasındaki farkın gerçekçi olan yol kaybı modelleri ile elde edilen değerle karşılaştırılması mümkün olacaktır.

Bölüm 3'te de bahsedildiği gibi KAA'lara özgü yol kaybı modellemesi çalışmaları vardır fakat bu modellerin yaşam süresine etkisi literatürde daha önce [23] çalışması dışında incelenmemiştir. Özellikle göndermeç ve almaç antenlerinin yere yakın olduğu senaryolar için yapılmış yol kaybı ölçümleri [1, 95] teorik modellerin yol kaybı tahmininde yere yakın yayılım durumu için hatalı sonuçlar verdiğinin görülmesini sağlamaktadır. Ancak bu etkinin pratik bir KAA uygulamasında öngörülen yaşam süresine etkisi değerlendirilmemiştir.

Dolayısıyla bu bölümde literatürde var olan bir eksiği tamamlayan çalışmanın [23] ayrıntıları verilecek ve KAA'larda yol kaybı modellerinin yaşam süresine etkisi karşılaştırmalı olarak verilecektir. Geliştirilen MIP modellemesinin ayrıntısı verilecek ve bu yapılırken [1] çalışmasının sonuçları temel alınmıştır. Bu çalışmada 868 MHz çalışma frekansı ve Mica2 algılayıcı düğümleri kullanıldığı için bu düğümlerin enerji harcama parametreleri modellemede kullanılmıştır. Her bir enerji harcaması için bu düğümlere göre hesaplamalar yapılmış ve gerçekçi bir MIP altyapısı oluşturulmuştur. Ayrıca sayısal örnekler üzerinden karşılaştırmalar daha anlaşılır şekilde sunulmuştur.

4.1 Fiziksel Katman Parametreleri

Karışık tamsayılı programlama modeline geçmeden önce model için gerekli fiziksel katman parametrelerinin netleştirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu bölümde ilgili parametreler, 868 MHz çalışma frekansı ve Mica2 düğümleri için belirlenecektir.

Öncelikle bir baz istasyonu ve hareketsiz çok sayıda algılayıcı düğümden oluşan KAA'nın düğümleri zaman senkronizedir. Baz istasyonunun tüm ağ topolojisine sahip olduğu ve yeterli işlem gücü ile enerjiye sahip olduğu varsayılmaktadır. Böylece veri akışının merkezi olarak planlanmasına izin verecek yeterli kaynağın baz istasyonunda olduğu garantelenmiştir. Ortam erişim kontrolü (ing. Medium Access Control, MAC) için

zaman paylaşımli çoklu erişim protokolü (ing. Time Division Multiple Access, TDMA) kullanılmaktadır. TDMA yapı sayesinde her bir düğüm kendisine ayrılmış olan zaman diliminde gönderme yaptığından aktif düğümler arası olası girişimleri azaltmaktadır. Hatta modelde girişim için [96] çalışmasında sunulan yeterli koşulun sağlandığı varsayılmış ve ilgili girişim yaklaşımı modele eklenmiştir.

Düğümlerde üretilen tüm veriler ya tek hoplama ile direk baz istasyonuna veya çoklu hoplama ile diğer düğümlerin veriyi alması ve tekrar yayınlaması (yani röle düğümü olarak çalışması) ile baz istasyonuna ulaşmaktadır. Ayrıca algılayıcı düğümlerinde üretilen veri paketleri röle düğümlerde ayrıştırma veya birleştirme işlemleri görmeden olduğu gibi tekrarlanmaktadır. Zaman eşit 20 saniyelik aralıklara ayrılmıştır ve her bir algılayıcı düğümü bu aralıklarda s_i kadar veri paketi üretmektedir.

Algılayıcı düğümler arasındaki haberleşme iki yönlü tokalaşma ile sağlanmaktadır. Yani alınan her bir veri paketi için onay paketi gönderilmektedir. Her bir düğüm veri veya onay paketi için gönderme çıkış gücü seviyesini var olan ayrık seviye kümesinden seçmektedir.

Ağ yaşam süresi tanımlarına bakıldığında değişik tanımlamaların yapıldığı görülmektedir. Genel olarak KAA için ağın çalışmaya başlamasından şu durumlara kadar geçen süre ağ yaşam süresi olarak tanımlanmaktadır:

- Ağdaki tüm düğümlerin enerjisinin tükenmesi.
- Belirli bir bölgedeki algılayıcı düğümlerinin tamamının enerjisinin tükenmesi.
- Ağdaki düğümlerden herhangi birinin enerjisinin tükenmesi.

Bu çalışmada ağ yaşam süresi tanımı için son yaklaşım yani ağın çalışmaya başlamasından ilk düğümün enerjisinin bitmesine kadarki süre tanımı kullanılmaktadır [79, 97]. Çünkü yaşam süresi enbüyükleme probleminin çözülmesi ile tüm düğümler arası enerji tüketimi olabildiğince dengeli olmaya zorlanmaktadır ve ilk düğümün enerjisinin bitmesi demek diğer tüm düğümlerin de çok kısa bir sürede enerjilerinin biteceği anlamı taşımaktadır.

Mica2 düğümlerinde haberleşme birimi olarak CC1000 radyoları kullanılmaktadır. KAA alanında bu radyoları kullanan düğümler yaygın olarak kullanıldığı için enerji tüketim karakteristikleri genelde çalışılmıştır [98]. Çizelge 4.1'de Mica2 düğümleri için seçilen çıkış gücü seviyesine göre harcanan enerji seviyeleri verilmiştir. Bu çizelgede $P_{tx}^{crc}(l)$ güç seviyesi- l seçildiği durumda gönderme devrelerinin harcadığı gücü $P_{tx}^{ant}(l)$ ise bu durumda antene basılan güç seviyesini mW cinsinden verilmektedir. Seçilebilecek güç seviyeleri kümesi S_L ile gösterilmektedir ve Mica2 düğümleri için 26 elemanlı bir kümedir.

Düğümlerin alma durumunda harcadıkları enerji $35.4 mW$ 'tır ($P_{rx}^{crc} = 35.4 mW$). Her bir 20 s zaman aralığında düğümlerin veri toplamak için harcadığı enerji de $E_{DA} = 600 \mu J$ 'dür. Veri paketinin boyutu başlık da dahil olmak üzere 100 Byte seçilmiştir ($M_p = 100$ Byte). Onay paketinin boyutu ise 100 Byte seçilmiştir ($M_A = 20$ Byte). TDMA yapı için her bir gönderme dilimi (T_{slot}) 51 ms olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1: Her bir güç seviyesi l için CC1000 radyosu kullanan Mica2 düğümlerinin gönderme devreleri güç tüketimi ($P_{tx}^{crc}(l)$ mW cinsinden) ve anten çıkış gücü ($P_{tx}^{ant}(l)$ mW cinsinden)

| l | $P_{tx}^{crc}(l)$ | $P_{tx}^{ant}(l)$ | l | $P_{tx}^{crc}(l)$ | $P_{tx}^{ant}(l)$ |
|-----|-------------------|-------------------|-----|-------------------|-------------------|
| 1 | 25.8 | 0.0100 | 14 | 32.4 | 0.1995 |
| 2 | 26.4 | 0.0126 | 15 | 33.3 | 0.2512 |
| 3 | 27.0 | 0.0158 | 16 | 41.4 | 0.3162 |
| 4 | 27.1 | 0.0200 | 17 | 43.5 | 0.3981 |
| 5 | 27.3 | 0.0251 | 18 | 43.6 | 0.5012 |
| 6 | 27.8 | 0.0316 | 19 | 45.3 | 0.6310 |
| 7 | 27.9 | 0.0398 | 20 | 47.4 | 0.7943 |
| 8 | 28.5 | 0.0501 | 21 | 50.4 | 1.0000 |
| 9 | 29.1 | 0.0631 | 22 | 51.6 | 1.2589 |
| 10 | 29.7 | 0.0794 | 23 | 55.5 | 1.5849 |
| 11 | 30.3 | 0.1000 | 24 | 57.6 | 1.9953 |
| 12 | 31.2 | 0.1259 | 25 | 63.9 | 2.5119 |
| 13 | 31.8 | 0.1585 | 26 | 76.2 | 3.1623 |

Gönderme güç seviyesi- l seçildiği durumda (i, j) düğüm çifti için düğüm- j 'deki alınan güç seviyesi, $P_{rx,ij}^{ant}(l)$

$$P_{rx,ij}^{ant}(l)[\text{dBm}] = P_{tx}^{ant}(l)[\text{dBm}] - \Upsilon_{ij}[\text{dB}] \quad (4.1)$$

şeklinde hesaplanır. Burada Υ_{ij} , (i, j) düğüm çifti için yol kaybı değeridir. Bu değer seçilen her bir yol kaybı modeline göre hesaplanmaktadır. Bu durumda SNR,

$$\psi_{ij}(l)[\text{dB}] = P_{rx,ij}^{ant}(l)[\text{dBm}] - P_n[\text{dBm}], \quad (4.2)$$

olarak hesaplanır. Burada P_n -115 dBm Mica2 düğümleri için alma bandgenişliği düşünüldükçe elde edilen gürültü seviyesidir [99]. Bu SNR değeri için PRR, paket alma oranı, şu şekilde hesaplanır [99]:

$$p_{ij}^s(l, \varphi) = \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-\psi_{ij}(l)}{2} \frac{1}{0.64}\right) \right)^{8\varphi}, \quad (4.3)$$

φ gönderilen paketin boyutunu Byte cinsinden göstermektedir. Dolayısıyla bir paketin alınmaması olasılığı da,

$$p_{ij}^f(l, \varphi) = 1 - p_{ij}^s(l, \varphi) \quad (4.4)$$

şeklinde hesaplanır. Dolayısıyla l seviyesinde gönderilen verinin k güç seviyesinde

onay paketi ile onaylanması durumunda karşılıklı el sıkışmanın başarılı olma olasılığı,

$$p_{ij}^{HS,s}(l,k) = p_{ij}^s(l, M_P) \times p_{ji}^s(k, M_A) \quad (4.5)$$

şeklinde hesaplanır. Bu durum $P_{rx,ij}^{ant}(l) \geq P_{sns}$ ve $P_{rx,ji}^{ant}(k) \geq P_{sns}$ iken geçerlidir. Burada P_{sns} Mica2 düğümlerinin alma hassasiyetini göstermektedir ve $P_{sns} = -102$ dBm'dir [98]. Eğer $P_{rx,ij}^{ant}(l) < P_{sns}$ veya $P_{rx,ji}^{ant}(k) < P_{sns}$, ise yani veri veya onay paketlerinden herhangi birinin almaya ulaşan güç seviyesi hassasiyet seviyesinin altında ise $p_{ij}^{HS,s}(l,k) = 0$ 'dır. Yani başarılı tokalaşma gerçekleşemez.

Bu durumda başarısız tokalaşma olasılığı,

$$p_{ij}^{HS,f}(l,k) = 1 - p_{ij}^{HS,s}(l,k) \quad (4.6)$$

olur. Dolayısıyla başarılı tokalaşma olasılığı düşünülerek her bir veri paketinin ortalama,

$$\lambda_{ij}(l,k) = 1/p_{ij}^{HS,s}(l,k) \quad (4.7)$$

defa tekrar gönderilmesi gerekir. Düğüm- i 'den düğüm- j 'ye M_P Byte veri paketi l güç seviyesinde gönderilirken harcanan enerji,

$$E_{tx}^P(l, M_P) = P_{tx}^{crc}(l) T_{tx}(M_P) \quad (4.8)$$

olarak hesaplanır. Burada $T_{tx}(M_P)$ veri paketinin gönderme süresini göstermektedir ve toplam bit sayısının kanal veri hızına ($\xi = 19.2$ Kbps) bölünmesi ile bulunur [90]. Benzer şekilde $T_{tx}(M_A)$ ise onay paketinin gönderme süresini göstermektedir.

Bir düğüm eğer gönderme yapmıyorsa alma durumunda beklemektedir. Bundan dolayı TDMA zaman diliminde bir düğümün göndermede enerji harcaması, diğer zamanlarda almada olduğu düşünülerek,

$$E_{tx}^{HS}(l, M_P) = E_{tx}^P(l, M_P) + P_{rx}^{crc}(T_{slot} - T_{tx}(M_P)). \quad (4.9)$$

şeklinde hesaplanır. Göndermecin enerji harcaması paketlerin tekrar gönderilmesi ve veri işleme enerjisi ($E_{PP} = 120 \mu\text{J}$) dahil edilince,

$$E_{tx,ij}^D(l,k) = E_{PP} + \lambda_{ij}(l,k) E_{tx}^{HS}(l, M_P). \quad (4.10)$$

olur. Diğer taraftan başarılı tokalaşma için veri paketinin alınması ve onay paketiyle cevap verilmesi durumunda harcanan enerji ise,

$$E_{rx}^{HS,s}(k, M_A) = P_{rx}^{crc}(T_{slot} - T_{tx}(M_A)) + E_{tx}^P(k, M_A). \quad (4.11)$$

olur. Eğer tokalaşmadaki problem veri paketinin alınamamasından kaynaklanıyor ise almanın enerji harcaması,

$$E_{rx}^{HS,f} = P_{rx}^{crc} T_{slot}. \quad (4.12)$$

şeklinde hesaplanır. Dolayısıyla tüm bu durumlar düşünülerek paket hatalarını da içeren genel almaç enerji harcaması,

$$E_{rx,ji}^D(l,k) = E_{rx}^{HS,s}(k, M_A) + E_{PP} + \lambda_{ij}(l,k) \times \left[p_{ij}^s(l, M_P) p_{ji}^f(k, M_A) E_{rx}^{HS,s}(k, M_A) + p_{ij}^f(l, M_P) E_{rx}^{HS,f} \right] \quad (4.13)$$

şeklinde hesaplanır.

4.2 Matematiksel Programlama Modeli

Bu bölümde KAA yaşam süresi enbüyüklemesine yönelik olarak kullanılan MIP programlama omurgası anlatılmaktadır. Bu modelde yol kaybı farklı modeller ile hesaplanarak yaşam süresine etkileri incelenmiştir. Ağ topolojisi yönlü graf ile gösterilmiştir. V baz istasyonu da dahil olmak üzere tüm düğümlerin kümesini ve A kümesi de düğümleri birbirine bağlayan yayları göstermek üzere $G = (V, A)$, grafi KAA'yı sembolize etmektedir. Düğüm-1 baz istasyonunu göstermektedir. Ayrıca baz istasyonu hariç olacak şekilde diğer tüm düğümleri gösteren küme de W kümesi ile gösterilmektedir ($W = V \setminus \{1\}$).

Bu durumda yayların kümesi $A = \{(i, j) : i \in W, j \in V - i\}$ şeklinde tanımlanır ve tanımın kendisi hiçbir düğümün kendisine veri gönderecek şekilde kapalı döngü oluşmasını engeller. Son olarak düğüm- i 'den düğüm- j 'ye gönderilen paket sayısı f_{ij} ile gösterilmektedir.

Eniyileme problemi Şekil 4.1'de verilmektedir. N_{rnd} kaç adet 20 saniyelik aralığın gerçekleştiğini göstermektedir ve $N_{rnd} \times T_{rnd}$ çarpımı ağ yaşam süresini vermektedir. Dolayısıyla eniyileme probleminin amacı N_{rnd} enbüyüklemesidir ve problemin kısıtları da şekildeki denklemlerde verilmektedir.

Denklem 4.14 baz istasyonu hariç her bir düğüm için akış dengelemesi kısıtını ifade etmektedir. Temel olarak bir düğümde üretilen veri ile o düğüme giren veri miktarının toplamının, ilgili düğümden çıkan veri miktarına eşit olmak zorunda olduğunu ifade etmektedir. Denklem 4.15 üretilen tüm verilerin baz istasyonuna, düğüm-1, ulaştığını garantiler. Denklem 4.16 her bir düğümün gönderme, alma ve veri toplama ile geçen toplam meşgul olduğu süreyi ifade etmektedir.

Enerji kısıtı Denklem 4.17'te verilmiştir. Bu denklem de gönderme, uyku, alma ve veri toplama enerjilerinin toplamının her bir düğümün başta sahip olduğu batarya enerjisinden, ρ , küçük eşit olduğunu göstermektedir. Dikkat edilirse eğer bir düğüm gönderme, alma veya veri toplama durumlarından birinde değilse uyku durumundadır. Uyku durumunda güç tüketimi $P_{slp} = 30 \mu W$ 'tır. Her bir düğümün başta 2 adet AA pilin normal enerji değeri olan $\rho = 10$ KJ enerjiye sahip olduğu varsayılmıştır.

Bandgenişliği ile ilgili kısıt da Denklem 4.18 ile ifade edilmiştir. Bu denklem ile ifade edilen tüm haberleşme operasyonlarının (gönderme, alma ve hatta girişim) toplamı tüm ağ genelinde kullanılabilir bandgenişliği ile limitlenmesidir. Bu limit gelen, giden ve girişim akışlarının toplamı toplam yaşam süresi ile limitlendiği şekilde formüle

Amaç: N_{rnd} enbüyüklemesi

Kısıtlar:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij} - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji} = N_{rnd} s_i \quad \forall i \in W \quad (4.14)$$

$$\sum_{(j,1) \in A} f_{j1} = N_{rnd} \sum_{j \in W} s_j \quad (4.15)$$

$$T_{bsy,i} = T_{slot} \left[\sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji} \right] + N_{rnd} T_{DA} \quad \forall i \in W \quad (4.16)$$

$$\underbrace{\sum_{(i,j) \in A} E_{tx,ij}^D(l,k) f_{ij}}_{\text{gönderme}} + \underbrace{P_{slp}(N_{rnd} T_{rnd} - T_{bsy,i})}_{\text{sleep}} + \underbrace{\sum_{(j,i) \in A} E_{rx,ji}^D(l,k) f_{ji}}_{\text{alma}} + \underbrace{N_{rnd} E_{DA}}_{\text{veri toplama}} \leq \rho \quad \forall i \in W \quad (4.17)$$

$$T_{slot} \left[\sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji} + \sum_{(j,n) \in A} \lambda_{jn}(l,k) f_{jn} I_{jn}^i(l,k) \right] \leq N_{rnd} T_{rnd}, \quad \forall i \in W \quad (4.18)$$

$$I_{jn}^i(l,k) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } P_{rx,ji}^{ant}(l) \geq P_{sns} \text{ veya } P_{rx,ni}^{ant}(k) \geq P_{sns} \\ 0 & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad (4.19)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \quad (4.20)$$

Şekil 4.1: Matematiksel programlama modeli.

edilmiştir. Bu kısıt, [96] çalışmasında verilen koşulun çok az değiştirilmiş halini ifade etmektedir.

Girişim akışları, düğüm- i etrafında olan ancak bu düğüme girmeyen ne de bu düğümden çıkmayan akışlar olarak ifade edilebilir. Yani aslında başka iki düğüm arasında akan akışlar olmasına rağmen düğüm- i 'ye de hassasiyet seviyesinin üzerinde ulaşan akışlardır. Girişim fonksiyonu $I_{jn}^i(l,k)$ Denklem 4.19 ile ifade edilmiştir. Güç seviyesi l de düğüm- j 'den düğüm- n 'e yapılan veri göndermesi esnasında düğüm- i girişim alanında bulunuyorsa ya da güç seviyesi k ile düğüm- n 'den düğüm- j 'e onay göndermesi

sırasında düğüm- i girişim alanında bulunuyorsa girişim fonksiyonu 1 değerini alır, değilse girişim fonksiyonunun değeri sıfır olur. Son olarak Denklem 4.20 tüm akışların sıfır veya pozitif olduğunu ifade eder negatif akış tanımlı değildir.

Şekil 4.1’de verilen MIP programlama yapısında veri ve onay paketlerinin gönderme güç seviyelerinin sadece ilgili linkteki enerji tüketimleri düşünülerek belirlendiği varsayılmaktadır. Dolayısıyla veri paketi gönderimi için düğüm- i ile düğüm- j arasında tek bir eniyi gönderme seviyesi l_{ij}^{opt} ve onay paketi gönderimi için düğüm- j ile düğüm- i arasında tek bir eniyi gönderme seviyesi k_{ji}^{opt} belirlenmektedir. Bu seviyelerin belirlenmesi için de şu arama fonksiyonu kullanılmaktadır:

$$\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\} = \underset{l \in S_L, k \in S_L}{\operatorname{argmin}} \left(E_{tx,ij}^D(l, k) + E_{rx,ji}^D(l, k) \right). \quad (4.21)$$

Bu fonksiyon sadece link seviyesi gönderme ve alma enerjilerini enküçükleyen l ve k değerlerini belirlemektedir.

4.3 Analiz

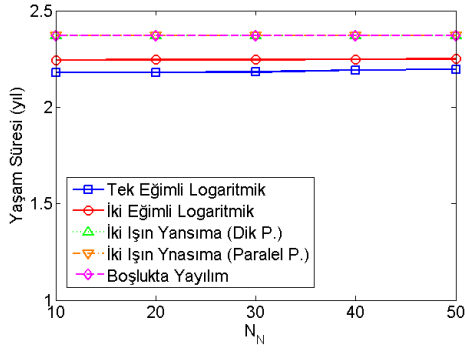
Bu bölümde yol kaybı modellerinin KAA yaşam süresine etkisine dair sayısal analizlerin sonuçları verilmektedir. Analizler için disk şeklinde bir alana rastgele dağıtılmış algılayıcı düğümleri varsayılmıştır. Baz istasyonu diskin merkezinde yer almaktadır. Ağ için diskin yarı çapı R_{net} değiştirilmiş ve her defasında N_N adet algılayıcı düğümün bu alana uniform dağılım ile rastgele yerleştiği varsayılmıştır.

Fiziksel katman modelinin oluşturulması için Bölüm 4.1’de verilen denklemler MATLAB kullanılarak modellenmiştir. MIP ile eniyileme modellemesi ise Bölüm 4.2’de verilen denklemler ile GAMS (ing. General Algebraic Modeling System) kullanılarak modellenmiştir ve CPLEX çözücü kullanılarak problem çözümüne ulaşılmıştır.

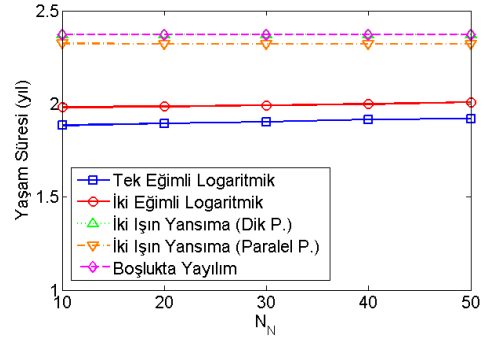
Bölüm 3.1’de verilen 868 MHz çalışma frekansında park ortamı için ve gönderme-çalmaç anten yükseklikleri 13 cm iken elde edilen ölçüm sonuçları kullanılmaktadır [1]. Deneysel modeller olarak tek eğimli ve iki eğimli logaritmik gölgeleme modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada park ortamında parametreler tek eğimli model için $PL(d_0) = 31$ dB, $n = 3.69$, ve standart sapma $\sigma = 1.42$ dB olarak iki eğimli model için ise $PL(d_{01}) = 33$ dB, $PL(d_{02}) = 23$ dB, $n_1 = 2.09$, $n_2 = 4.01$, $d_b = 0.95$ m, standard sapmalar $\sigma_1 = 0.28$ dB ve $\sigma_2 = 0.67$ dB olarak ölçülmüştür. Ayrıca CC100 radyolarının çıkışında dörtte bir dalga boyunda monopollü anten kullanılmıştır ki bu antenlerin kazancı 5.19 dBi’dir [100].

Daha önce de belirtildiği gibi iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli için çıkarılan standart sapma değerleri tek eğimli model için çıkarılana göre daha küçüktür. Dolayısıyla ölçüm sonuçlarını daha iyi gösterdiği söylenebilir ve referans model olarak kıyaslamak üzere analizde bu model kullanılacaktır.

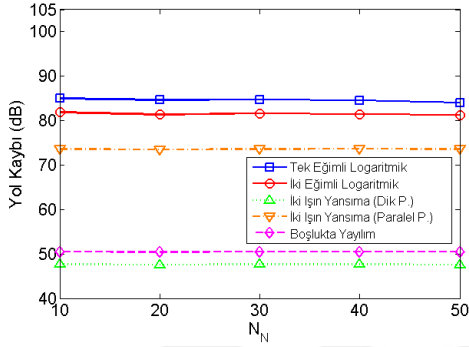
Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4’te elde edilen yaşam süresi ve yol kaybı değerleri sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuçlar için ağ yarıçapı $R_{net} = 50, 75, 100, 125, 150$ ve $175m$ olmak



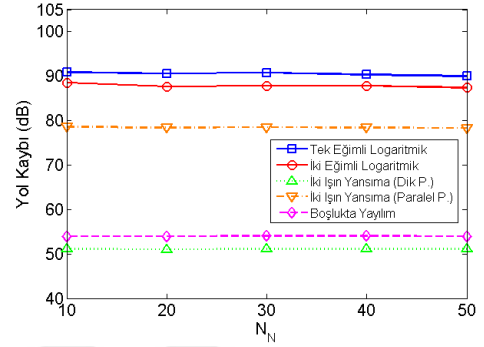
(a) $R_{net} = 50$ m.



(b) $R_{net} = 75$ m.



(c) $R_{net} = 50$ m.



(d) $R_{net} = 75$ m.

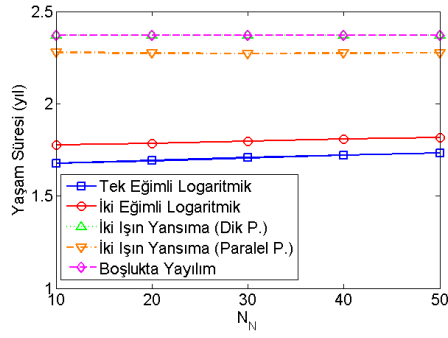
Şekil 4.2: Ağ yaşam süresi ve ortalama yol kaybı değerlerinin, düğüm sayısına, N_N , bağlı değişimi ($R_{net} = 50$ ve 75 m).

üzere 6 farklı değer, düğüm sayısı $N_N = 10, 20, 30, 40$ ve 50 olmak üzere 5 farklı değer alınmıştır. Ayrıca her bir topoloji için sunulan sonuçlar 100 rastgele dağılım ile alınan sonuçların ortalamasıdır. Dolayısıyla yol kaybı için de 5 farklı model kullanıldığında, sunulan sonuçların elde edilmesi için 15.000 farklı eniyileme problemi çözdürülmüştür.

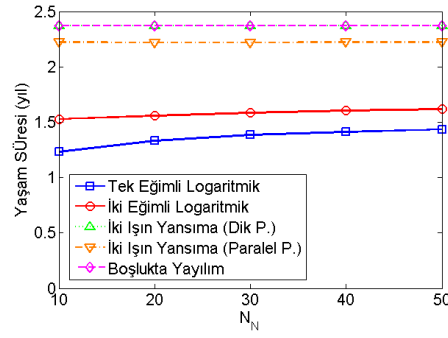
Şekillerde verilen KAA yaşam süresi değerleri yıl cinsinden verilmektedir. Benzer şekilde verilen yol kaybı değerleri de ağ genelinde birbiri ile haberleşen düğüm çiftleri için hesaplanan yol kaybı değerlerinin ortalamasıdır dB cinsinden verilmektedir. Yol kaybı modelleri olarak bahsedilen deneysel modeller ile birlikte analitik modeller olan boşlukta yayılım ve iki ışın yansımaya modelleri (her iki polarizasyon için ayrı olmak üzere) kullanılmıştır.

Şekiller kontrol edildiğinde tüm ağ yarı çapları için tek eğimli ve iki eğimli logaritmik gölgeleme modelleri en yük sek yol kaybı tahminlerini yapmaktadır. Analitik modellerin üçünün de yol kaybı tahminleri deneysel modellerden daha az kalmaktadır. Çünkü önceki bölümlerde bahsedildiği gibi antenler yere yakın iken analitik modeller baskın olan yayılım mekanizmalarının etkilerini modele yansıtmakta güçlük çekmektedir.

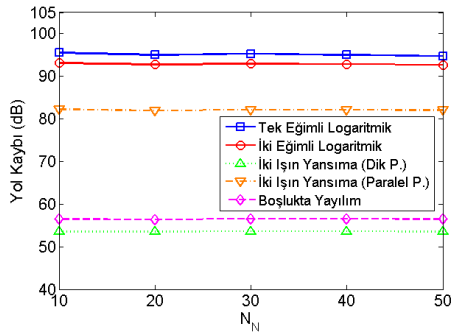
Bununla birlikte tüm durumlarda analitik modeller içinde yol kaybı tahmininde diğer analitik modellerden ayrışan ve deneysel modellere göreceli yakın sonuçlar veren model dik polarizasyonlu dalga için iki ışın yansımaya yol kaybı modeli olmuştur. Ancak onun bile yol kaybı tahmini deneysel modellerden fark edilir şekilde az olmuştur. Do-



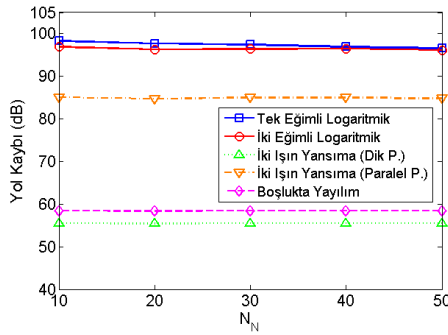
(a) $R_{net} = 100$ m.



(b) $R_{net} = 125$ m.



(c) $R_{net} = 100$ m.



(d) $R_{net} = 125$ m.

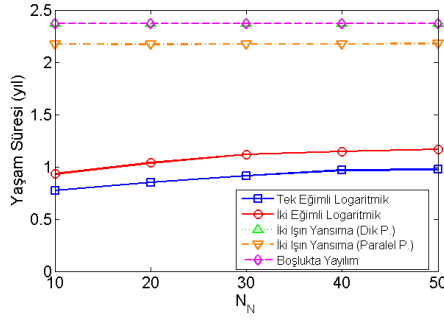
Şekil 4.3: Ağ yaşam süresi ve ortalama yol kaybı değerlerinin, düğüm sayısına, N_N , bağlı değişimi ($R_{net} = 100$ ve 125 m).

layısıyla yol kaybı tahmininin gerçekçi değerlerden daha düşük olması da ilgili model için ağ yaşam süresi değerinin yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.

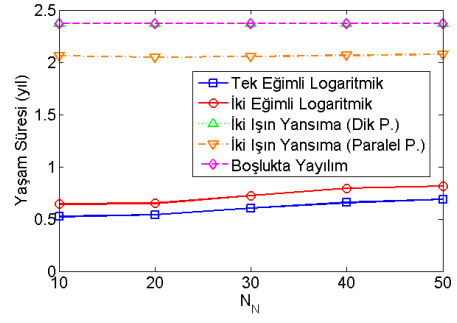
Ağ yarıçapı için en büyük 175 m kullanılmıştır. Çünkü daha büyük ağlar için deneysel modeller ile birbiriyle haberleşemeyen düğüm sayısı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Örneğin $R_{net} = 250$ m için düğümlerin %95'i birbiri ile haberleşememeye başlamaktadır.

Yaşam süreleri kontrol edildiğinde boşlukta yayılım ve paralel polarizasyon için iki ışın yansımaya modellerinin ikisinin de ağ yarı çapının değişiminden etkilenmeden sürekli 2.37 yıl olarak hesaplandığı görülmektedir. Normal olarak ağ yarı çapı arttıkça yol kaybının artması ve yaşam süresinin düşmesi beklenmektedir. Ancak bu iki modelin yol kaybı tahminleri o kadar düşük kalmaktadır ki yarı çapın artması ile bu modellerin yol kaybı tahminindeki artış düğümlerin haberleşme için bir yüksek gönderme güç seviyesine geçmesine sebep olacak kadar yüksek değildir. Yani her düğüm en düşük gönderme güç seviyesi ile bile yeterli düğüm ile haberleşebilmektedir.

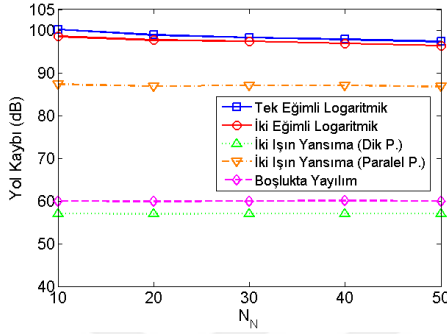
Deneysel modellerin durumu kontrol edildiğinde tek eğimli logaritmik gölgeleme modelinin analitik modellerden ciddi bir şekilde ayrılarak iki eğimli modele göreceli yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak bu yakın ağ yaşam süresi değerleri arasındaki fark R_{net} büyüdükçe artmaktadır. Örneğin 40 adet düğüm için ($N_N = 40$) $R_{net} = 75$ m iken iki model arasındaki ağ yaşam süresi farkı %4 iken bu değer $R_{net} = 150$ m iken %16 değerine kadar çıkmaktadır. Hatta $R_{net} = 175$ m iken bu değer %20'lere yak-



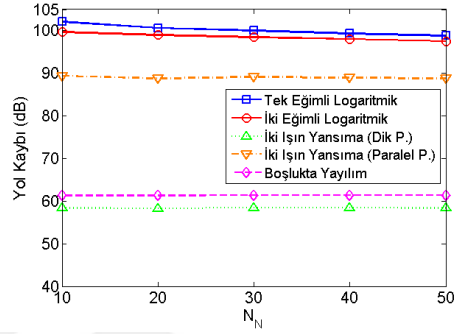
(a) $R_{net} = 150$ m.



(b) $R_{net} = 175$ m.



(c) $R_{net} = 150$ m.



(d) $R_{net} = 175$ m.

Şekil 4.4: Ağ yaşam süresi ve ortalama yol kaybı değerlerinin, düğüm sayısına, N_N , bağlı değişimi ($R_{net} = 150$ ve 175 m).

laşmaktadır.

$R_{net} = 50$ m ve $N_N = 50$ için boşlukta yayılım ve paralel polarizasyon için iki ışın yansımaya modelleri ile elde edilen yaşam süresi değerleri iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli ile elde edilen değerlerin sadece 1.05 katı çıkmaktadır. Ancak bu fark $R_{net} = 125$ m ve $N_N = 50$ için 1.58 kata, $R_{net} = 175$ m ve $N_N = 50$ için 3.38 kata kadar çıkmaktadır.

Bu karşılaştırmalardan çıkarılan sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. R_{net} değeri arttıkça modellerin yol kaybı tahmin hataları artmaktadır.
2. R_{net} değeri arttıkça modellerle elde edilen yaşam süreleri deneysel modellerde ciddi şekilde azalmaya başlarken analitik modellerde o kadar hızlı bir şekilde azalmamaktadır. Çünkü yol kaybı değerindeki artış deneysel modellerde daha yüksek güç seviyelerinde gönderme kararına sebep olurken, analitik modellerde düşük güç seviyeleriyle de haberleşme sağlanabileceği yanlış kararı verilmektedir.
3. Ağ yaşam süreleri arasındaki farklar düğüm sayısının değişmesinden çok fazla etkilenmemektedir. Asıl etkenler kullanılan yol kaybı modeli ve ağ yarıçapı olarak gözükmemektedir.
4. Ağ yarıçapı arttıkça deneysel modellerle elde edilen yaşam süresi değerleri ile

analitik modellerle elde edilen değerler arasındaki farklar ciddi miktarda artmaktadır.

5. Analitik modeller içerisinde yol kaybı tahminleri açısından goreceli olarak deneysel modellere yakın sonuç veren doğru polarizasyonlu iki ışın yansıma modeli bile antenler yere yakın iken ağ yaşam suresi açısından ciddi hatalara sebep olmaktadır.

4.4 Sonuç

Bu blimde KAA'larda kullanılan yol kaybı modellerinin yaşam suresine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için karışık tamsayılı programlama yapısı ile yaşam suresi enbüyükleme problemi oluşturulmuş ve bu problem için Mica2 duğmlerinin enerji tuketim değerleri temel alınarak KAA'lar için bir enerji modeli de oluşturulmuştur. Karşılaştırmalar özellikle almaç ve gonderme antenlerinin yere çok yakın olduğu senaryo için yapılmıştır.

Sonuçlar göstermektedir ki yere yakın antenler kullanıldığı durumlar için ağ yaşam suresi açısından analitik modeller deneysel modellere göre %250'lere varan oranlarda hataya sebep olabilmektedir. Buradaki temel etken yere yakın durumlarda baskın olan yayılım mekanizmalarını modele dahil etmek noktasında analitik modellerin yetersiz kalmasıdır.

Deneysel model olan tek eğimli logaritmik gölgeleme modelinin yol kaybı tahmininde yaptığı hatanın ağ yaşam suresine etkisi küçük yarıçaplı ağlar için %4'ler kadar az iken büyük yarıçaplı ağlarda bu fark %20 değerlerine yaklaşmaktadır. Dolayısıyla yere yakın antenlerin yer aldığı KAA uygulamalarında deneysel olmayan modellerin kullanılmasından kesinlikle kaçınılması gerekmektedir, diğer türlü ağ yaşam suresi gibi kritik bir ağ parametresinin hesaplanmasında ciddi hatalara sebep olabilmektedir.

5. KAA'LARDA PAKET BOYUTU ENİYİLEMESİ

KAA'lar için en kritik limitlerin başında düğümlerin sahip olduğu enerji geldiği ve ağın planlanan işlevini yerine getirebilmesi için bu enerjinin düğüm başına ve ağ genelinde verimli ve dengeli kullanılması gerekmektedir. Göndermeç güç kontrolü ve paket boyutu eniyilemesi KAA yaşam süresini artırabilmek için kullanılan iki önemli mekanizmadır. Göndermeç gücünü artırmak düğümler arası haberleşmede BER'i düşürecek için paketin alınma olasılığını artırır ancak gereksiz artırılan göndermeç çıkış gücü kısıtlı düğüm enerjisinin verimsiz kullanılmasına sebep olur. Özellikle yol kaybı değerinin küçük olduğu düğüm çiftleri için düşük BER ile çalışmak amacıyla göndermeç gücünü artırmak verimsizliği artırır.

Gönderme çıkış gücü kontrolü yanında paket boyutu da haberleşme verimi için kritiktir. Büyük paket boyutları kullanmak faydalı yük ve destek bitleri oranını artırdığı için verimliliği artırır. Ancak büyük paketler de SNR ve BER değerine göre PRR'i düşürebilir ve paketlerin tekrar gönderilmesine sebep olarak verimi düşürebilir. Dolayısıyla göndermeç güç seviyesi ve paket boyutu seçimi aslında birbiri ile ilintilidir ve bu iki değer birlikte eniyilemesi KAA'ların yaşam süresi enbüyüklemesi için çok kritik bir hal almaktadır.

Dolayısıyla bu bölümde KAA'larda aynı anda gönderme güç kontrolü yapılması ve paket boyutu belirlenmesine izin verecek şekilde bir karışık tamsayı programlama omurgası sunulmaktadır. Bu programlama altyapısı ile yol kaybı değerleri çok farklılaşan akıllı elektrik şebekesi ortamları için yapılmış olan deneysel çalışmaların[101] sonuçları kullanılarak problem çözümü yapılmaktadır.

Çalışma için akıllı şebeke uygulamalarına yönelik yol kaybı değerleri kullanılarak KAA'ların önemli bir uygulama alanı hedeflenmiştir. Yol kaybı parametreleri Tmote Sky algılayıcı düğümleri için çıkarıldığından fiziksel katman ve enerji tüketim değerleri için bu düğümler temel alınarak, model parametreleri oluşturulmuştur [8].

5.1 Giriş

KAA'lar kolay kurulumu, bol çeşitliliği ve göreceli düşük fiyatı dolayısıyla akıllı enerji şebekeleri için çok kullanışlı bir teknolojidir.

Akıllı enerji şebekeleri geleneksel elektrik şebekelerinin çok daha gelişmiş, enerji ve bilgi interneti olarak tanımlanabilecek çok geniş bir alana dağılan bir konudur [102, 103]. Akıllı enerji şebekelerinde enerjinin üretimi, dağıtımı, fiyatlaması, kullanımını ve depolanması gibi tüm aktivitelerin dağınık, entegre, güvenilir ve sürdürülebilir şekilde çoklu koordinasyon ile ele alınması esastır [12, 13]. Aslında akıllı enerji şebekesi global enerji akışını ve son kullanıcı ihtiyacını verimli olarak düzenleyen sistemdir [14, 15].

Böyle bir şebeke için KAA'ların tam da ihtiyaç olan işlevleri görebildiği aşikardır [4]. Aslında algılama, izleme, haberleşme ve ağ kabiliyetleri ile KAA'lar değişik akıllı şebeke uygulamaları için biçilmiş kaftandır. Örneğin KAA'lar elektrik güç şebekelerinin üretim, taşıma hatları ve yenilenebilir enerji üretim sahaları gibi [104] değişik kısımlarına uygulanabilir. Bununla birlikte güç kullanımı, üretim verimliliği gibi şebeke açısından kritik bilgilerin ölçülmesi, toplanması ve merkezi işleme merkezlerine iletilmesi de tam KAA'ları tanımlayan işlevlerdir.

Ayrıca çevre güvenliğinin sağlanması ve yabancı girişinin tespiti de akıllı şebekelerle ilgili sahalarda için kritik KAA uygulamalarındandır. Bu ihtiyaçları ile akıllı şebekelerin ihtiyaçlarının KAA uygulamaları ile karşılanmasındaki temel zorluklardan biri akıllı şebeke ortamlarının elektromanyetik yayılım açısından zorlayıcı, engelli ortamlardır [105], [23].

KAA'larda en önemli performans göstergelerinden birinin yaşam süresi olduğunu ve yaşam süresi için etkili enerji harcamaları içindeki önemli kaleminde haberleşme enerjisi olduğu vurgulanmıştır [106]. Dolayısıyla KAA'larda haberleşme ve ağ yapısı ile ilgili tüm noktalarda eniyileme çalışmaları ile muhtemel iyileştirmeler için çalışılmaktadır. Normal KAA uygulamaları için bile gönderme güç kontrolü ve paket boyutunun ortak olarak en iyilemesi önemli bir kazanç sağlarken özellikle açık saha ortamlarına nispeten zorlu elektromanyetik yayılım ortamlarına sahip olabilen akıllı şebeke uygulamaları [107] için böyle bir yaklaşım ciddi kazançlar sağlamaktadır.

Aslında paket boyutu eniyilemesi literatürde bir çok araştırmaya konu olmuştur. Ancak KAA'lara yönelik paket boyutu araştırmaları özel uygulama alanlarına yönelik ve akıllı enerji şebekelerine yönelik böyle bir çalışma bulunmamaktadır. Örneğin karasal KAA uygulamaları [108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116], sualtı uygulamaları [117, 118, 119, 120], yeraltı uygulamaları [121] ve insan vücudu KAA uygulamaları [122, 123, 124] için paket boyutu çalışmaları yapılmıştır. Akıllı şebekeler için kanal parametreleri çıkarmak üzere yapılmış olan [101] çalışmasında paket boyutunun PRR'e etkisi de incelenmiştir fakat akıllı şebekeler için gönderme gücü kontrolü ve paket boyutu ayarlaması ile ağ yaşam süresi iyileştirmeye yönelik bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu bölümde akıllı şebeke uygulamaları için gönderme güç seviyesi ve paket boyutunun birlikte eniyilemesine yönelik sistematik bir çalışma anlatılmaktadır. Bunun için [101] çalışmasında 3 farklı akıllı şebeke ortamında ölçüm sonuçları ile çıkarılmış logaritmik gölgeleme yol kaybı modeli parametreleri ve bu ölçümler sırasında kullanılan Tmote Sky düğümlerinin [8] enerji tüketim değerleri ile karışık tamsayı programlama modeli oluşturulmuştur. Değerlendirilen akıllı şebeke ortamları şunlardır:

- 500 kV dağıtım istasyonu (açık saha ortam)

- Güç kontrol odası (bina içi ortam)
- Yer altı ağ trafo odası

Böyle bir çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde sıralanabilir:

1. Akıllı şebeke yol kaybı parametreleri ve Tmote Sky güç tüketim değerleri ile 2.4 GHz çalışma frekansı için fiziksel ortam parametreleri oluşturulmuştur. Bu modellemede düğümlerin tokalaşma mekanizması da düşünülmüştür ki bu bir çok KAA çalışmasında ihmal edilmektedir. Bu modelde hem veri paketlerinin hem de onay paketlerinin doğru alınması matematiksel olasılık hesapları ile modele eklenmiştir.
2. Gönderme güç seviyesi ve paket boyutunun birlikte eniyelenmesine izin veren karışık tamsayılı programlama altyapısı oluşturulmuştur. Literatürde ya paket boyutu sabit tutularak gönderme güç seviyesi kontrolü ya da gönderme seviyesi sabit tutularak paket boyutu kontrolü yapılmaktadır.
3. Sistematik olarak 3 farklı ortam ve bu ortamlardaki ki farklı kanal durumu (LOS veya NLOS durumları) için akıllı şebekeler için güç ve paket kontrolü altyapısı geniş bir parametre kümesindeki sayısal değerlendirmelerle taranmıştır.

Sonraki bölümlerde bu amaca yönelik olarak öncelikle Bölüm 5.2’de fiziksel katman parametreleri incelenecek, sonra Bölüm 5.3’te matematiksel programlamanın ayrıntıları Bölüm 5.4’te sayısal analizler verilecektir.

5.2 Fiziksel Katman Parametreleri

Bu bölümde ilgili fiziksel katman parametreleri, 2400 MHz çalışma frekansı ve Tmote Sky algılayıcı düğümleri için belirlenecektir. Model için yapılan varsayımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Baz istasyonu ve algılayıcı düğümler zaman senkronizedir.
- Tüm düğümler hareketsizdir.
- Baz istasyonu genel ağ topoloji bilgisine sahiptir ve merkezi akış planlaması yapılabilmektedir.
- MAC katmanı için TDMA yapı kullanılmaktadır.
- Tüm düğümler üretilen veriyi ya direk baz istasyonuna iletmekte ya da çoklu hoplama ile diğer düğümleri röle olarak kullanarak baz istasyonuna iletmektedir.
- Zaman T_{rnd} eşit aralıklarına bölünmüştür ve her bir algılayıcı düğümü bu aralıklarda s_i kadar veri paketi üretmektedir.
- Algılayıcı düğümler arasındaki haberleşme iki yönlü tokalaşma ile sağlanmaktadır. Yani alınan her bir veri paketi için onay paketi gönderilmektedir.

- Ağ yaşam süresi tanımı için ağın çalışmaya başlamasından ilk düğümün enerjisinin bitmesine kadarki süre tanımı kullanılmaktadır [79, 97].

Modelin adımları düşünülerek gereken fiziksel katman parametreleri belirlenecektir. Model oluşturulurken izlenecek temel adımlar şu şekildedir:

1. Ağda birbiri ile haberleşmesi muhtemel her bir algılayıcı düğüm çifti için mesafeye göre yol kaybı hesaplanır.
2. Muhtemel çıkış gücü ve yol kaybı sayesinde her bir düğüm çifti için almaç girişindeki sinyal seviyesi belirlenir.
3. Alma devrelerinin gürültü faktörü ve alınan sinyalin gücü kullanılarak sinyal-gürültü oranı (ing. Signal-to-Noise Ratio, SNR) hesaplanır.
4. Belirlenmiş SNR yardımıyla düğümlerin kullandığı haberleşme kiplemesine göre bit başına hata oranı, BER hesaplanır.
5. BER hesabı sayesinde veri ve onay paketinin boyutuna göre paket alma olasılığı, PRR olasılıksal hesaplar ile belirlenir.
6. PRR'a göre doğru alınamayan paketlerin tekrar gönderilme oranı belirlenir.
7. Birbiri ile haberleşen algılayıcı düğümlerinin diğer düğümlere olan girişim etkisi hesaba katılır.
8. Belirli bir KAA topolojisi için kullanılması muhtemel tüm veri paketi boyutları için ağın yaşam süresini en büyüleyecek şekilde tüm düğümlerin gönderme çıkış gücü seviyeleri belirlenir.

Tmote Sky düğümleri Texas Instruments firmasının MSP430 numaralı mikroişlemcisini ve Chipcon firmasının CC2420 radyosunu içermektedir. Bu düğümler için 31 farklı gönderme güç seviyesi seçilebilmesine rağmen ilgili güç tüketimleri dokümanate edilmiş olan 8 adet gönderme güç seviyesi [8] vardır. Bu çalışmada yeterli verisi bulunan bu seviyeler kullanılmaktadır, ilgili seviyeler ve güç tüketimleri Çizelge 5.1'te gösterilmektedir. Veri alma sırasında Tmote Sky düğümlerinin güç tüketimi 69 mW 'tır ($P_{rx}^{crc} = 23\text{mA} \times 3\text{V} = 69 \text{ mW}$). Veri toplama enerjisi her bir turda her düğüm için bir defa harcanır ve $E_{DA} = 57 \mu\text{J}$ 'dür. Bu enerjinin hesaplanırken işlemcinin çalışma gücüne (5.4 mW) sensörün çalışma gücü eklenmiş (6 mW)[125] ve toplam güç ($P_{DA} = 11.4 \text{ mW}$) veri toplama ve işleme süresi ($T_{DA} = 5 \text{ ms}$) ile çarpılmış ve E_{DA} elde edilmiştir.

Her bir düğümün bir turda aynı miktarda veri ürettiği ve baz istasyonuna gönderdiği varsayılmaktadır. Bu veri miktarı 120 Byte'tır. Bir veri paketin içeriği faydalı yük ve başlık kısmından oluşmaktadır. Paket boyutunun etkisini belirlemek için faydalı yük uzunluğu, M_{PL} 120, 60, 40, 30, 24, ve 20 Byte değerlerinde değiştirilmektedir. Başlık uzunluğu, $M_H = 8$ Byte alınmıştır. Dolayısıyla veri paketi boyutu, M_P 128 ile 28 Byte arasında değişmektedir.

Veri paketlerine cevap olarak gönderilen onay paketlerinin uzunluğu $M_A = 12$ Byte alınmıştır. Veri paketinin değiştirilmesi sırasında model için paket boyutunun küçülmesi demek aynı miktarda veriyi iletmek için gönderilmesi gereken paket sayısının

Çizelge 5.1: Her bir göndeme güç seviyesi- l için gönderme devreleri güç tüketimi ($P_{tx}^{crc}(l)$ mW cinsinden) ve ilgili gönderme güç seviyesi ($P_{tx}^{ant}(l)$ dBm cinsinden).

| l | $P_{tx}^{crc}(l)$ (mW) | $P_{tx}^{ant}(l)$ (dBm) |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| 3 (l_{min}) | 25.5 | -25 |
| 7 | 29.7 | -15 |
| 11 | 33.6 | -10 |
| 15 | 37.5 | -7 |
| 19 | 41.7 | -5 |
| 23 | 45.6 | -3 |
| 27 | 49.5 | -1 |
| 31 (l_{max}) | 52.2 | 0 |

artması demektir. Aynı zamanda faydalı yük, paket başlığı oranının da düşmesi anlamına gelir.

TDMA yapıda herbir düğüm çiftinin haberleşme aralığı belirlidir. Bu aralıklar belirlenirken aralıkların başına ve sonuna zaman eşleştirme hatalarını telafi edebilmek için koruma zamanları konulur [126]. Bu koruma zamanı muhtemel maksimum eşleşme hatasının iki katı olacak şekilde $T_{grd} = 100 \mu s$ seçilmiştir.

Bu aralık ayrıca değişik gecikme sürelerini de içermelidir. Örneğin göndermeç ve almaç düğümleri arasındaki elektromanyetik yayılım gecikmeleri, T_{rsp} için $100 \mu s$ bırakılmıştır. Böylece tüm bahsedilen süreler göz önüne alınarak zaman aralığı paket boyutuna göre,

$$T_{slot} = [2 \times T_{grd} + T_{tx}(M_P) + T_{rsp} + T_{tx}(M_A)] \quad (5.1)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $T_{tx}(M_P)$ ve $T_{tx}(M_A)$ sırasıyla veri ve onay paketlerinin gönderme sürelerini göstermektedir. Bu süreler toplam bit sayısının kanal veri hızına ($\xi = 250$ Kbps) bölünmesiyle bulunur. Böylece $M_P = 128$ ve $M_A = 12$ Byte uzunlukları için $T_{slot} = 4.78$ ms olarak hesaplanır.

Literatürde KAA'lar için önerilen yol kaybı modelleri önceki bölümlerde incelenmiştir. Eğer uygulamaya özel ölçüm verileri var ise en doğru yaklaşımın bu sonuçların kullanılması olduğunu da karşılaştırmalı sayısal analizlerle görülmüştür. Dolayısıyla [4, 101] çalışmalarında 3 farklı akıllı şebeke ortamı ve LOS ile NLOS olacak şekilde iki farklı durum olmak üzere toplamda 6 farklı senaryo için elde edilmiş olan yol kaybı katsayısı ve standart sapma değerleri ile logaritmik gölgeleme yol kaybı modeli kullanılacaktır. Bu model için çıkarılmış parametreler Çizelge 5.2'de verilmiştir. (i, j) düğümleri arasındaki yol kaybı değeri, Υ_{ij} ,

$$\Upsilon_{ij}[\text{dB}] = \Upsilon_0[\text{dB}] + 10n \log_{10}(d_{ij}/d_0) + X_\sigma \quad [\text{dB}], \quad (5.2)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada d_{ij} göndermeç almaç arası mesafeyi, d_0 referans uzaklığı, Υ_0 bu referans mesafedeki yol kaybı değerini, n yol kaybı katsayısını, X_σ ise

Çizelge 5.2: Değişik akıllı şebeke ortamları için yol kaybı modeli parametreleri [4]

| Senaryo | Kısaltma | n | X_σ (dB) | P_n (dBm) |
|-----------------------------------|----------|------|-----------------|-------------|
| 500 kV dağıtım istasyonu (LOS) | OUS-L | 2.42 | 3.12 | -93 |
| 500 kV dağıtım istasyonu (NLOS) | OUS-N | 3.51 | 2.95 | -93 |
| Yer altı ağ trafo odası (LOS) | UNT-L | 1.45 | 2.45 | -92 |
| Yer altı ağ trafo odası (NLOS) | UNT-N | 3.15 | 3.19 | -92 |
| Bina içi güç kontrol odası (LOS) | IMP-L | 1.64 | 3.29 | -88 |
| Bina içi güç kontrol odası (NLOS) | IMP-N | 2.38 | 2.25 | -88 |

standart sapması σ olan Gauss rastgele değişkenini göstermektedir.

Gönderme güç seviyesi- l ile yapılan gönderme sırasında (i, j) linki için alınan sinyal seviyesi, $P_{rx,ij}^{ant}(l)$,

$$P_{rx,ij}^{ant}(l)[\text{dBm}] = P_{tx}^{ant}(l)[\text{dBm}] - \Upsilon_{ij}[\text{dB}]. \quad (5.3)$$

şeklinde elde edilir. Dolayısıyla SNR ($\psi_{ij}(l)$) hesabı,

$$\psi_{ij}(l)[\text{dB}] = P_{rx,ij}^{ant}(l)[\text{dBm}] - P_n[\text{dBm}], \quad (5.4)$$

olarak bulunur. Bu denklemde P_n , toplam gürültü gücünü göstermektedir ve almaç efektif bandgenişliği ve almaç gürültü faktörü ile birlikte hesaplanır. Bu değer Çizelge 5.2'te verilmiştir. SNR hesaplandıktan sonra BER hesabı kullanılan haberleşme kiplemesine göre değiştiğini unutmamak gerekir. Tmote Sky düğümlerinde kipleme olarak O-QPSK (ing. Offset - Quadrature Phase Shift Keying) kullanılmaktadır. O-QPSK için BER şu şekilde [39],

$$p_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (5.5)$$

hesaplanmaktadır. Burada bit enerjisinin gürültüye oranı $\frac{E_b}{N_0} = \psi_{ij}(l)G_P$ şeklinde hesaplanır ve G_P işlem kazancını göstermektedir. Bu değer CC2420 radyosunda 250 Kbit/s veri hızı için 8 olarak alınmaktadır ($\frac{2Mchip/s}{250Kbit/s}$) [125, 127].

Dolayısıyla BER hesaplandıktan sonra φ -Byte boyutunda bir paket için başarılı paket alma olasılığı,

$$p_{ij}^s(l, \varphi) = \left(1 - Q\left(\sqrt{16\psi_{ij}(l)}\right)\right)^{8\varphi}, \quad (5.6)$$

şeklinde hesaplanır ve paketin alınamama olasılığı da,

$$p_{ij}^f(l, \varphi) = 1 - p_{ij}^s(l, \varphi). \quad (5.7)$$

olur. Bu durumda (i, j) düğümleri arasında veri paketinin gönderilmesi ve onay paketi ile cevap alınması (başarılı tokalaşma) olasılığı,

$$p_{ij}^{HS,s}(l, k) = p_{ij}^s(l, M_P) \times p_{ji}^s(k, M_A) \quad (5.8)$$

şeklinde hesaplanır. Başarısız tokalaşma olasılığı da,

$$p_{ij}^{HS,f}(l,k) = 1 - p_{ij}^{HS,s}(l,k) \quad (5.9)$$

olur. Veri paketlerinin başarılı olarak alınması için ortalama olarak tekrarlanması gereken sayı, başarılı tokalaşma olasılığı ile ters orantılıdır.

$$\lambda_{ij}(l,k) = \frac{1}{p_{ij}^{HS,s}(l,k)} \quad (5.10)$$

M_P -Byte veri paketinin güç seviyesi- l ile gönderilmesi için harcanan enerji, $E_{tx}^D(l, M_P)$,

$$E_{tx}^D(l, M_P) = P_{tx}^{crc}(l) T_{tx}(M_P) \quad (5.11)$$

olarak hesaplanır. Her bir TDMA aralığında düğümler göndermelerini tamamladıktan sonra alma moduna geçerler. Dolayısıyla toplam harcanan enerji $T_{tx}(M_P)$ süresindeki gönderme enerjisi ve $T_{slot} - T_{tx}(M_P)$ süresindeki alma enerjisinin toplamıdır. Yani,

$$E_{tx}^{HS}(l, M_P) = E_{tx}^D(l, M_P) + P_{rx}^{crc}(T_{slot} - T_{tx}(M_P)) \quad (5.12)$$

şeklinde hesaplanır. Sonuç olarak paket işleme enerjisi ve tekrar göndermeleri de düşünerek veri gönderen düğümün göndermecinde harcanan toplam enerji,

$$E_{tx,ij}^D(l,k) = E_{PP} + \lambda_{ij}(l,k) E_{tx}^{HS}(l, M_P) \quad (5.13)$$

olur. Burada E_{PP} paket işleme enerjisidir ve her aralık için bir defaya mahsus harcanır. Paket işleme enerjisi hesaplanırken işlemcinin gücü (5.4 mW) [8] ve paket işleme için aktif olduğu zamanı çarpmak gerekir ($M_{PL} = 120$ Byte için $E_{PP} = 12.66 \mu J$).

Diğer taraftan veri paketini alan düğüm için alma ve onay paketi ile cevap verme sırasında harcanan enerji,

$$E_{rx}^{HS,s}(k, M_A) = P_{rx}^{crc}(T_{slot} - T_{tx}(M_A)) + E_{tx}^A(k, M_A) \quad (5.14)$$

şeklindedir. Eğer tokalaşmanın başarısız olma sebebi onay paketinin alınmasında yaşanan problem ise almaç tarafında harcanan enerji değişmeyecektir. Ancak eğer başarısızlık veri paketinin alınmasında ise o zaman almaç tarafındaki enerji harcaması,

$$E_{rx}^{HS,f} = P_{rx}^{crc} T_{slot} \quad (5.15)$$

olacaktır. Dolayısıyla tüm tekrar göndermeler düşünülerek almaç tarafındaki enerji harcaması,

$$E_{rx,ji}^D(l,k) = E_{PP} + \lambda_{ij}(l,k) \left[p_{ij}^{HS,s}(l,k) E_{rx}^{HS,s}(k, M_A) + p_{ij}^s(l, M_P) p_{ji}^f(k, M_A) E_{rx}^{HS,s}(k, M_A) + p_{ij}^f(l, M_P) E_{rx}^{HS,f} \right] \quad (5.16)$$

halini alır.

5.3 Matematiksel Programlama Modeli

Matematiksel programlama modeli için ağ topolojisi yönlü graf ile gösterilmiştir. $G = (V, A)$, grafi KAA'yı sembolize etmektedir. V baz istasyonu da dahil olmak üzere tüm düğümlerin kümesini ve A kümesi de düğümleri birbirine bağlayan yayları göstermektedir. Baz istasyonu hariç olacak şekilde diğer tüm düğümleri gösteren küme W kümesi ile gösterilmektedir ($W = V \setminus \{1\}$). Ayrıca baz istasyonunu düğüm-1 ile gösterilmektedir.

Bu durumda yayların kümesi $A = \{(i, j) : i \in W, j \in V - i\}$ şeklinde tanımlanır ve tanımın kendisi hiçbir düğümün kendisine veri gönderecek şekilde kapalı döngü oluşmasını engeller. Son olarak düğüm- i 'den düğüm- j 'ye gönderilen paket sayısı f_{ij} ile gösterilmektedir.

Eniyileme problemi Şekil 5.1'te verilmektedir. N_{rnd} kaç adet 40 saniyelik aralığın gerçekleştiğini göstermektedir ve $N_{rnd} \times T_{rnd}$ çarpımı ağ yaşam süresini vermektedir. Dolayısıyla eniyileme probleminin amacı N_{rnd} enbüyüklemesidir ve problemin kısıtları da şekildeki denklemlerde verilmektedir.

Denklem 5.17 baz istasyonu hariç her bir düğüm için akış dengelemesi kısıtını ifade etmektedir. Temel olarak bir düğümde üretilen veri ile o düğüme giren veri miktarının toplamının, ilgili düğümden çıkan veri miktarına eşit olmak zorunda olduğunu ifade etmektedir. Denklem 5.18 her bir düğümün gönderme, alma ve veri toplama ile geçen toplam meşgul olduğu süreyi ifade etmektedir.

Enerji kısıtı Denklem 5.19'te verilmiştir. Bu denklem de gönderme, uyku, alma ve veri toplama enerjilerinin toplamının her bir düğümün başta sahip olduğu batarya enerjisinden, ρ , küçük eşit olduğunu göstermektedir. Dikkat edilirse eğer bir düğüm gönderme, alma veya veri toplama durumlarından birinde değilse uyku durumundadır. Uyku durumunda güç tüketimi $P_{slp} = 3 \mu W$ 'tır. Her bir düğümün başta 2 adet AA pilin normal enerji değeri olan $\rho = 15$ KJ enerjiye sahip olduğu varsayılmıştır.

Bandgenişliği ile ilgili kısıt da Denklem 5.20 ile ifade edilmiştir. Bu denklem ile ifade edilen tüm haberleşme operasyonlarının (gönderme, alma ve hatta girişim) toplamı tüm ağ genelinde kullanılabilir bandgenişliği ile limitlenmesidir. Bu limit gelen, giden ve girişim akışlarının toplamı toplam yaşam süresi ile limitlendiği şekilde formüle edilmiştir. Bu kısıt, [96] çalışmasında verilen koşulun çok az değiştirilmiş halini ifade etmektedir.

Amaç: N_{rnd} enbüyüklemesi

Kısıtlar:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij} - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji} = N_{rnd} s_i \quad \forall i \in W \quad (5.17)$$

$$T_{bsy,i} = T_{slot} \left[\sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji} \right] + N_{rnd} T_{DA} \quad \forall i \in W \quad (5.18)$$

$$\underbrace{\sum_{(i,j) \in A} E_{tx,ij}^D(l,k) f_{ij}}_{\text{gönderme}} + \underbrace{P_{slp}(N_{rnd} T_{rnd} - T_{bsy,i})}_{\text{sleep}} + \underbrace{\sum_{(j,i) \in A} E_{rx,ji}^D(l,k) f_{ji}}_{\text{alma}} + \underbrace{N_{rnd} E_{DA}}_{\text{veri toplama}} \leq \rho \quad \forall i \in W \quad (5.19)$$

$$T_{slot} \left[\sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji} + \sum_{(j,n) \in A} \lambda_{jn}(l,k) f_{jn} I_{jn}^i(l,k) \right] \leq N_{rnd} T_{rnd}, \quad \forall i \in V \quad (5.20)$$

$$I_{jn}^i(l,k) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } P_{rx,ji}^{ant}(l) \geq P_{sns} \text{ veya } P_{rx,ni}^{ant}(k) \geq P_{sns} \\ 0 & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad (5.21)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.22)$$

Şekil 5.1: Matematiksel programlama modeli denklemleri.

Girişim akışları, düğüm- i etrafında olan ancak ne bu düğüme girmeyen ne de bu düğümden çıkmayan akışlar olarak ifade edilebilir. Yani aslında başka iki düğüm arasında akan akışlar olmasına rağmen düğüm- i 'ye de hassasiyet seviyesinin üzerinde ulaşan akışlardır. Girişim fonksiyonu $I_{jn}^i(l,k)$ Denklem 5.21 ile ifade edilmiştir. Güç seviyesi l de düğüm- j 'den düğüm- n 'e yapılan veri göndermesi esnasında düğüm- i girişim alanında bulunuyorsa ya da güç seviyesi k ile düğüm- n 'den düğüm- j 'e onay göndermesi sırasında düğüm- i girişim alanında bulunuyorsa girişim fonksiyonu 1 değerini alır, değilse girişim fonksiyonunun değeri sıfır olur. Son olarak Denklem 5.22 tüm akışların sıfır veya pozitif olduğunu ifade eder negatif akış tanımlı değildir.

Şekil 5.1'de verilen MIP programlama yapısında veri ve onay paketlerinin gönderme güç seviyelerinin sadece ilgili linkteki enerji tüketimleri düşünülerek belirlendiği var-

sayılmaktadır. Dolayısıyla veri paketi gönderimi için düğüm- i ile düğüm- j arasında tek bir eniyi gönderme seviyesi l_{ij}^{opt} ve onay paketi gönderimi için düğüm- j ile düğüm- i arasında tek bir eniyi gönderme seviyesi k_{ji}^{opt} belirlenmektedir [106]. Bu seviyelerin belirlenmesi için de şu arama fonksiyonu kullanılmaktadır:

$$\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\} = \underset{l \in S_L, k \in S_L}{\operatorname{argmin}} \left(E_{tx,ij}^D(l, k) + E_{rx,ji}^D(l, k) \right). \quad (5.23)$$

Bu fonksiyon sadece link seviyesi gönderme ve alma enerjilerini enküçükleyen l ve k değerlerini belirlemektedir.

5.4 Analiz

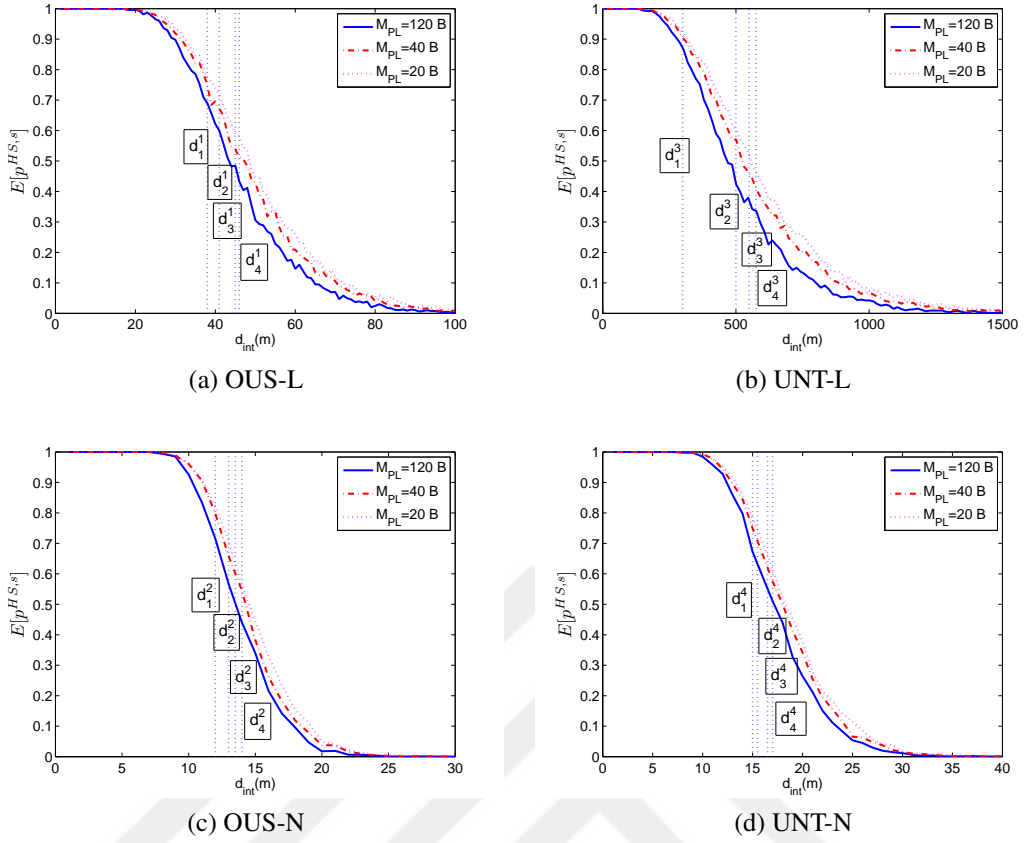
Bu bölümde paket boyutu değişiminin ağ yaşam süresine etkisini görmek üzere oluşturulan matematiksel model ile alınan sayısal sonuçlar sunulacak ve değerlendirilmesi yapılacaktır. Bölüm 5.2’de verilen fiziksel katman özellikleri ağırlıklı olarak MATLAB kullanılarak, Bölüm 5.3’te verilen matematiksel programlama denklemleri ise GAMS kullanılarak modellenmiş ve GAMS altında CPLEX çözücü kullanılarak problem çözümleri elde edilmiştir.

Bu çalışmada başarılı tokalaşma olasılığının eniyi ağ yaşam süresini elde etmek için kullanılacak paket boyutu ile birebir ilintili olduğu bellidir. Eğer Denklem 5.8’de verilen başarılı tokalaşma olasılığı 1 ise o zaman paket boyutunun mümkün olan en büyük boyut seçilmesi ağ yaşam süresini enbüyükleyecektir. Çünkü bu durumda faydalı yük başlık oranı düşmektedir ve hata da olmadığına göre paketi büyütmenin bir dezavantajı olmayacaktır. Ancak bu durum gerçek hayatta hemen hemen hiç bir zaman mümkün değildir. Özellikle zorlu RF yayılım durumlarının söz konusu olduğu bir çok akıllı şebeke ortamı için bu olasılığın 1 olması değil bire yakın bir değer olması bile nadir bir durumdur.

Peki başarılı tokalaşma olasılığı birden küçük olduğu durumda paket boyutunun etkisi nasıl olmaktadır? Ayrıca bu durumda eniyi ağ yaşam süresi için gerekli paket boyutu nedir? Bu soruların cevabına yönelik durumlar oluşturularak cevapları aranmıştır. Bu amaca yönelik olarak başarılı tokalaşma olasılığının hangi aralıkta olduğu da düşünülerek cevaplar aranacaktır.

Bu soruların cevabını ararken hem kontrollü bir küme olması açısından düğümler arası uzaklığın, d_{int} , sabit olduğu bir kare topoloji ile hem de gerçekçi bir senaryoyu yansıtmaması açısından düğümlerin rastgele dağıtıldığı bir dairesel topoloji ile sonuçlar alınmıştır. Her iki topoloji için de baz istasyonu merkeze yerleştirilmiştir. Ayrıca düğüm sayısı N_N her iki topoloji için sabit ve 81 olarak alınmıştır. Her iki topolojide de farklı ağ yoğunluklarının etkisini görmek üzere ilk topolojide düğümler arası uzaklık, d_{int} , ikinci topolojide ise ağ yarıçapı, R_{net} , değiştirilerek sonuçlar alınmıştır.

Düğümlerin gönderme enerjileriyle ilgili olarak hem ağ geneli için enyüksek gönderme seviyesinin kullanıldığı durum hem de her bir düğüm çifti için gönderme seviyesinin Denklem 5.23 ile belirlendiği durum sonuçlarda verilmiştir. Yol kaybı değerleri ve



Şekil 5.2: Başarılı tokalaşma olasılığının ($E[p^{HS,s}]$) düğümler arası mesafeye göre değişimi (d_{int}). OUS ve UNT akıllı enerji ortamları için gönderme güç seviyesi, $l_{max} = 31$ alınmıştır ve 3 farklı M_P değeri için hesaplanmıştır.

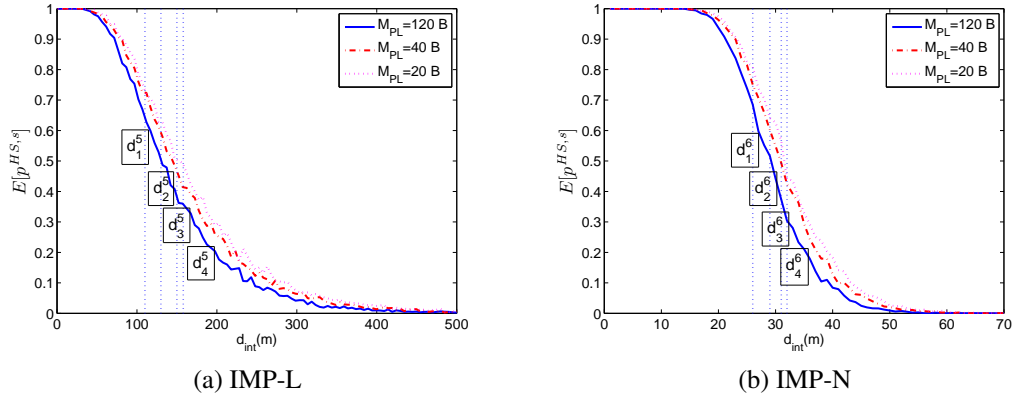
daireysel topolojide düğüm yerleşimleri değiştiği için sonuçlar 100 farklı deneme sonucunun ortalamasını gösterecek şekilde verilmiştir.

6 farklı yol kaybı senaryosu, 4 farklı ağ büyüklüğü, 6 farklı paket boyutu ve her bir durum için 100 deneme ortalaması alındığından bu bölümde yapılan analizler için toplam 14.400 farklı eniyileme problemi sonuçları sunulmuştur ve sunulmayan çok daha fazla problem ağların davranışını anlayabilmek için çözdürülmüştür.

Öncelikli olarak düğümler enyüksek gönderme güç seviyesinde gönderme yaparken başarılı tokalaşma olasılığının, $E[p^{HS,s}]$, düğümler arası mesafeye, d_{int} , göre nasıl değiştiği Şekil 5.2 ve 5.3'te gösterilmektedir. Bu grafikler 6 farklı akıllı şebeke ortamı için yol kaybı değerlerine ve $M_P = 120, 40, \text{ ve } 20$ Byte olacak şekilde 3 farklı paket boyutu için oluşturulmuştur. Bu grafiklerde işaretli mesafeler daha sonra ağ yaşam süresi değerlendirmeleri için önemlidir.

Çizelge 5.3 ve 5.4'te d_n^m ile gösterilen mesafeler için başarılı tokalaşma olasılığı aralığı, yaşam süresi açısından eniyi paket boyutu (kısaltma, EPB) ve bu paket boyutu ve düğümler arası d_n^m mesafesi için elde edilen enbüyük ağ yaşam süresi ay cinsinden verilmektedir.

Çizelgede farklı paket boyutları için tokalaşma olasılıkları verildiği için tokalaşma ola-



Şekil 5.3: Başarılı tokalaşma olasılığının ($E[p^{HS,s}]$) düğümler arası mesafeye göre değişimi (d_{int}). IMP akıllı enerji ortamı için gönderme güç seviyesi, $l_{max} = 31$ alınmıştır ve 3 farklı M_P değeri için hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3: Belirlenen mesafeler ($d_{int} = d_n^m$), için başarılı tokalaşma olasılığı aralıkları ($E[p^{HS,s}]$), byte cinsinden eniyi paket boyutu (EPB) ve ay cinsinden ağ yaşam süresi (OUS-L,N, UNT-L,N senaryoları).

| OUS-L | | | | | UNT-L | | | | |
|-----------|--------|---------------|------------|---------|-----------|--------|---------------|------------|---------|
| d_{int} | Değer | $E[p^{HS,s}]$ | EPB (Byte) | LT (Ay) | d_{int} | Değer | $E[p^{HS,s}]$ | EPB (Byte) | LT (Ay) |
| d_1^1 | 38 m | 0.7-0.8 | 120 | 20.5 | d_3^1 | 300 m | 0.85-0.9 | 120 | 57.0 |
| d_1^2 | 41 m | 0.6-0.75 | 60 | 15.5 | d_3^2 | 500 m | 0.45-0.6 | 60 | 14.8 |
| d_1^3 | 45 m | 0.5-0.6 | 40 | 9.5 | d_3^3 | 550 m | 0.4-0.55 | 40 | 10.3 |
| d_1^4 | 46 m | 0.45-0.6 | 30 | 8.0 | d_3^4 | 575 m | 0.35-0.5 | 30 | 8.5 |
| OUS-N | | | | | UNT-N | | | | |
| d_{int} | Değer | $E[p^{HS,s}]$ | EPB (Byte) | LT (Ay) | d_{int} | Değer | $E[p^{HS,s}]$ | EPB (Byte) | LT (Ay) |
| d_2^1 | 12 m | 0.7-0.8 | 120 | 17.6 | d_4^1 | 15 m | 0.65-0.8 | 120 | 17.6 |
| d_2^2 | 13 m | 0.6-0.75 | 60 | 11.4 | d_4^2 | 15.5 m | 0.65-0.75 | 60 | 15.0 |
| d_2^3 | 13.5 m | 0.5-0.6 | 40 | 9.6 | d_4^3 | 16.5 m | 0.55-0.7 | 40 | 10.5 |
| d_2^4 | 14 m | 0.45-0.6 | 30 | 6.3 | d_4^4 | 17 m | 0.5-0.65 | 30 | 7.6 |

Çizelge 5.4: Belirlenen mesafeler ($d_{int} = d_n^m$), için başarılı tokalaşma olasılığı aralıkları ($E[p^{HS,s}]$), byte cinsinden eniyi paket boyutu (EPB) ve ay cinsinden ağ yaşam süresi (IMP-L,N senaryoları).

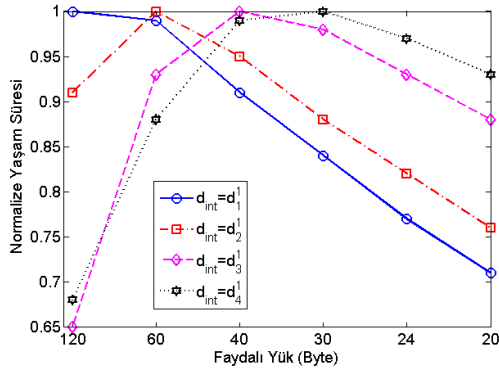
| IMP-L | | | | |
|--------------|-------|---------------|---------------|------------|
| d_{int} | Değer | $E[p^{HS,s}]$ | EPB (Byte) | LT (Ay) |
| d_5^1 | 110 m | 0.65-0.75 | 120 | 33.2 |
| d_5^2 | 130 m | 0.55-0.65 | 60 | 20.9 |
| d_5^3 | 150 m | 0.4-0.5 | 40 | 12.3 |
| d_5^4 | 158 m | 0.35-0.5 | 30 | 9.7 |
| IMP-N | | | | |
| d_{int} | Değer | $E[p^{HS,s}]$ | EPB (Byte) | LT (Ay) |
| d_6^1 | 26 m | 0.7-0.8 | 120 | 17.0 |
| d_6^2 | 29 m | 0.55-0.65 | 60 | 10.6 |
| d_6^3 | 31 m | 0.4-0.55 | 30 | 7.1 |
| d_6^4 | 32 m | 0.35-0.5 | 24 | 5.3 |

sılıkları tek bir nokta olarak değil de aralık olarak verilmiştir çünkü farklı paket boylarına göre olasılıklar değişmektedir. 6 farklı senaryo için işaretlenmiş olan mesafelerin 0.4- 0.8 başarılı tokalaşma olasılığı aralığında olduğu gözükmektedir.

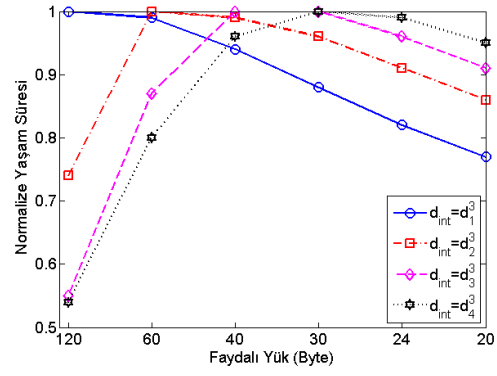
Çizelgede verilen EPB ve LT değerleri elde edilirken Şekil 5.1’te verilen model 81 düğümlü kare topoloji ve 6 farklı paket boyutu için çözdürülmüştür. Eniyi yaşam süresi, LT olarak ve bu yaşam süresini veren paket boyutu da EPB olarak not edilmiştir. Seçilen senaryolara baktığımızda yol kaybı parametreleri daha yüksek yol kaybını işaret ettiği durumlarda $E[p^{HS,s}]$ düşmektedir dolayısıyla ağ yaşam süresi azalmaktadır ve eniyi yaşam süresini gerçekleyen paket boyutu düşmeye başlamaktadır.

Şekil 5.4 ve 5.5’te paket boyutlarına göre normalize yaşam süreleri gösterilmektedir. Bu sonuçlar kare topoloji ve 6 farklı akıllı şebeke senaryosu ve enbüyük gönderme güç seviyesi için alınmıştır. Her bir şekilde ağ yaşam süreleri o senaryo için farklı paket boyutlarıyla elde edilmiş enbüyük yaşam süresine bölünerek normalize edilmiştir. Y eksenini normalize yaşam süresini, X eksenini ise faydalı yük boyutlarını (M_{PL} : 120, 60, 40, 30, 24 ve 20 Byte) göstermektedir.

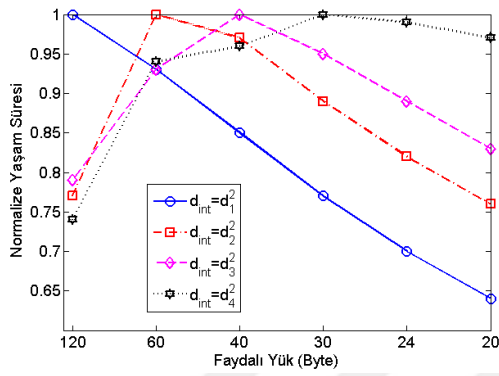
Ağ için d_{int} değeri artırılırken belirli bir noktaya kadar ağ yaşam süresinin eniyi değerinin enbüyük paket boyutu ($M_{PL} = 120$ Byte ve $M_P = 128$ Byte) ile elde edildiği görülmektedir. d_{int} artmaya devam ederken $E[p^{HS,s}]$ düşmeye ve eniyi yaşam süresi daha küçük paket boyutları ile elde edilmeye başlamaktadır. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta şudur ki, şekillerde verilen d_{int} değerleri ağ için 100 denemenin en az yarısı için ağ ile haberleşemeyen düğüm olmaması durumuna kadar arttırılmıştır. Daha büyük boylu ağlar aldığımızda 100 deneme içinden çok az sayıdaki rastgele topolojide ağ yaşam süresi elde edilebilmektedir ve bu istatistiksel olarak yanıltıcı sonuçlar



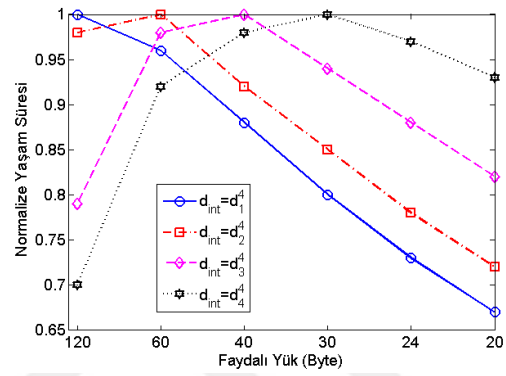
(a) OUS-L



(b) UNT-L

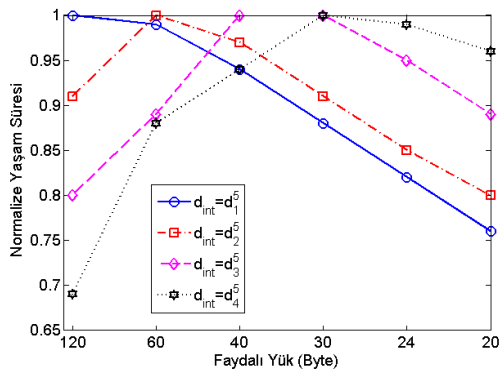


(c) OUS-N

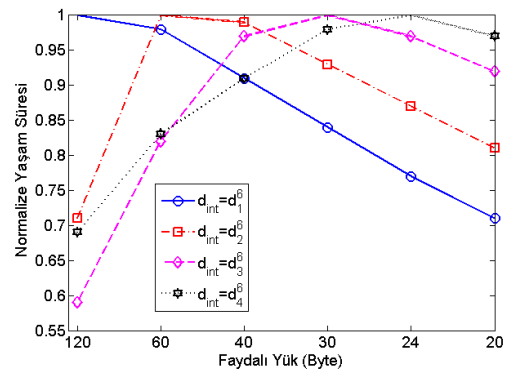


(d) UNT-N

Şekil 5.4: 6 farklı M_P değeri, enbüyük gönderme güç seviyesi ($l_{max} = 31$) ve farklı d_{int} mesafelerinde kare topoloji için normalize ağ yaşam süresi değerleri (OUS-L,N, UNT-L,N senaryoları).



(a) IMP-L



(b) IMP-N

Şekil 5.5: 6 farklı M_P değeri, enbüyük gönderme güç seviyesi ($l_{max} = 31$) ve farklı d_{int} mesafelerinde kare topoloji için normalize ağ yaşam süresi değerleri (IMP-L,N senaryoları).

doğurabilir.

Ayrıca RF yayılım özellikleri açısından LOS ve NLOS durumların farkının yaşam süresi ve paket boyutuna etkisini değerlendirebilmek için aynı ortamların LOS ve NLOS durumları aynı şekil içinde verilmiştir. Çizelge 5.2’de görülen farklı yol kaybı parametrelerinin sadece LOS ve NLOS değişimi için bile ağ karakteristiğini ciddi şekilde değiştirebildiği gözükmektedir.

Şekil 5.6 ve 5.7’de, Şekil 5.4 için yapılan analizin aynısı yapılmıştır. Buradaki tek fark ağ genelinde enbüyük gönderme güç seviyesinin kullanılması yerine her bir düğüm çifti için eniyi gönderme güç seviyesinin kullanılmasıdır. Bu güç kontrol mekanizması Denklem 5.23 ile elde edilen sonuçlara göre yapılmaktadır. Şekil karakteristikleri enbüyük gönderme güç seviyesinin kullanıldığı durum ile kıyaslandığında paket boyutu ve normalize yaşam süresi ilişkisi açısından ciddi bir fark olmadığı görülecektir.

Dikkat edilmesi gereken nokta şekillerde verilen yaşam süresi değerlerinin normalize değerler olduğudur. Burada sunulmakta olan değerler için gönderme güç seviyesi eniyilemesi ile normalize yaşa süresi değerlerinin paket boyutu ile değişiminde bir fark gözükmezken gerçek yaşam sürelerini kontrol ettiğimizde güç kontrolü ile %2.12 kadar iyileşme elde edildiği görülmektedir. Bu durum burada incelenen d_{int} değerleri içindir, daha yoğun ağlar incelendiğinde güç kontrolü ile elde edilen kazanımın çok daha fazla olduğu görülür ancak paket boyutunun yaşam süresine etkisi incelendiği için bu konunun ayrıntılarını ortaya koyacak sonuçlar verilmemiştir. Daha yoğun ağlar paket boyutu açısından enbüyük paket boyutu sonucunu vermeye devam edecektir.

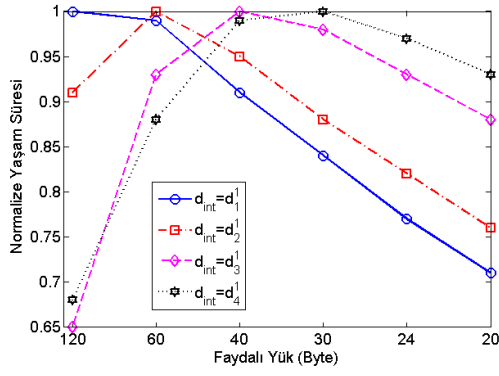
Şekil 5.8 ve 5.9’da dairesel rastgele topolojiler için normalize yaşam sürelerinin paket boyutuna göre değişimi gösterilmektedir. Bu durum için düğümler R_{net} yarıçaplı dairesel alana uniform rastgele olarak dağıtılmaktadır. Eniyileme problemi her bir düğüm çiftinin eniyi gönderme güç seviyesini kullandığı durum için çözdürülmüştür.

Farklı akıllı şebeke senaryoları için R_{net} değerleri değiştirilerek paket boyutunun ağ yoğunluğuna göre yaşam süresine etkisi incelenmiştir. Küçük ağ yarıçapları (dolayısıyla sabit düğüm sayısı için daha yoğun ağlar demek) için enbüyük paket boyutlarının eniyi yaşam süresini sağladığını görülmeye devam edilmektedir. Ağ yarıçapı arttıkça daha küçük paket boyutları yaşam sürelerini arttırmaya başlamaktadır. Ağ yaşam süresinin paket boyutuna göre değişim karakteristiğinin kare topolojilere göre farklı olduğu görülmektedir.

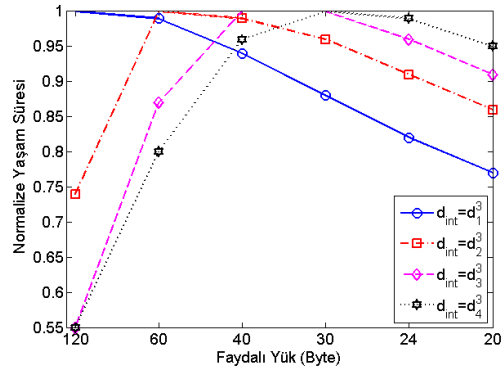
Şekil 5.10’da ağ içinde kullanılan linkler üzerinde gerçekleşen başarılı tokalaşma olasılığının, $P(p^{HS,s} = x)$, oluşma yüzdeleri gösterilmektedir. Bu yüzdeler Şekil 5.8 ve 5.9’da incelenen topoloji için elde edilmiş değerlerdir. X eksenini toplam başarılı tokalaşma olasılığı değerlerini Y eksenini ise faydalı yük boyutlarını göstermektedir. Z eksenini ise bir linkten akan veri paketi ile ilgili başarılı tokalaşma olasılığı çarpımları toplamının tüm ağda akan verilerin toplamına oranını göstermektedir ki bu değer,

$$\frac{\sum_{(i,j) \in A} P_{ij}^{HS,s}(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) \times f_{ij}}{\sum_{(i,j) \in A} f_{ij}} \quad (5.24)$$

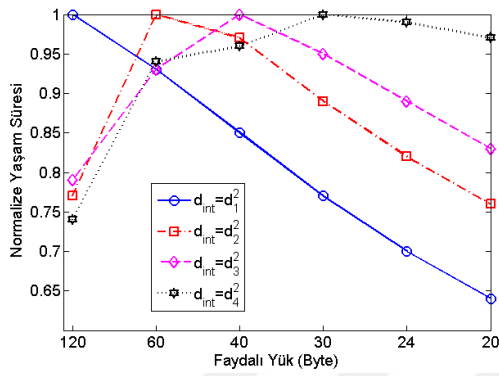
şeklinde gösterilebilir.



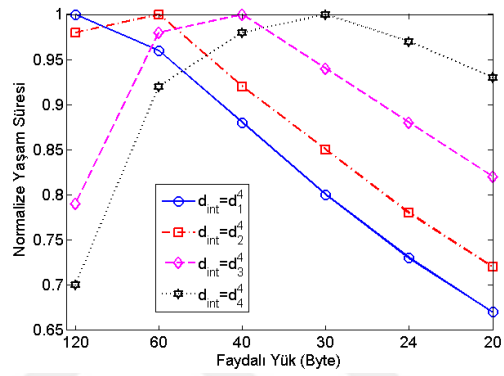
(a) OUS-L



(b) UNT-L

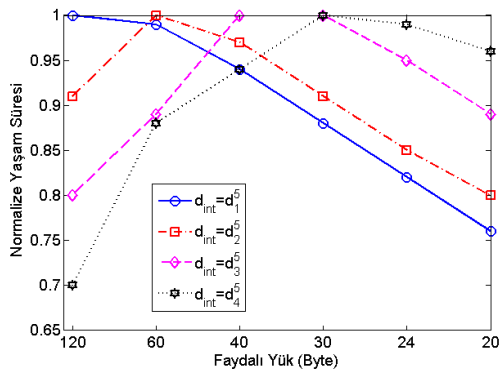


(c) OUS-N

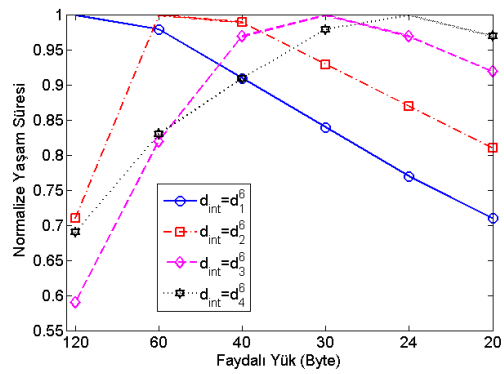


(d) UNT-N

Şekil 5.6: 6 farklı M_P değeri, her linkte eniyi gönderme güç seviyesi (l^{opt}) ve farklı d_{int} mesafelerinde kare topoloji için normalize ağ yaşam süresi değerleri (OUS-L,N, UNT-L,N senaryoları).

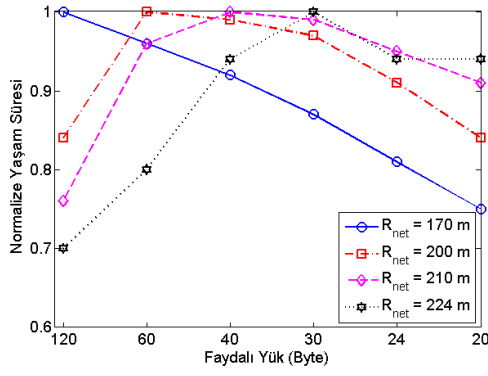


(a) IMP-L

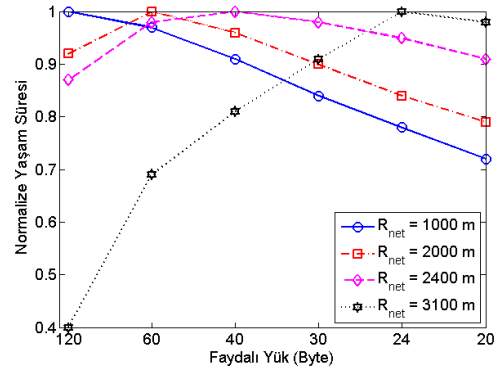


(b) IMP-N

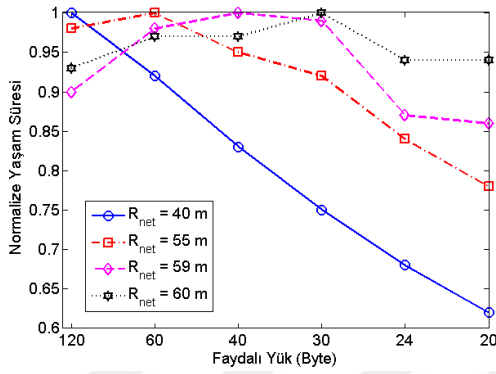
Şekil 5.7: 6 farklı M_P değeri, her linkte eniyi gönderme güç seviyesi (l^{opt}) ve farklı d_{int} mesafelerinde kare topoloji için normalize ağ yaşam süresi değerleri (IMP-L,N senaryoları).



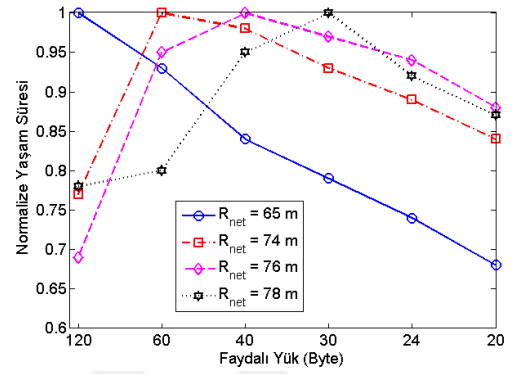
(a) OUS-L



(b) UNT-L

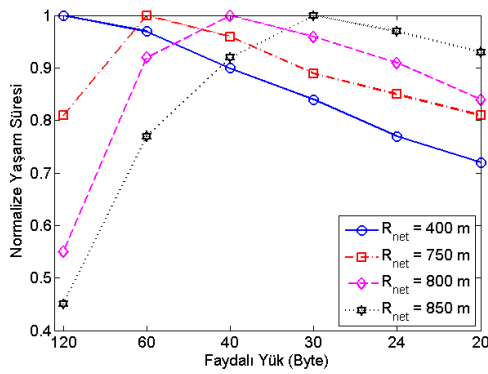


(c) OUS-N

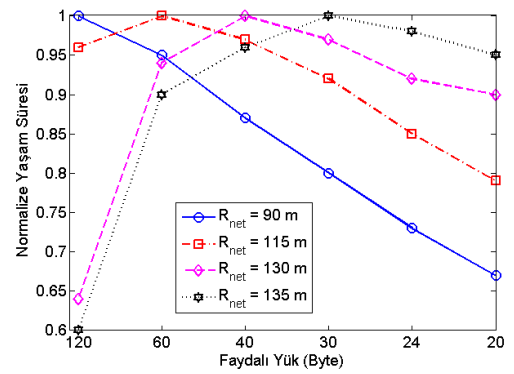


(d) UNT-N

Şekil 5.8: 6 farklı M_P değeri, her linkte eniyi gönderme güç seviyesi (I^{opt}) ve farklı R_{net} yarıçaplarında dairesel topoloji için normalize ağ yaşam süresi değerleri (OUS-L,N, UNT-L,N senaryoları).



(a) IMP-L



(b) IMP-N

Şekil 5.9: 6 farklı M_P değeri, her linkte eniyi gönderme güç seviyesi (I^{opt}) ve farklı R_{net} yarıçaplarında dairesel topoloji için normalize ağ yaşam süresi değerleri (IMP-L,N senaryoları).

Şekil 5.10 temelde ağ için başarılı tokalaşma yüzdesi olasılıkları için olasılık dağılım fonksiyonunu göstermek için oluşturulmuştur. Genel durum olarak yoğun veri akışının $p^{HS,s}$, 0.98-0.99 aralığında olan linklerde toplandığı görülmektedir. Örneğin Şekil 5.10a'da olduğu gibi veri akışının yarısı başarılı tokalaşma olasılığının 1 olduğu linklerde gerçekleşmiştir ($P(p^{HS,s} = 1) = 0.50$). Diğer alt şekiller de benzer şekilde yorumlanabilir.

Bununla birlikte bu grafiklerden gözükten diğer önemli bir bulgu da $p^{HS,s}$ değerinin 0.6-0.7 olduğu aralıkla ilgilidir. Tüm ortamlarda bu aralıkta veri belirli bir seviyede veri akışının gerçekleştiği görülmektedir. Bu linklerde tekrar gönderme ihtiyaçlarının olacağı aşikardır. Ancak eniyileme modeli bu linkleri daha yüksek $p^{HS,s}$ değerine sahip ancak çoklu atlamaların olacağı yollara alternatif olarak oluşturulan tek atlamalı linkler olduğu değerlendirilebilir. Bu linklerde tekrar göndermelere rağmen gerçekleşen enerji harcaması diğer alternatiflerin toplam enerji harcamasından daha düşük olduğu için tercih edilmiştir. Son bir gözlem de 0.98-0.99 $p^{HS,s}$ değerlerindeki linklerin kullanımının yoğun ağlar için azalmaya başladığıdır.

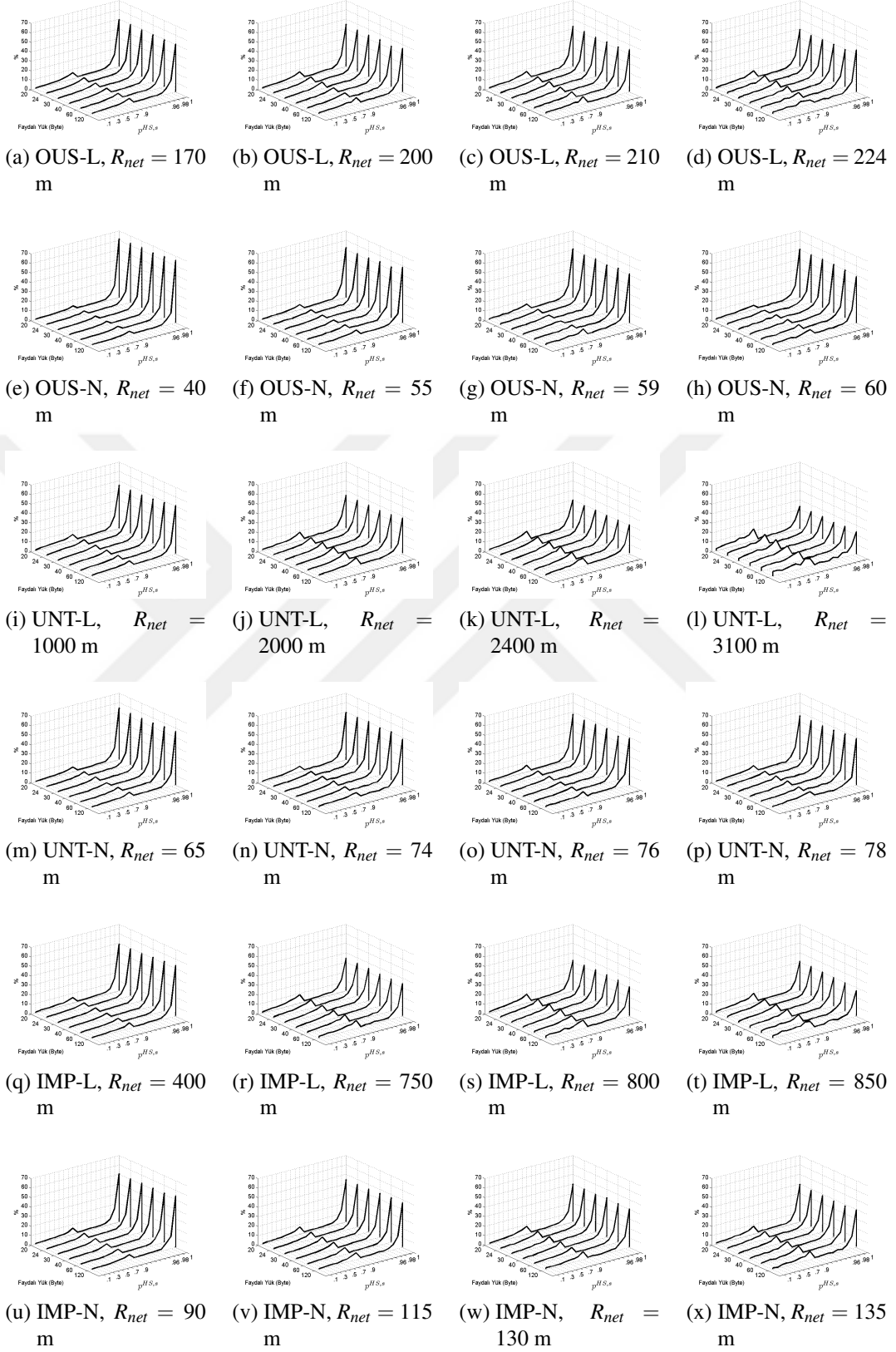
Şekil 5.12 pratik bir olgunun etkisini incelemek için sunulmuştur. Bu noktaya kadarki analizlerde algılayıcı düğümlerin hassasiyeti ile ilgili bir varsayımda bulunulmamıştır. Yani bir hassasiyet sınırının altında sinyalin alınmadığını varsayarak, o linkin kullanımını kısıtlanmamıştır. Eğer böyle bir yaklaşımla ilgili linkin kullanımı kısıtlanırsa ağ yaşam süresi bundan nasıl etkilenir? Bu soruya cevap bulmak için Denklem 5.6 ve 5.7'ye bir koşulun eklenmesi gerekir. Bu koşul ilgili link ancak veri ve onay paketleri için alınan sinyal seviyesi hassasiyet seviyesinden yüksek ise kullanılacaktır koşuludur ve $P_{rx,i,j}^{ant}(l) \geq P_{sns}$ ve $P_{rx,ji}^{ant}(k) \geq P_{sns}$ şeklinde ifade edilir. Bu gösterimde P_{sns} Tmote Sky düğümleri için tipik hassasiyet seviyesidir.

Bu şekiller için Şekil 5.8 ve 5.9'daki dairesel topolojilerin aynısı kullanılmıştır. Seçilen ağ yarı çapları da aynı şekillerdeki 2. yarıçap (OUS-L için 200m, UNT-L için 2000m vb.) değerleridir. Hassasiyet seviyesi sınırları için kullanılan değerler de -100, -97, -94, -90 dBm seviyeleridir. Bu değerlerin son ikisi sırasıyla Tmote Sky düğümlerinin tipik ve enbüyük hassasiyet seviyeleridir [8]. Şekillerde gözüktüğü üzere senaryoların birçoğunda hassasiyet seviyesi kullanılması enbüyük ağ yaşam süresi elde edilen paket boyutunun değişmesine sebep olmaktadır.

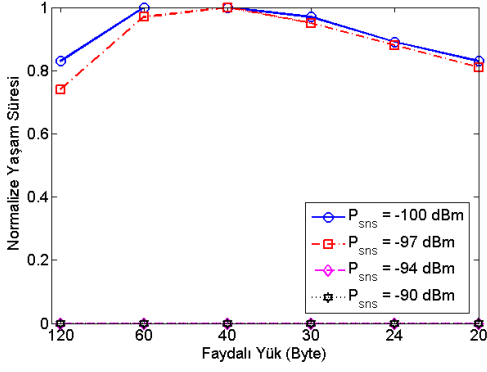
Şekil 5.11a ve 5.11c'de görüldüğü üzere yüksek hassasiyet seviyesi limitleri konulması (örneğin bu durumda -90 dBm) ağda kopuk düğümler oluşmasına ve yaşam süresi elde edilememesine sebep olmaktadır. Oysa aynı durumda hassasiyet seviyesi limiti konulmadığında aynı ağdaki düğümlerin birbiri ile haberleşebildiği bilinmektedir. Bilgimiz dahilinde literatürde KAA'larla ilgili böyle pratik bir olgunun yaşam süresine etkisini inceleyen çalışma bulunmamaktadır.

5.5 Sonuç

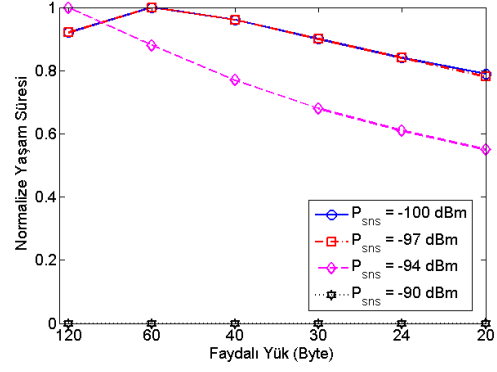
Bu bölümde sunulan çalışmada akıllı şebeke KAA uygulamalarına yönelik olarak 2.4 GHz çalışma frekansında Tmote Sky düğümleri için gerçekçi enerji tüketim modeli oluşturulmuş ve deneysel sonuçlara bağlı yol kaybı modelleme çalışmalarının sonuçları kullanılarak fiziksel katman modellemesi yapılmıştır. Bu modelleme karışık tamsa-



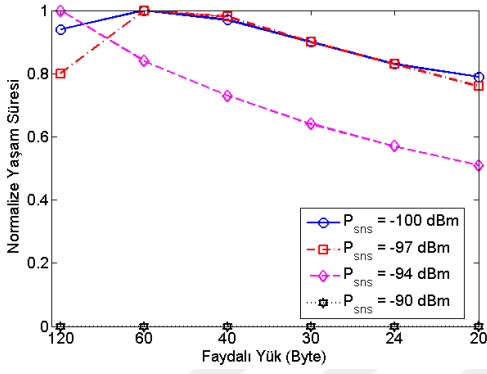
Şekil 5.10: 4 farklı ağ yarı çapı ve 6 farklı akıllı şebeke senaryoları için dairesel rastgele topolojilerde $P(p^{HS,s} = x)$ gerçekleşme yüzdeleri.



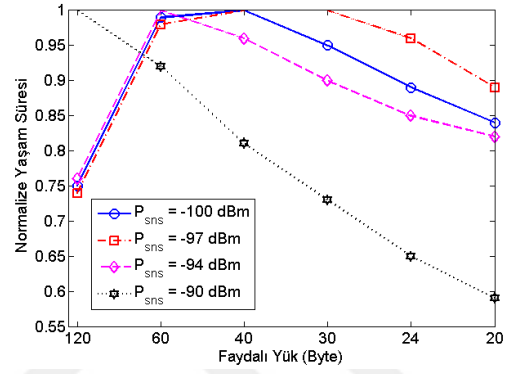
(a) OUS-L



(b) UNT-L

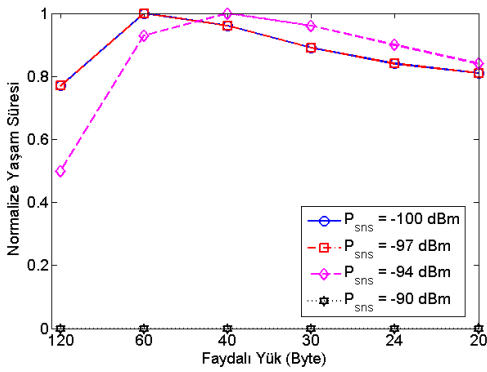


(c) OUS-N

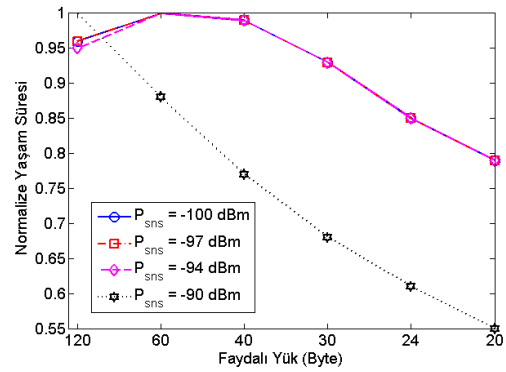


(d) UNT-N

Şekil 5.11: Normalize ağ yaşam süresi değerlerinin 4 farklı hassasiyet değerine (P_{sns}) göre değişimi (Dairesel topoloji için Şekil 5.8'deki ikinci R_{net} yarıçapları ve 6 farklı M_p değeri kullanılmıştır. OUS-L,N, UNT-L,N senaryoları).



(a) IMP-L



(b) IMP-N

Şekil 5.12: Normalize ağ yaşam süresi değerlerinin 4 farklı hassasiyet değerine (P_{sns}) göre değişimi (Dairesel topoloji için Şekil 5.9'deki ikinci R_{net} yarıçapları ve 6 farklı M_p değeri kullanılmıştır. IMP-L,N senaryoları).

yılı matematiksel programlama altyapısında kullanılmış ve bu programlama altyapısı ile ağ yaşam süresi eniyilemesi gerçekleştirilmiştir.

Bu modelleme üzerinde farklı paket boyutları değerlendirilerek veri paket boyutunun ağ yaşam süresine etkileri incelenmiştir. Bu incelemeler değişik topolojiler için tekrarlanmış, başarılı tokalaşma olasılığının etkisi incelemelere dahil edilmiştir. Bununla yetinilmeyip ağ genelinde kullanılan linklerin başarılı tokalaşma olasılığı dağılımları irdelenmiştir. Son olarak düğümlerin hassasiyet seviyesinin ve bu seviyeye göre linklerin kullanılmaması kararının ağ yaşam süresine etkisi de analiz edilmiştir. Bu çerçevede elde edilen temel çıkarımlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Akıllı şebeke ortamları düşünüldüğünde yüksek başarılı tokalaşma olasılığına, $p^{HS,s}$, sahip linklerde enbüyük paket boyutunun kullanılması yaşam süresi açısından eniyi sonucu vermektedir. Bununla birlikte zorlu yayılım koşulları olan ortamlarda (yüksek yol kaybı, düşük SNR ve yüksek BER) $p^{HS,s}$ düşmeye başlamakta ve eniyi yaşam süresini veren paket boyutu da düşmektedir.
2. Gönderme güç seviyesi kontrolü gerçek yaşam süresini artırmaktadır. Bununla birlikte normalize yaşam süresinin paket boyutuna bağlı değişimini etkilememektedir. Dolayısıyla gönderme güç kontrolü tek başına paket boyutu eniyilemesini etkilememektedir.
3. Yoğun KAA'larda veri akışının çok büyük kısmı başarılı tokalaşma olasılığının yüksek olduğu linklerde yoğunlaşmaktadır. Dolayısıyla bu linklerde büyük paket boyutları tercih edilmektedir. Daha seyrek olan ağlarda ise başarılı tokalaşma olasılığının yüksek olduğu linkler azalmakta ve daha küçük paket boyutları enerji tüketimi açısından tercih edilmektedir.
4. Hassasiyet seviyesi limitine bakarak bu limitin altında sinyal seviyesi olan linklerin kullanımının yasaklanması ağ için eniyi olan paket boyutu kararını etkilemektedir.

Bu bulgulara bakarak akıllı şebeke KAA uygulamaları için ağ yaşam süresini eniyileyecek yaklaşımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Eğer ağ kurulumu kontrollü yapılacaksa düğümler yüksek yol kaybına sebep olmayacak uzaklıklarda yerleştirilmeli ve böylece başarılı tokalaşma olasılıkları yükseltilmelidir.
- Böyle linklerde mümkün olan en büyük paket boyutu kullanımı, enerji tüketimi açısından tercih edilir.
- Son olarak da link bazlı eniyi gönderme güç seviyesi kullanılarak ağ yaşam süresi belli oranda daha artırılabilir.

6. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada genel RF yayılım mekanizmaları, KAA'lar için yol kaybı modelleri, bu modellerin karşılaştırması, ilgili modellerin ağ yaşam süresine etkisi, gönderme güç seviyesi kontrolü ve veri paketi boyutunun ağ yaşam süresine etkisi gibi bir çok konu incelenmiş ve bu konularla ilgili çok yönlü sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları şu şekilde sıralanabilir:

1. Belirli bir yol kaybı modelini kullanmaya başlamadan önce ilgilenilen KAA için uygunluğu kontrol edilmelidir. Ayrıca modelde yapılan varsayımların ilgili senaryo için geçerliliğine dikkat edilmelidir.
2. Belirli bir model KAA uygulaması için kullanılırken önemli parametrelerin (çalışma frekansı, anten yüksekliği, anten polarizasyonu ve yer yansıma katsayısı vb.) modele dahil edildiğinden emin olunmalıdır.
3. Saha ölçümleri sırasında gözlemlenen bir çok durum uygun teorik model ile açıklanabilir.
4. Eğer yeterli veri varsa ölçüm sonuçları ile elde edilen modelleri kullanmak doğru yaklaşımdır. Bu modeller içinde iki eğimli logaritmik gölgeleme modeli tek eğimli modele göre ölçüm sonuçlarını daha küçük hata ile yansıtılmaktadır.
5. Ancak deneysel bir modelin uyumsuz bir senaryo için çıkarılmış parametrelerle kullanılması analitik bir modelin sebep olabileceği hatadan daha fazlasına sebep olabilir.
6. Eğer ilgili senaryo için çıkarılmış deneysel parametreler bulunamıyorsa ve antenler yer seviyesinin hemen üzerinde değilse polarizasyona dikkat edilerek kullanılacak iki ışın yansıma modeli iyi bir yol kaybı modeli olarak öne çıkmaktadır.
7. Yol kaybı modellerinin ağ yaşam süresine etkisi incelenirken görülmektedir ki ağ yarıçapı, R_{net} değeri arttıkça modellerle elde edilen yaşam süreleri deneysel modellerde ciddi şekilde azalmaya başlarken analitik modellerde o kadar hızlı bir şekilde azalmamaktadır.
8. Ağ yaşam süreleri arasındaki farklar düğüm sayısının değişmesinden çok fazla etkilenmemektedir. Asıl etkenler kullanılan yol kaybı modeli ve ağ yarıçapı olarak gözükmektedir.

9. Ağ yarıçapı arttıkça deneysel modellerle elde edilen yaşam süresi değerleri ile analitik modellerle elde edilen değerler arasındaki farklar ciddi miktarda artmaktadır.
10. Analitik modeller içerisinde yol kaybı tahminleri açısından göreceli olarak deneysel modellere yakın sonuç veren doğru polarizasyonlu iki ışın yansıma modeli bile antenler yere yakın iken ağ yaşam süresi açısından ciddi hatalara sebep olmaktadır.
11. Ağ yaşam süresinin veri paketi boyutuna bağlı değişiminin incelenmesi kapsamında, yüksek başarılı tokalaşma olasılığına sahip linklerde enbüyük paket boyutunun kullanılması yaşam süresi açısından eniyi sonucu vermektedir. Bununla birlikte zorlu yayılım koşulları olan ortamlarda eniyi yaşam süresini veren paket boyutu da düşmektedir.
12. Gönderme güç seviyesi kontrolü gerçek yaşam süresini artırmaktadır. Bununla birlikte normalize yaşam süresinin paket boyutuna bağlı değişimini etkilememektedir. Dolayısıyla gönderme güç kontrolü tek başına paket boyutu eniyilemesini etkilememektedir.
13. KAA'larda kullanılan düğümlerin hassasiyet seviyesi limitine bakarak bu limitin altında sinyal seviyesi olan linklerin kullanımının yasaklanması ağ yaşam süresini ve ağ için eniyi olan paket boyutu kararını etkilemektedir.

Bu gözlemlerle birlikte KAA'lar için yol kaybı modellemesinde açık görülen ve ileriye dönük çalışma alanları olarak değerlendirilebilecek hususlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Literatürde 868 MHz farklı anten yükseklikleri ile yapılmış, en azından genel ulaşım için açık olarak raporlanmış, bir çalışma bulunmamaktadır. Böyle bir ölçüm çalışması çok faydalı olacaktır.
2. Benzer şekilde 2.4 GHz çalışma frekansında göndermeç ve antenler yerde iken gerçekleştirilecek saha ölçümleri, 868 MHz'de yapılmış olan çalışmayla [1] kıyaslamak için çok faydalı olacaktır.
3. Anten polarizasyonunun KAA kullanımlarındaki etkisine yönelik saha ölçümleri açık bir alan olarak görülmektedir.
4. Mobil baz istasyonu ve/veya algılayıcı düğümler için yere çok yakın anten yüksekliklerinde yol kaybı modellemesine yönelik çalışmalar da faydalı olabilecek bir alandır.
5. Uzun bir süredir çalışılan KAA alanında uygulamaya yönelik senaryo ve ortamlar için uluslararası bir otorite tarafından yönlendirilen ve öneri setine dönüştürülen yol kaybı modelleme çalışmaları çok faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Martinez-Sala, A., Molina-Garcia-Pardo, J., Egea-Lopez, E., Vales-Alonso, J., Juan-Llacer, L., and Garcia-Haro, J.** An accurate radio channel model for wireless sensor networks simulation. *Journal of Communications and Networks*, 7(6):401–407, 2005.
- [2] **Wang, D., Song, L., Kong, X., and Zhang, Z.** Near-ground path loss measurements and modeling for wireless sensor networks at 2.4 GHz. *Int. Journal of Distributed Sensor Networks*, pages 969712:1–969712:10, 2012.
- [3] **Rodriguez, M., Feick, R., Carrasco, H., Valenzuela, R., Derpich, M., and Ahumada, L.** Wireless access channels with near-ground level antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11:2204–2211, 2012.
- [4] **Gungor, V. C., Bin, L., and Hancke, G. P.** Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 57(10):3557–3564, 2010.
- [5] **Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E.** A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114, 2002.
- [6] **Correll, J. T.** Igloo white. *Airforce Magazine*, 87:56–61, 2004.
- [7] **MICA2 - Wireless Measurement System.** Erişim Adresi: <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Temmuz 2016.
- [8] **Tmote SKY Datasheet.** Erişim Adresi: <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Temmuz 2016.
- [9] **Zhang, Z. and Hu, X.** Zigbee based wireless sensor networks and their use in medical and health care domain. In *Proc. Int. Conf. Sensing Technology (ICST)*, pages 756–761, 2013.
- [10] **Zhang, R., Yuan, D., and Wang, Y.** A health monitoring system for wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pages 1648–1652, 2007.
- [11] **Gao, T., Greenspan, D., Welsh, M., Juang, R., and Alm, A.** Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network. In *Proc. Int. Conf.*

Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS), pages 102–105, 2005.

- [12] **Kashyap, N., Yang, C. W., Sierla, S., and Flikkema, P. G.** Automated fault location and isolation in distribution grids with distributed control and unreliable communication. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4):2612–2619, 2015.
- [13] **Strasser, T., Andren, F., Kathan, J., Cecati, C., Buccella, C., Siano, P., Leitao, P., Zhabelova, G., Vyatkin, V., Vrba, P., and Marik, V.** A review of architectures and concepts for intelligence in future electric energy systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4):2424–2438, 2015.
- [14] **Varela, J., Puglisi, L. J., Wiedemann, T., Ysberg, U., Stein, D., Pokorna, Z., Arnoult, C., Garaud-Verdier, R., and Consiglio, L.** Show me!: Large-scale smart grid demonstrations for european distribution networks. *IEEE Power and Energy Magazine*, 13(1):84–91, 2015.
- [15] **Lee, J., Guo, J., Choi, J. K., and Zukerman, M.** Distributed energy trading in microgrids: A game-theoretic model and its equilibrium analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6):3524–3533, 2015.
- [16] **Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D.** Analysis of a prediction-based mobility adaptive tracking algorithm. In *Proc. Int. Conf. Broadband Networks (BroadNets)*, volume 1, pages 753–760, 2005.
- [17] **Durisic, M. P., Tafa, Z., Dimic, G., and Milutinovic, V.** A survey of military applications of wireless sensor networks. In *Proc. Mediterranean Conf. Embedded Computing (MECO)*, pages 196–199, 2012.
- [18] **Sakthipriya, N.** An effective method for crop monitoring using wireless sensor network. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 20(9):1127–1132, 2014.
- [19] **Zhu, Y., Song, J., and Dong, F.** Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring. *Procedia Engineering (Elsevier)*, 16:608–614, 2011.
- [20] **Dwivedi, A. K., Tiwari, M. K., and Vyas, O. P.** Operating systems for tiny networked sensors: a survey. *Int. Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(2):152–157, 2009.
- [21] **Egea-Lopez, E., Vales-Alonso, J., Martinez-Sala, A. S., Pavon-Mariño, P., and Garcia-Haro, J.** Simulation tools for wireless sensor networks. In *Proc. Summer Simulation Multiconference (SPECTS)*, pages 2–9, 2005.
- [22] **Korkalainen, M., Sallinen, M., Karkkainen, N., and Tukeva, P.** Survey of wireless sensor networks simulation tools for demanding applications. In *Proc. International Conference on Networking and Services (ICNS)*, pages 102–106, 2009.

- [23] **Yildiz, H., Kurt, S., and Tavli, B.** The impact of near-ground path loss modeling on wireless sensor network lifetime. In *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 1114–1119, 2014.
- [24] **Malajner, M., Benkic, K., Planinsic, P., and Cucej, Z.** The accuracy of propagation models for distance measurement between WSN nodes. In *Proc. Int. Conf. on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, pages 1–4, 2009.
- [25] **Akkaya, K. and Younis, M.** A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, 3(3):325–349, 2005.
- [26] **Zhou, G., He, T., Krishnamurthy, S., and Stankovic, J. A.** Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, pages 125–138, 2004.
- [27] **Cotuk, H., Bicakci, K., Tavli, B., and Uzun, E.** The impact of transmission power control strategies on lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Trans. Computers*, 63(11):2866–2879, 2014.
- [28] **Yildiz, H. U., Tavli, B., and Yanikomeroglu, H.** Transmission power control for link level handshaking in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 16:561–576, 2016.
- [29] **Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., and Fukua, K.** Field strength and its variability in UHF and VHF land mobile radio service. *Review Electrical Communication Laboratory*, 16:825–873, 1968.
- [30] **Hata, M.** Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 29:317–325, 1980.
- [31] Digital mobile radio towards future generation systems – final report. Technical Report COST 231, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1999.
- [32] **Erceg, V., Greenstein, L., Tjandra, S., Parkoff, S., Gupta, A., Kulic, B., Julius, A., and Bianchi, R.** An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17:1205–1211, 1999.
- [33] **Erceg, V., Hari, K. V. S., Smith, M. S., Baum, D. S., Sheikh, K. P., Tappenden, C., Costa, J. M., Bushue, C., Sarajedini, A., Schwartz, R., Brantlund, D., T, K., and Trinkwon, D.** Channel models for fixed wireless applications. Technical Report IEEE 802.16.3c-01/29r4, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.
- [34] Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-advanced. Technical Report ITU-R: TR M.21351, International Telecommunication Union (ITU), 2009.
- [35] **Abhayawardhana, V., Wassell, I., Crosby, D., Sellars, M., and Brown, M.** Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless

- access systems. In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC)*, volume 1, pages 73–77, 2005.
- [36] **Molisch, A.** *Wireless Communications*. Wiley-IEEE Press, 2005.
- [37] Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Technical Report ITU-R P.1411-8, International Telecommunication Union (ITU), 2015.
- [38] **Kotz, D., Newport, C., Gray, R. S., Liu, J., Yuan, Y., and Elliott, C.** Experimental evaluation of wireless simulation assumptions. In *Proc. ACM international symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pages 78–83, 2004.
- [39] **Rappaport, T.** *Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.
- [40] **Sarkar, T. K., Ji, Z., Kim, K., Medouri, A., and Salazar-Palma, M.** A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45:51–82, 2003.
- [41] **Iskander, M. and Yun, Z.** Propagation prediction models for wireless communication systems. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 50:662–672, 2002.
- [42] **Jacoub, J. K., Liscano, R., and Bradbury, J. S.** A survey of modeling techniques for wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, pages 103–109, 2011.
- [43] **Garcia-Hernandez, C. F., Ibarquengoytia-Gonzalez, P. H., Garcia-Hernandez, J., and Perez-Diaz, J. A.** Wireless sensor networks and applications: A survey. *Int. Journal of Computer Science and Network Security*, 7:264–273, 2007.
- [44] **Korkalainen, M. and Sallinen, M.** A survey of RF-propagation simulation tools for wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, pages 342–347, 2010.
- [45] **Jevtic, M., Zogovic, N., and Dimic, G.** Evaluation of wireless sensor network simulators. In *Proc. Telecommunications forum (TELFOR)*, pages 1303–1306, 2009.
- [46] **Dwivedi, A. K. and Vyas, O. P.** An exploratory study of experimental tools for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Network*, 3:215–240, 2011.
- [47] **Mendes, L. D. and Rodrigues, J. J.** A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34:523–534, 2011.
- [48] **De, S., Qiao, C., Pados, D., Chatterjee, M., and Philip, S. J.** An integrated cross-layer study of wireless CDMA sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22:1271–1285, 2004.

- [49] **Madan, R., Cui, S., Lall, S., and Goldsmith, A.** Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 5:3142–3152, 2006.
- [50] **Cui, S., Madan, R., Goldsmith, A., and Lall, S.** Cross-layer energy and delay optimization in small-scale sensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 6:3688–3699, 2007.
- [51] **Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E.** A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40:102–114, 2002.
- [52] **Baccour, N., Koubâa, A., Mottola, L., niga, M. A. Z., Youssef, H., Boano, C. A., and Alves, M.** Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Trans. Sensor Networks*, 8:34:1–34:33, 2012.
- [53] **Akyildiz, I. F., Suna, Z., and Vuran, M. C.** Signal propagation techniques for wireless underground communication networks. *Physical Communication*, 2:167–183, 2009.
- [54] **Barsocchi, P.** Channel models for terrestrial wireless communications: a survey. Technical Report 2006-TR-16, National research Council, Information Science and Technologies Institute, Pisa, Italy, 2006.
- [55] **Dagefu, F., Liao, D., and Sarabandi, K.** An efficient model for near-ground wave propagation in the presence of building walls/indoor obstacles. In *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pages 1–4, 2009.
- [56] **Dagefu, F. and Sarabandi, K.** Simulation and measurement of near-ground wave propagation for indoor scenarios. In *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pages 1–4, 2010.
- [57] **Dagefu, F. and Sarabandi, K.** Analysis and modeling of near-ground wave propagation in the presence of building walls. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59:2368–2378, 2011.
- [58] **Sheikhsofla, M. and Sarabandi, K.** Indoor wave propagation modeling at low-VHF band. In *Proc. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, pages 778–781, 2014.
- [59] **Boithais, L.** *Radio Wave Propagation*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [60] **Haslett, C.** *Essentials of Radio Wave Propagation*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2008.
- [61] **Goldsmith, A.** *Wireless Communications*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2005.
- [62] **Balanis, C. A.** *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley-Interscience, 2005.
- [63] **Friis, H. T.** A note on a simple transmission formula. *Proc. IRE*, 34:254–256, 1946.

- [64] **Born, M. and Wolf, E.** *Principles of Optics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [65] **Raman, C. V. and Krishnan, K. S.** On the diffraction of light by spherical obstacles. *Proceedings of the Physical Society of London*, 38:350, 1925.
- [66] **Keller, J. B.** Geometrical theory of diffraction. *Journal of the Optical Society of America*, 52:116–130, 1962.
- [67] **Liao, D. and Sarabandi, K.** An approximate numerical model for simulation of long-distance near-ground radiowave propagation over random terrain profiles. In *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 1–7, 2007.
- [68] **Yadav, T. and Bhattacharya, P. P.** Signal strength and system operating margin estimation for vehicular ad-hoc networks in rayleigh fading environment. *Int. Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2:41–45, 2013.
- [69] **Palaios, A., Labou, Y., and Mahonen, P.** A study on the forest radio propagation characteristics in european mixed forest environment. In *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 376–381, 2014.
- [70] **Salo, J., Vuokko, L., and Vainikainen, P.** Why is shadow fading lognormal? In *Proc. Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pages 522–526, 2005.
- [71] **M. Failli, E.** Digital land mobile radio communications – final report. Technical Report COST 207, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1989.
- [72] **Janek, J. F. and Evans, J. J.** Predicting ground effects of omnidirectional antennas in wireless sensor networks. *Wireless Sensor Network*, 2:879–890, 2010.
- [73] **Tavli, B., Bicakci, K., Zilan, R., and Barceló-Ordinas, J. M.** A survey of visual sensor network platforms. *Multimedia Tools and Applications*, 60:689–726, 2012.
- [74] **Anastasi, G., Falchi, A., Passarella, A., Conti, M., and Gregori, E.** Performance measurements of motes sensor networks. In *Proc. ACM international symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pages 174–181, 2004.
- [75] **Dunlop, J., Girma, D., and Irvine, J.** *Digital Mobile Communications and the Tetra System*. Wiley, 2013.
- [76] **Stoyanova, T., Kerasiotis, F., Prayati, A., and Papadopoulos, G.** Evaluation of impact factors on RSS accuracy for localization and tracking applications. In *Proc. ACM Int. Workshop on Mobility Management and Wireless Access (MobiWac)*, pages 9–16, 2007.

- [77] **Wang, A., Heinzelman, W. B., Sinha, A., and Chandrakasan, A. P.** Energy-scalable protocols for battery-operated microsensor networks. *Journal of VLSI Signal Processing Systems*, 29:223–237, 2001.
- [78] **Al-Karaki, J. N., Ul-Mustafa, R., and Kamal, A. E.** Data aggregation and routing in wireless sensor networks: Optimal and heuristic algorithms. *Computer Networks*, 53:945–960, 2009.
- [79] **Cheng, Z., Perillo, M., and Heinzelman, W.** General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 7(4):484–497, 2008.
- [80] **Yun, Y. and Xia, Y.** Maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sink in delay-tolerant applications. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 9:1308–1318, 2010.
- [81] **Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H.** An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 1:660–670, 2002.
- [82] **Lee, E. F., Wang, C., and Xiao, L.** A study of radio signal behaviors in complex environments. Technical Report MSU-CSE-06-6, Department of Computer Science, Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA, 2006.
- [83] **Zuniga, M. and Krishnamachari, B.** Analyzing the transitional region in low power wireless links. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, pages 517–526, 2004.
- [84] **Suh, C., Joung, J. E., and Ko, Y. B.** New RF models of the TinyOS simulator for IEEE 802.15.4 standard. In *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*, pages 2236–2240, 2007.
- [85] **Giacomin, J. C., Correia, L. H. A., Heimfarth, T., Pereira, G. M., Silva, V. F., and Santana, J. L. P. D.** Radio channel model of wireless sensor networks operating in 2.4 GHz ISM band. *INFOCOMP Journal of Computer Science*, 9:98–106, 2010.
- [86] **Wang, N., Zhang, N., and Wang, M.** Wireless sensors in agriculture and food industry—recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50:1–14, 2006.
- [87] **Stoyanova, T., Kerasiotis, F., Prayati, A., and Papadopoulos, G.** A practical RF propagation model for wireless network sensors. In *Proc. Int. Conf. on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, pages 194–199, 2009.
- [88] **Cerpa, A., Wong, J., Kuang, L., Potkonjak, M., and Estrin, D.** Statistical model of lossy links in wireless sensor networks. In *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 81–88, 2005.

- [89] **Polastre, J., Szewczyk, R., and Culler, D.** Telos: Enabling ultra-low power wireless research. In *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 364–369, 2005.
- [90] **Bilinska, K., Filo, M., and Krystowski, R.** Mica, Mica2, MicaZ, 2007.
- [91] **Maurya, M. and Shukla, S. R. N.** Current wireless sensor nodes (motes): Performance metrics and constraints. *Int. Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering*, 2:45–48, 2012.
- [92] **Seema, A. and Reisslein, M.** Towards efficient wireless video sensor networks: A survey of existing node architectures and proposal for a Flexi-WVSNP design. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 13:462–486, 2011.
- [93] **Cavalcanti, D., Das, S., Wang, J., and Challapali, K.** Cognitive radio based wireless sensor networks. In *Proc. International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pages 1–6, 2008.
- [94] **Rahimi, M., Baer, R., Iroezi, O. I., Garcia, J. C., Warrior, J., Estrin, D., and Srivastava, M.** Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 192–204, 2005.
- [95] **Sohrabi, K., Manriquez, B., and Potties, G.** Near ground wideband channel measurements in 800-1000 mhz. In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, pages 571–574, 1999.
- [96] **Cotuk, H., Tavli, B., Bicakci, K., and Akgun, M. B.** The impact of bandwidth constraints on the energy consumption of wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, pages 2787–2792, 2014.
- [97] **Gogu, A., Nace, D., Dilo, A., and Meratnia, N.** Review of optimization problems in wireless sensor networks. In Hamilton Ortiz, J., editor, *Telecommunications Networks - Current Status and Future Trends*, pages 153–180. InTech, 2012.
- [98] **Vales-Alonso, J., Egea-Lopez, E., Martinez-Sala, A., Pavon-Marino, P., Bueno-Delgado, M. V., and Garcia-Haro, J.** Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks. *Computer Networks (Elsevier)*, 51:1483–1498, 2007.
- [99] **Zuniga, M. and Krishnamachari, B.** Analyzing the transitional region in low power wireless links. In *Proc. IEEE Communications Society Conf. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pages 517–526, 2004.
- [100] **Macnamara, T.** *Introduction to Antenna Placement and Installation*. Aerospace Series. Wiley, 2010.
- [101] **Kilic, N. and Gungor, V. C.** Analysis of low power wireless links in smart grid environments. *Computer Networks (Elsevier)*, 57:1192–1203, 2013.

- [102] **Strasser, T., Siano, P., and Vyatkin, V.** New trends in intelligent energy systems: An industrial electronics point of view. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4):2420–2423, 2015.
- [103] **Gregoratti, D. and Matamoros, J.** Distributed energy trading: The multiple-microgrid case. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4):2551–2559, 2015.
- [104] **Fadel, E., Gungor, V., Nassef, L., Akkari, N., Malik, M. A., Almasri, S., and Akyildiz, I. F.** A survey on wireless sensor networks for smart grid. *Computer Communications*, 71:22–33, 2015.
- [105] **Yigit, M., Yoney, E., and Gungor, V.** Performance of MAC protocols for wireless sensor networks in harsh smart grid environment. In *Proceedings of the IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pages 50–53, 2013.
- [106] **Yildiz, H., Tavli, B., and Yanikomeroglu, H.** Transmission power control for link-level handshaking in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 16(2):561–576, 2016.
- [107] **Bilgin, B. and Gungor, V.** On the performance of multi-channel wireless sensor networks in smart grid environments. In *Proc. Int. Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pages 1–6, 2011.
- [108] **Karthi, J., Rao, S. V., and Pillai, S. S.** Impact of IEEE 802.11 MAC packet size on performance of wireless sensor networks. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, 10:6–11, 2015.
- [109] **Akbas, A., Yildiz, H. U., and Tavli, B.** Data packet length optimization for wireless sensor network lifetime maximization. In *Proceedings of the International Conference on Communications (COMM)*, pages 1–6, 2014.
- [110] **Li, Y., Qi, X., Keally, M., Ren, Z., Zhou, G., Xiao, D., and Deng, S.** Communication Energy Modeling and Optimization through Joint Packet Size Analysis of BSN and WiFi Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 24:1741–1751, 2013.
- [111] **Noda, C., Prabh, S., Alves, M., and Voigt, T.** On packet size and error correction optimisations in low-power wireless networks. In *Proceedings of the IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pages 212–220, 2013.
- [112] **Leghari, M., Abbasi, S., and Dhomeja, L. D.** Survey On Packet Size Optimization Techniques In Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Sensor Networks (WSN4DC)*, 2013.
- [113] **Oto, M. C. and Akan, O. B.** Energy-efficient packet size optimization for cognitive radio sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(4):1544–1553, 2012.

- [114] **Holland, M., Wang, T., Tavli, B., Seyedi, A., and Heinzelman, W.** Optimizing physical-layer parameters for wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 7:28:1–28:20, 2011.
- [115] **Dong, W., Liu, X., Chen, C., He, Y., Chen, G., Liu, Y., and Bu, J.** DPLC: Dynamic Packet Length Control In Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 1–9, 2010.
- [116] **Sankarasubramaniam, Y., Akyildiz, I., and McLaughlin, S. W.** Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA)*, pages 1–8, 2003.
- [117] **Ayaz, M., Jung, L. T., Abdullah, A., and Ahmad, I.** Reliable data deliveries using packet optimization in multi-hop underwater sensor networks. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 24(1):41–48, 2012.
- [118] **Basagni, S., Petrioli, C., Petrocchia, R., and Stojanovic, M.** Optimized packet size selection in underwater wireless sensor network communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(3):321–337, 2012.
- [119] **Jung, L. T. and Abdullah, A. B.** Underwater wireless network energy efficiency and optimal data packet size. In *Proceedings of the International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE)*, pages 178–182, 2011.
- [120] **Stojanovic, M.** Optimization of a data link protocol for an underwater acoustic channel. In *Proceeding of the IEEE OCEANS*, volume 1, pages 68–73, 2005.
- [121] **Vuran, M. and Akyildiz, I. F.** Cross-Layer Packet Size Optimization For Wireless Terrestrial, Underwater, And Underground Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 780–788, 2008.
- [122] **Mohammadi, M. S., Zhang, Q., Dutkiewicz, E., and Huang, X.** Optimal frame length to maximize energy efficiency in ieee 802.15. 6 uwb body area networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(4):397–400, 2014.
- [123] **Domingo, M. C.** Packet size optimization for improving the energy efficiency in body sensor networks. *ETRI Journal*, 33:299–309, 2011.
- [124] **Yaakob, N. and Khalil, I.** Packet size optimization for congestion control in pervasive healthcare monitoring. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine (ITAB)*, pages 1–4, 2010.
- [125] **Anastasi, G., Conti, M., Falchi, A., Gregori, E., and Passarella, A.** Performance measurements of motes sensor networks. In *Proc. ACM Int. Conf. Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pages 174–181, 2004.

- [126] **Schuts, M., Zhu, F., Heidarian, F., and Vaandrager, F. W.** Modelling clock synchronization in the Chess gMAC WSN protocol. In *Proc. W. Quantitative Formal Methods: Theory and Applications (QFM)*, volume 13, pages 41–54, 2009.
- [127] **Lanzisera, S. and Pister, K.** Theoretical and practical limits to sensitivity in IEEE 802.15.4 receivers. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, pages 1344–1347, 2007.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sinan KURT
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.11.1982, Gaziantep
E-posta : skurt@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2004, Ortadoğu Teknik Üniversitesi,
Mühendislik Fakóltesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2007, Ortadoğu Teknik Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elektromanyetik
- **Doktora** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kablosuz Haberleşme

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

| Yıl | Yer | Görev |
|------------|----------------------|------------------------------|
| 2008-Halen | Aselsan | RF Donanım Tasarım Mühendisi |
| 2006-2008 | TUBİTAK UZAY | Araştırmacı |
| 2004-2006 | Çankaya Üniversitesi | Asistan |

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kurt, S.**, ve Tavli, B., 2013. Propagation model alternatives for outdoor wireless sensor networks, *Proc. IEEE IFIP Wireless Days (WD)*, Valensiya, İspanya.
- Yildiz, H. U., **Kurt, S.**, ve Tavli, B., 2014. The Impact of Near-Ground Path Loss Modeling on Wireless Sensor Network Lifetime, *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, 1114–1119, Baltimore, MD, ABD.
- **Kurt, S.**, ve Tavli, B., 2016. Path Loss Modeling for Wireless Sensor Networks: Review of Models and Comparative Evaluations, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*[Kabul Edildi].

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Selcuk, G. ve **Kurt, S.**, 2015. Solution of Volume Integral Equations with Novel Treatment to Strongly Singular Integrals, *Proc. EuCAP*, Lizbon, Portekiz.
- Selcuk, G. ve **Kurt, S.**, 2015. Low Phase-Noise Oscillator Design Using Large Signal Transfer Function and Complex Quality Factor, *Proc. Eurocon*, Salamanca, İspanya.