

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA AĞ YAŞAM SÜRESİNİN
MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA İLE İNCELENMESİ**

HÜSEYİN ÇOTUK

**DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŞÇU
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

Doç. Dr. Erdoğan DOĞDU
Anabilim Dalı Başkanı

HÜSEYİN ÇOTUK tarafından hazırlanan KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ-
LARDA AĞ YAŞAM SÜRESİNİN MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA İLE
İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Kemal BIÇAKCI

Birinci Tez Danışmanı

Doç. Dr. Bülent TAVLI

İkinci Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN

Üye : Doç. Dr. Kemal BIÇAKCI

Üye : Doç. Dr. Bülent TAVLI

Üye : Doç. Dr. Ali KARA

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tansel ÖZYER

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hüseyin ÇOTUK

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Bilgisayar Mühendisliği
Tez Danışmanları : Doç. Dr. Kemal BIÇAKCI
Doç. Dr. Bülent TAVLI
Tez Türü ve Tarihi : Doktora – Aralık 2013

Hüseyin ÇOTUK

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA AĞ YAŞAM SÜRESİNİN MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Üstlendikleri misyon ve tipik uygulamalarda görülen genel karakteristikleri itibariyle kablosuz algılayıcı düğümler, genelde kısıtlı kaynaklara (kullanılacak enerji ve bant genişliği miktarı, haberleşme mesafesi, hesaplama gücü ve bellek miktarı gibi) sahiptir. Yarı iletken, ağ ve malzeme bilimi teknolojilerindeki son gelişmeler sayesinde donanım ve maliyet ile ilgili kısıtların aşılması, başlangıçtaki enerji miktarını kablosuz algılayıcı ağlarda en kritik kaynak haline getirmiştir. Dolayısıyla kablosuz algılayıcı ağlar konusunda günümüze kadar yapılan çalışmalar, enerji sarfiyatını düşürerek, başka bir deyişle enerji verimli çözümler üreterek ağ yaşam süresini arttırmak konusunda yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada kablosuz algılayıcı ağlarda girişim ve bant genişliğinin ağ yaşam süresine etkileri incelenmiş, bant genişliği ihtiyacını belirleyen parametreler tespit edilerek belli parametreler altında optimum çözüm için gerekli minimum bant genişliği miktarı belirlenmiştir. Ayrıca, kablosuz algılayıcı ağlarda ayrık iletim gücü kontrolü yapıldığı durumda ağ yaşam süresi karakteristiği incelenmiş, farklı güç atama stratejileri kullanıldığında ağ yaşam süresinde meydana gelen etkiler mercek altına alınmıştır. Kullanılan güç atama stratejileri ağ yaşam süresi ve bant genişliği ihtiyaçları açısından birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu aşamada pozisyonlama hatalarının ve olasılıksal radyo yayılımının sonuçlara etkileri ayrıca ele alınmıştır. Önceki çalışmalarda yer alan algoritma tabanlı analiz veya deneysel ölçümlerden farklı olarak bu çalışmada çeşitli matematiksel programlama yöntemleri kullanılarak tasarlanan modeller sayesinde, geniş bir yelpazede büyük bir parametre kümesi ile detaylı incelemeler yapılmıştır. Alınan sonuçlar, bant genişliğinin ağ yaşam süresi üzerinde belli bir aralıkta etkili olduğunu, girişimin ihtiyaç duyulan bant genişliği miktarını arttırdığını, bant genişliği gereksiniminin bir çok ağ ve sistem parametresine

bağlı olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan ayrık iletim gücü kontrolünün sürekli duruma kıyasla ağ yaşam süresinde azalmaya neden olduğu, iletim gücünün daha hassas ayarlanabildiği modellerde daha iyi ağ yaşam süresi elde edilirken, aynı zamanda daha fazla bant genişliğine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Pozisyonlama hatalarını tolere etmek için iletim gücünün artırılması ile, güç kontrolündeki ayırıklaştırma seviyesinden kaynaklanan enerjideki kayıpların azaldığı gözlenmiştir. Buna rağmen yüksek pozisyonlama hataları görüldüğünde bile, iletim gücünün daha hassas ayarlanabilmesi halinde daha iyi ağ yaşam süresi elde edilebildiği anlaşılmıştır. Ayrık iletim gücü kontrolünde yol kaybından kaynaklanan fazla enerji kullanımının paket alma oranını arttırması nedeniyle bazı durumlarda uygun paket alma oranı hedeflenerek sürekli durumdan daha iyi sonuçlar alınabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz algılayıcı ağlar, bant genişliği, girişim, iletim gücü kontrolü, ayrık güç seviyeleri, güç atama stratejileri, optimizasyon, matematiksel programlama, enerji verimliliği, ağ yaşam süresi.

University : **TOBB University of Economics and Technology**
Institute : **Institute of Natural and Applied Sciences**
Science Programme : **Computer Engineering**
Supervisors : **Assoc. Prof. Kemal BIÇAKCI**
 : **Assoc. Prof. Bülent TAVLI**
Degree Awarded and Date : **Ph.D. – December 2013**

Hüseyin ÇOTUK

**ANALYZING NETWORK LIFETIME OF WIRELESS SENSOR
NETWORKS WITH MATHEMATICAL PROGRAMMING**

ABSTRACT

According to the needs of typical applications, wireless sensor nodes are designed to be low-cost, small-sized, and energy-efficient devices. In order to satisfy these production requirements, they generally have scarce resources like energy, bandwidth, communication range, processing power, and memory. After the limitations related to cost and hardware are met by the progress on semiconductor, network, and materials technologies; energy becomes the most critical resource for Wireless Sensor Networks (WSNs). So, recent studies about WSNs concentrated on developing energy-efficient solutions to optimize network lifetime. However, most of these studies ignored the effect of finite bandwidth and discretization of transmission power on WSNs. On the other hand, there are different types of transmission power assignment strategies studied so far, and while it is evident that more fine-tuned power assignment improves network lifetime, the net impact of these strategies remains unclear. In this study, we develop novel mathematical programming frameworks which enable us not only to examine the effects of limited bandwidth and discrete transmission power control, but also to quantify the impact and make a systematic comparison of various power assignment strategies. We analyze the network bandwidth from several aspects with various system parameters. In order to obtain optimal network lifetime with specific parameters, we expose the methodology to determine the minimum amount of required bandwidth. We also investigate the effects of the granularity of power levels on energy dissipation characteristics. Different types of power assignment strategies are analyzed by using two sets of experimental data to compare the performance of these strategies in terms of network lifetime and link bandwidth. In order to see the effects of probabilistic radio propagation, widely

used log-normal shadowing path loss model is adopted into existing models. Our results show that, link bandwidth affects network lifetime within a specific range. As interference rises, the amount of required bandwidth to obtain optimum lifetime increases as well. The granularity of discrete energy consumption has a profound impact on WSN lifetime and when discretization level ascends, network lifetime generally lessens. Results expose that while more fine-grained control of transmission power improves network lifetime, it also requires much more bandwidth.

Keywords: Wireless sensor networks, bandwidth, interference, transmission power control, discrete power levels, power assignment strategies, optimization, mathematical programming, energy efficiency, network lifetime.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren kıymetli hocalarım Doç. Dr. Kemal BIÇAKCI ve Doç. Dr. Bülent TAVLI'ya, yine önemli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN'e, kısmi numerik analizler için hesaplama kaynaklarından faydalandığım TÜBİTAK ULAKBİM Yüksek Başarımli ve Grid Hesaplama Merkezi'ne, verdikleri kısmi burs ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK BİDEB'e, araştırma görevlisi arkadaşım Davut İNCEBACAK'a, son olarak benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen eőim Seda'ya, anneme ve babama teőekkürü bir borç bilirim.

İçindekiler

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xvii
KISALTMALAR	xviii
SEMBOL LİSTESİ	xix
1 GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	3
1.2 Çalışmanın Önemi	3
1.3 Problem Tanımı	4
1.4 Sınırlılıklar	5
1.5 Varsayımlar	5
1.6 Katkılar	7
2 İLGİLİ LİTERATÜR	9

2.1	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Girişim ve Bant Genişliği Konusunda Yapılan alışmalar	9
2.2	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücü ve Güç Atama Stratejileri Konusunda Yapılan alışmalar	11
3	KAVRAMSAL ÇERÇEVE	14
3.1	Kablosuz Algılayıcı Ağlar	14
3.1.1	Kablosuz Algılayıcı Ağ Donanım Birimleri	15
3.1.2	Kablosuz Algılayıcı Ağ Karakteristikleri	17
3.1.3	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Tasarım Kısıtları	18
3.1.4	Kablosuz Algılayıcı Ağ eşitleri	20
3.1.5	Kablosuz Algılayıcı Ağların Uygulama Alanları	20
3.1.6	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Araştırmaya Açık Konular	21
3.1.7	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda İletim Gücü Kontrolü İçin Tasarım Prensipleri	22
3.1.8	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Optimizasyon Yöntemleri	23
3.2	Matematiksel Programlama (MP)	25
3.2.1	Doğrusal Programlama (DP)	26
3.2.2	Tamsayı Programlama (TP)	30
3.3	Faydalanılan Programlar	33
3.3.1	GAMS Genel Cebirsel Modelleme Sistemi	33
3.3.2	MATLAB Programlama Dili	34
4	SİSTEM MODELİ	36
4.1	Referans Zaman ve Enerji Modeli	36
4.2	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Girişim ve Bant Genişliği Analizi için Sistem Modellemesi	38
4.2.1	Doğrusal Programlama Zaman Modeli	41

4.2.2	Doğrusal Programlama Enerji Modeli	41
4.2.3	Karma Tamsayı Doğrusal Programlama Enerji Modeli	42
4.3	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücü ve Güç Atama Stratejilerinin Analizi için Sistem Modellemesi	45
4.3.1	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücünün Modellemesi	46
4.3.2	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Pozisyonlama Hatalarının Modellenmesi	47
4.3.3	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Olasılıksal Radyo Yayılımının Modellenmesi	48
4.3.4	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda İletim Gücü Atama Stratejilerinin Modellenmesi	52
5	BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER	63
5.1	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Girişim ve Bant Genişliği Analizi	64
5.1.1	Doğrusal Programlama Zaman Modeli ile Yapılan Analizler	64
5.1.2	Doğrusal Programlama Enerji Modeli ile Yapılan Analizler	72
5.1.3	Karma Tamsayı Doğrusal Programlama Enerji Modeli ile Yapılan Analizler	82
5.2	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücü ve Güç Atama Stratejilerinin Analizi	85
5.2.1	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücü Kullanımının Analizi	85
5.2.2	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Pozisyonlama Hatalarının Analizi	90
5.2.3	Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Olasılıksal Radyo Yayılımının Analizi	91
5.2.4	KAA'lerde İletim Gücü Atama Stratejilerinin Analizi	96
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	117

EKLER	131
A Örnek GAMS Kodu	132
B Örnek MATLAB Grafik Çizdirme Kodu	137
ÖZGEÇMİŞ	140

Şekil Listesi

3.1	Algılayıcı Düğüm Birimleri	15
3.2	Örnek Mica2 düğüm donanımı	18
3.3	Tek atlamalı doğrudan iletim	24
3.4	Tek atlamalı dolaylı iletim	25
3.5	Çok atlamalı iletim	25
3.6	Kısıtsız basit bir optimizasyon problemi	27
3.7	Standart doğrusal programlama modeli.	28
3.8	Örnek DP problemi için çözüm bölgesi ve optimum çözüm	29
3.9	GAMS kodunun genel formatı	33
4.1	KAA'larda ağ yaşam süresi optimizasyonu için referans DP modeli.	37
4.2	KAA'larda enerji optimizasyonu için referans DP modeli.	37
4.3	Sürekli <i>HCB</i> modeli.	38
4.4	Girişim menziline gösterimi.	40
4.5	KAA'larda bant genişliği analizi için DP zaman modeli.	41
4.6	KAA'larda bant genişliği analizi için DP enerji modeli.	42
4.7	KAA'larda bant genişliği analizi için KTDP enerji modeli.	44
4.8	Ayrık <i>HCB</i> modeli.	46
4.9	KAA'larda ayrık iletim gücü analizi için DP zaman modeli.	46
4.10	<i>PNM-SL</i> güç atama DP modeli.	54

4.11	<i>PLM-ML</i> güç atama DP modeli.	55
4.12	<i>PNM-ML</i> güç atama KTDP modeli.	56
4.13	<i>PSM-ML</i> güç atama KTDP modeli.	58
5.1	Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğüm sayıları (N) ve $\gamma = 1.0$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).	65
5.2	Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğüm sayıları (N) ve $\gamma = 1.7$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).	67
5.3	Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğümler arası mesafeler (d_{ij}) ve $\gamma = 1.0$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).	68
5.4	Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğümler arası mesafeler (d_{ij}) ve $\gamma = 1.7$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).	70
5.5	Ağdaki düğümlerin konumları itibariyle bant genişliği kullanımları.	71
5.6	$N = 50$ ve $\gamma = 1.7$ olduğu durumda farklı iletim menzili(t_r), girişim faktörü (γ) ve yol kaybı katsayısı (α) için s_i 'nin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş enerji tüketimi.	73
5.7	$N = 50$ ve $R_{net} = 200m$ olduğu durumda farklı iletim menzili(t_r), girişim faktörü (γ) ve yol kaybı katsayısı (α) için s_i 'nin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş enerji tüketimi.	76
5.8	$R_{net} = 200$ m, $\gamma = 1.7$ ve $t_r = 150$ m olduğu durumda farklı düğüm sayılarında ihtiyaç duyulan min ve opt bant genişlikleri.	78
5.9	$R_{net} = 200$ m, $\gamma = 1.7$ ve $t_r \rightarrow \infty$ olduğu durumda farklı düğüm sayılarında ihtiyaç duyulan min ve opt bant genişlikleri.	80
5.10	Optimum enerji çözümü için farklı düğüm sayıları ve veri üretim oranlarında gerekli bant genişliği miktarları.	82
5.11	Farklı düğüm sayıları için zaman dilimi sayısının bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş enerji tüketimi ($d_{int} = 20$ m, $\gamma = 1.0$, $PS = 2048$ bit, $NP = 1$).	83
5.12	Yeterli ve gerekli koşulu sağlayan DP ve KTDP modellerinin karşılaştırılması	84

5.13 Sürekli ve ayrık HCB modellerinin farklı η değerleri için karşılaştırması.	86
5.14 En küçük ayarlanabilir enerji seviyesi η 'nın bir fonksiyonu olarak sürekli HCB modelinde elde edilen ağ yaşam süresine göre normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m$).	88
5.15 Farklı ayırıklaştırma seviyeleri için pozisyonlama hatasının (e_{max}) bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m, N = 100$).	90
5.16 Farklı ayırıklaştırma seviyeleri için hedef PRR değerinin (χ_{trg}) bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m, N = 100$).	93
5.17 Sürekli durumda veya ayrık HCB-LNS modelinde herhangi bir η değerinde elde edilen en yüksek ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m, N = 100$).	94
5.18 Farklı χ_{trg} değerleri için en küçük kullanılabilir enerji seviyesinin (η) bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m, N = 100$).	95
5.19 PNM-SL modelinde kullanılan güç seviyesinin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	97
5.20 PNM-SL modelinde farklı düğüm sayıları için R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.	98
5.21 PNM-SL modelinde farklı R_{net} değerleri için düğüm sayısının bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.	99
5.22 PNM-SL modelinde farklı düğüm sayılarında R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri.	100
5.23 Güç atama stratejilerinin ağ yaşam süresi açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	102
5.24 Kullanılabilen güç seviyesi sayısının bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süresi ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	103
5.25 PNM-SL modelinde her güç seviyesinin minimum bant genişliği gereksinimi ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	104
5.26 Güç atama stratejilerinin bant genişliği gereksinimleri açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	105

5.27	Yol kayıplı PNM-SL modelinde kullanılan güç seviyesinin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	106
5.28	PNM-SL-PL modelinde farklı düğüm sayıları için R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.	107
5.29	PNM-SL-PL modelinde farklı R_{net} değerleri için düğüm sayısının bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.	109
5.30	PNM-SL-PL modelinde farklı düğüm sayılarında R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri.	111
5.31	Güç atama stratejilerinin ağ yaşam süresi açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	112
5.32	Yol kayıplı modellerde kullanılabilen güç seviyesi sayısının bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süresi ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	113
5.33	PNM-SL-PL modelinde her güç seviyesinin minimum bant genişliği gereksinimi ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	115
5.34	Yol kayıplı güç atama stratejilerinin bant genişliği gereksinimleri açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m, N = 50$).	116

Tablo Listesi

4.1	Mica düğümlerinde farklı güç seviyelerinde iletim enerjileri ($\mu J/\text{bit}$) ve ilgili iletim menzilleri (m).	54
4.2	Mica-PL enerji modelinde d_k (m) ve güç seviyesinin (PL) bir fonksiyonu olarak PRR (χ_{ik}^M) değerleri.	59
5.1	Analizlerde Ortak Kullanılan Sabitler	64
5.2	Sürekli veya ayrık HCB-LNS enerji modelinde her χ_{trg} için en yüksek ağ yaşam süresinin elde edildiği enerji seviyeleri.	94
5.3	L_{PNM-ML} ve L_{PSM-ML} için normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($N = 50, R_{net}=50$ m.)	103
5.4	Mica-PL enerji modelinde d_{ij} (m) mesafelerine gönderimde en verimli güç seviyeleri, PRR (χ_{ij}^M) değerleri ve paketlerin tekrar gönderilmesi halinde iletim enerjileri $\lambda_{ij} E_{tx}^{D-HCB}(d_{ij})$ ($\mu J/\text{bit}$). . .	110
5.5	$L_{PNM-ML-PL}$ ve $L_{PSM-ML-PL}$ için normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($N = 50, R_{net}=50$ m.)	114

KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
KAA	Kablosuz algılayıcı ağ
DSN	Ayrık algılayıcı ağlar (distributed sensor networks)
MİB	Merkezi işlem birimi (central processing unit)
ADC	Analog sayısal çevirici (analog digital converter)
PRR	Paket alma oranı (packet reception rate)
RSSI	Radyo sinyal seviyesi göstergesi (radio signal strength indicator)
LQI	Bağlantı kalite göstergesi (link quality indicator)
GPS	Yer bulma sistemi (global positioning system)
MAC	Ortam erişim kontrolü (media access control)
MP	Matematiksel programlama (mathematical programming)
DP	Doğrusal programlama (linear programming)
TP	Tamsayı programlama (integer programming)
İTP	İkili tamsayı programlama (binary integer programming)
KTP	Karma tamsayı programlama (mixed integer programming)
KTDP	Karma tamsayı doğrusal programlama (mixed integer linear programming)
HCB	İsmi kendisini tasarlayan yazarların (Heinzelman, Chandrakasan, Balakrishnan) isimlerinin başharflerinden alan enerji modeli
LNS	Log-normal gölgeleme (log-normal shadowing)
PNM-SL	Ağ genelinde güç ataması yapılabilen tek seviyeli Mica modeli (Per Network Mica Model Single Level)
PLM-ML	Bağlantı bazında güç ataması yapılabilen çok seviyeli Mica modeli (Per Link Mica Model Multiple Level)
PNM-ML	Ağ genelinde güç ataması yapılabilen çok seviyeli Mica modeli (Per Network Mica Model Single Level)
PSM-ML	Düğüm bazında güç ataması yapılabilen çok seviyeli Mica modeli (Per Network Mica Model Single Level)
PNM-SL-PL	Ağ genelinde güç ataması yapılabilen tek seviyeli yol kayıplı Mica modeli (Per Network Mica Model Single Level)
PLM-ML-PL	Bağlantı bazında güç ataması yapılabilen çok seviyeli yol kayıplı Mica modeli (Per Link Mica Model Multiple Level)
PNM-ML-PL	Ağ genelinde güç ataması yapılabilen çok seviyeli yol kayıplı Mica modeli (Per Network Mica Model Single Level)
PSM-ML-PL	Düğüm bazında güç ataması yapılabilen çok seviyeli yol kayıplı Mica modeli (Per Network Mica Model Single Level)

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
G	Düğümlerin ve veri akışlarının oluşturduğu ağı ifade eden çizge
V	Baz istasyonu dahil ağdaki düğümlerin kümesi
W	Baz istasyonu hariç ağdaki düğümlerin kümesi
A	Düğümler arasındaki veri akışlarının kümesi
t	Ağ yaşam süresi
N	Düğüm sayısı
f_{ij}	i düğümünden j düğümüne veri akışı
g_{ij}^l	i düğümünden j düğümüne l . güç seviyesinde veri akışı
s_i	Bit cinsinden i düğümünde üretilen veri miktarı
d_{int}	1-boyutlu topolojide düğümler arasındaki mesafe
d_{ij}	i ve j düğümleri arasındaki mesafe
d_{ij}^e	i ve j düğümleri arasında hesaplanan mesafe
d_{ij}^c	i ve j düğümleri arasında hesaplanmış düzeltilmiş mesafe
R_{net}	2-boyutlu topolojide ağın yayılım yüzeyinin yarıçapı
t_r	İletim menzili
ρ	Elektronik devrede harcanan enerji
ε	Vericinin verimliliği
e_i	Her düğümün bataryasında başlangıçta bulunan enerji miktarı
α	Yol kaybı katsayısı
η	En küçük ayarlanabilir enerji miktarı
P_{rx}	Bir bit almak için harcanan güç miktarı
$P_{tx}(d_{ij}), dB$	Desibel cinsinden i düğümünden j düğümüne bir bit göndermek için harcanan güç miktarı
$P_{tx}(d_{ij}), W$	Watt cinsinden i düğümünden j düğümüne bir bit göndermek için harcanan güç miktarı
E_{rx}	Bir bit almak için harcanan enerji miktarı
$E_{tx}(d_{ij})$	i düğümünden j düğümüne bir bit göndermek için harcanan enerji miktarı
E_{rx}^{C-HCB}	Sürekli HCB modelinde bir bit almak için harcanan enerji
$E_{tx}^{C-HCB}(d_{ij})$	Sürekli HCB modelinde i düğümünden j düğümüne bir bit göndermek için harcanan enerji
E_{rx}^{D-HCB}	Ayrık HCB modelinde bir bit almak için harcanan enerji
$E_{tx}^{D-HCB}(d_{ij})$	Ayrık HCB modelinde i düğümünden j düğümüne bir bit göndermek için harcanan enerji
$E_{rx}^{C-HCB-LNS}$	Yol kayıplı sürekli HCB modelinde bir bit almak için harcanan enerji
$E_{tx}^{C-HCB-LNS}(d_{ij})$	Yol kayıplı sürekli HCB modelinde i düğümünden j düğümüne bir bit göndermek için harcanan enerji

$E_{rx}^{D-HCB-LNS}$	Yol kayıplı ayrıık <i>HCB</i> modelinde bir bit almak için harcanan enerji
$E_{tx}^{D-HCB-LNS}(d_{ij})$	Yol kayıplı ayrıık <i>HCB</i> modelinde <i>i</i> düğümünden <i>j</i> düğümüne bir bit göndermek için harcanan enerji
S_L	Güç seviyeleri kümesi
N_L	S_L kümesinde ayrıık güç seviyesi sayısı
$t_r^M(l)$	Mica modelinde <i>l</i> . güç seviyesindeki iletim menzili
$E_{tx}^M(l)$	Mica modelinde <i>l</i> . güç seviyesindeki bit başına harcanan iletim enerjisi
E_{rx}^M	Mica modelinde bir bit almak için harcanan enerji
$E_{tx}^{M-opt}(d_{ij})$	Mica modelinde optimum güç seviyesinde <i>i</i> düğümünden <i>j</i> düğümüne bir bit göndermek için kullanılan harcanan enerji
l_{min}	En küçük güç seviyesi
l_{max}	En büyük güç seviyesi
l_{PNM-SL}	Verilen <i>PNM-SL</i> modelini çözmek için kullanılan güç seviyesi
L_{PNM-ML}	<i>PNM-ML</i> modelinde mevcut güç seviyesi sayısının üst limiti
L_{PSM-ML}	<i>PSM-ML</i> modelinde mevcut güç seviyesi sayısının üst limiti
h^l	<i>l</i> güç seviyesinde tüm düğümler tarafından iletilen toplam veri miktarı
a^l	Karar değişkeni (h^l "0"dan farklı ise 1, değilse 0)
h_i^l	<i>l</i> güç seviyesinde <i>i</i> düğümünden çıkan toplam veri miktarı
a_i^l	Karar değişkeni (h_i^l "0"dan farklı ise 1, değilse 0)
M	Yeterince büyük bir sabit
B	Bağlantı bant genişliği
I_{jk}^i	<i>j</i> düğümü <i>k</i> düğümü ile haberleşirken <i>i</i> düğümü üzerinde meydana gelen ve girişimden kaynaklı veri akışı
γ	Girişim faktörü
d_0	Yol kaybı modelinde önceden belirlenmiş referans uzaklık
$PL(d_{ij}), dB$	Desibel cinsinden <i>i</i> düğümü ile <i>j</i> düğümü arasındaki yol kaybı
$PL(d_0), dB$	Desibel cinsinden referans mesafenin yol kaybı
P_n, dB	Desibel cinsinden gürültünün taban değeri
σ	Standart sapma
φ	Paket büyüklüğü
X_σ, dB	Desibel cinsinden σ standart sapmaya sahip sıfır-ortalımalı Gauss rastgele değişkeni
χ_{ij}	<i>i</i> düğümü ile <i>j</i> düğümü arasında gerçekleşen paket alma oranı
χ_{trg}	Hedeflenen paket alma oranı
$\psi(d_{ij})$	d_{ij} mesafesindeki sinyalin gürültüye oranı
λ_{ij}	<i>i</i> düğümü ile <i>j</i> düğümü arasında paketin yeniden gönderilme sayısı

e_{max}	Maksimum pozisyonlama hatası
t_{rnd}	Zamanın ağ yaşam süresi boyunca bölüdüğü eşit zaman dilimi
T_b	Bir bitin iletilmesi için gerekli zaman
x	Ağ yaşam süresinin bölüdüğü zaman dilimlerinden her biri
$g(i, j, x)$	x zaman diliminde i düğümünden j düğümüne veri akışını gösteren ikili değişken
$s(i, x)$	x zaman diliminde i düğümünde veri üretimini ifadeeden ikili değişken
$c(i, j, k, l)$	(i, j) ile (k, l) bağlantılarının çakışma durumunu gösteren matris
PS	Paket büyüklüğü
NP	Gönderilecek paket sayısı
NS	Zaman dilimi sayısı

1. GİRİŞ

Yer aldıkları uygulamaların ihtiyaçları gözetilerek konumlandırılan ve çeşitli ölçümler yapabilen düğümlerden oluşan "Kablosuz Algılayıcı Ağlar" (KAA); yarı iletken, ağ ve malzeme bilimi teknolojilerindeki son gelişmeler sayesinde günümüzde askeri uygulamalardan çevresel takip ve gözlem uygulamalarına, güvenlik ve gözetim sistemlerinden medikal takip ve tıbbi izleme yöntemlerine kadar çok yaygın bir alanda kullanılmaya başlamıştır.

Üstlendikleri misyon itibarıyla kullanım alanları ve amaçları dikkate alındığında KAA'larda; küçük boyutlu olma, düşük maliyete sahip olma, çevresel koşullara uyum sağlama, az enerji tüketme, bakım ve onarım gerektirmeme gibi bazı tasarım kriterlerinin sağlanması şart haline gelmiştir. Bu nedenle KAA'lar genelde kısıtlı kaynaklara (enerji, bant genişliği, haberleşme mesafesi, hesaplama gücü, bellek miktarı) sahiptir. Donanım ve maliyet ile ilgili olan kısıtlar teknolojideki son gelişmeler ile aşılmış, bu alandaki çalışmalar güç tüketiminin azaltılması bu sayede ağ yaşam süresinin artırılması konusunda yoğunlaşmıştır.

Genellikle iki adet AA tipi pil ile çalışan KAA düğümleri, bazı durumlarda binlerle ifade edilebilen sayılarda kullanılabilmekte ve bu düğümlerden herhangi birisinin enerjisinin tükenmesi uygulamanın ömrünün yani ağ yaşam süresinin de tükenmesi olarak kabul edilmektedir. Bunun sebebi takip edilen olayın kapsama alanı dışında kalmasıdır. Savunma sanayi ve çevresel gözlem-takip uygulamaları gibi geniş alanlara yayılmış, fazla sayıda düğüm kullanılan durumlarda konumları itibarıyla düğümlerdeki pillerin yenilenmesi çok pratik olmamaktadır. Bu nedenle enerji tüketiminin azaltılması, başka bir deyişle enerji verimli çözümlerin geliştirilmesi KAA'lar için en önemli tasarım kriterlerinden birisi haline gelmiştir [1-7].

Ağ yaşam süresinin optimizasyonu konusu günümüze kadar yaygın olarak incelenmiş ve bazı araştırmacılar bu amaçla algoritmalar geliştirirken [6,8], bazıları yeni

ağ protokolleri [7,9,10] tasarlamıştır. Başka bir grup, yönlendirme teknikleri [11–13] üzerinde yoğunlaşmış, bir kısım araştırmacı da matematiksel programlama [2,14–20] vasıtasıyla ağ yaşam süresi optimizasyonu için tasarım ilkeleri ortaya koymuştur. Ancak bu konuda yapılan bazı araştırmalar gerçek hayatta karşılığı olmayan varsayımlarda bulunmuş, uygulamada ortaya çıkan farklılıklar nedeniyle bu çalışmalarda elde edilen sonuçların uygulanabilirliği tartışılır hale gelmiştir.

Bu varsayımlardan birisi KAA düğümlerinin sınırsız bant genişliğine sahip olduğunun kabul edilmesi yani başka bir düğüme gönderilmesi gereken veri miktarının gerekirse tamamının bir seferde gönderilebileceğinin kabulüdür. Ancak gerçek hayatta üretilen her KAA düğümü kablosuz bir alıcı/verici kullanmakta ve fiziksel olarak bu alıcı/vericinin gönderebileceği veri miktarı belirli bir bant genişliği ile sınırlı kalmaktadır. Ayrıca aynı anda haberleşen birden fazla düğüm grubunun belli mesafeler içerisinde birbirlerini etkilemeleri, başka bir deyişle diğer grup üzerinde girişim nedeniyle oluşturdukları gürültü göz ardı edilmiştir.

Bununla birlikte KAA'larda en fazla güç tüketiminin iki düğüm arasındaki haberleşme esnasında harcanması [1], bu konuda bir çok çalışma yapılmasına ve yeni stratejiler geliştirilmesine neden olmuştur. Ancak bu çalışmalardan bir çoğu iki düğüm arasındaki mesafeye bağlı olarak iletim gücünün sürekli ölçekte ayarlanabildiğini varsaymıştır. Bu yaklaşımın pratikte karşılığı yoktur çünkü üretimde kullanılan alıcı/verici üniteleri güç atamalarını sadece ayırık değerlerde yapabilmektedir. Teoride belli bir mesafeye sinyali ulaştırabilmek için gerekli güç değeri tam doğrulukla hesaplanabilmekte ancak pratikte üretim kısıtları nedeniyle verici ünitesi her değeri kullanamamaktadır. Üretici firmalar kullanacakları güç seviyelerini önceden belirleyerek bu seviyelere karşılık gelen tipik enerji tüketim miktarlarını deklare etmek suretiyle ürünlerini piyasaya sunmaktadır. Dolayısıyla uygulamada, verici ünitesi bu güç seviyelerinden herhangi birisini kullanarak iletim menzili limitleri içerisinde veri transferi yapmaktadır. Son dönemde yapılan bazı deneysel araştırmalarda [21, 22] ayırık güç seviyeleri kullanıldığında bu seviyelere ait gönderim yapılabilen en uzun mesafeler (t_r) ölçülmüştür. Bir düğüm herhangi bir güç seviyesi kullandığında, yarıçapı bu seviyeye ait t_r olan dairesel bir alan içerisindeki başka bir düğüm ile haberleşme yapabilmektedir.

Diğer taraftan KAA konusunda yapılan bir çok çalışmada düğüm konumlarının önceden bilindiği varsayılmış, ideal iletim ortamları kullanıldığı kabul edilerek kullanılan radyo modelleri olasılıksal iletimi baz almamıştır. Oysaki, gerçek hayattaki uygulamalarda düğüm konumları çoğu durumda önceden bilinmemekte,

rastgele dağıtılan düğümlerin tamamının buldukları yerden en yüksek güçte sinyal göndermesi sağlanarak ölçüm yapılan noktadaki sinyal seviyesine göre mesafeleri belirlenmektedir. Bu da ancak belli pozisyonlama hatalarıyla mümkün olmaktadır. Bununla birlikte iki düğüm arasındaki bağlantının kalitesi; yol kaybı katsayısı, kanalın gölgeleme değişkeni, modülasyon ve şifreleme gibi çeşitli radyo ve kanal parametrelerine bağlı olduğu için sinyal olasılıkları dahilinde iletilmektedir.

Son olarak, yapılan araştırmalar daha önceki çalışmalarda iletim gücünün düğümler üzerinde aynı çalışma içerisinde farklı şekillerde atanması konusunun ele alınmadığını göstermiştir. Bu atamanın ağdaki tüm düğümler bazında yapılabileceği gibi, tek tek düğüm bazında ve düğümler arasındaki bağlantı bazında yapılabileceği ve sonuçların karşılaştırılabileceği düşünülmüştür. Kullanılabilecek güç seviyesi sayısının ağ yaşam süresi üzerindeki etkileri de incelenebilecek bir diğer konu olarak ön plana çıkmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, öncekilerden farklı olarak yukarıda bahsi geçen bazı varsayımları ortadan kaldıran, böylece gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılabilecek daha gerçekçi KAA modellerinin, bant genişliği kısıtları ve ayrık iletim gücü kullanımı açısından incelenmesi, matematiksel programlama vasıtasıyla ele alınan farklı durumların ağ yaşam süresi ve enerji verimliliğine etkilerinin ortaya konulması ve bu bağlamda daha önce incelenmemiş iletim gücü atama stratejileri ve kullanılabilir güç seviyesi sayısının ağ yaşam süresi açısından analiz edilerek birbirleriyle karşılaştırılmasıdır.

1.2 Çalışmanın Önemi

Bu çalışmada, daha önce yapılan çoğu araştırmada göz ardı edilen kısıtlar veya problemi basitleştirmek için kabul edilen ancak gerçek hayata uygun olmayan varsayımlar nedeniyle uygulanabilirliği tartışılır hale gelen analizler, daha gerçekçi modeller vasıtasıyla matematiksel programlama kullanılarak incelenecektir. Çalışma sonucunda ortaya çıkan bulgular üretim kriterlerinin belirlenmesine

yardımcı olacak veya mevcut uygulamaların tasarlanması ve yapılandırılması konularında yol gösterici olacaktır. Bu sayede KAA'larda en önemli tasarım kriterlerinden biri olan ağ yaşam süresinin optimizasyonu konusunda hem gelecekte yapılan çalışmalara hem de yeni üretim stratejilerine ışık tutacaktır.

1.3 Problem Tanımı

Bu çalışma kapsamında ağ yaşam süresi ve enerji optimizasyonu problemi, bant genişliği kısıtları ve ayrık iletim gücü kullanımı açısından ele alınmış ve aşağıdaki sorulara cevaplar aranmıştır:

1. Bant genişliği sınırlı olduğu durum ele alındığında sınırsız duruma kıyasla ağ yaşam süresinde nasıl bir değişim gözlenir? Aynı anda haberleşen iki farklı düğüm grubunun girişim nedeniyle oluşturdukları gürültünün etkileri nelerdir?
2. Bant genişliğinin sınırsız olduğu durumda hesaplanan ağ yaşam süresini elde etmek için belli veri üretim oranı ve düğüm sayılarında ağın global bant genişliği gereksinimi nasıl belirlenmelidir?
3. Ağda bulunan düğümlerden hangileri konumları itibariyle diğerlerine nazaran daha yüksek bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır?
4. Mica düğümlerinde desteklenebilen en yüksek genel veri üretim oranı hangi faktörlere bağlıdır?
5. KAA'larda ağ yaşam süresi ve enerji optimizasyonu için ağın bant genişliği ile diğer ağ parametreleri arasındaki ilişki nedir?
6. KAA'larda bant genişliği limiti olmadığı durumda harcanan enerji miktarı arttırılmadan her düğüm için (uygulanabilir bir veri akışı vasıtasıyla) kullanılacak en yüksek veri üretim oranı nasıl bulunmalıdır?
7. Belirlenen sayıda iletim gücü seviyesine sahip ayrık güç kontrolü yapan bir KAA'da, iletim gücünün sürekli aralıklarla ayarlanabildiği ideal duruma kıyasla ağ yaşam süresinde ne kadarlık bir düşüş beklenmektedir? Pozisyonlama hataları ve olasılıksal paket alma oranı bu sonuçları nasıl etkilemektedir?

8. Ağ yaşam süresi optimizasyonu için donanım tarafından sağlanan tüm güç seviyelerini kullanmak gerekli midir? Güç seviyeleri içerisinde seçilecek bir alt küme ile en iyi ağ yaşam süresi elde edilebilir mi?
9. Her düğümün diğer düğümlerle yaptığı tüm bağlantılar için ortak kullanılacak tek bir güç seviyesi belirlemek yerine iletim yaptığı düğüme bağlı olarak bir güç seviyesi belirlediği (farklı hedef düğümler için farklı güç seviyeleri seçebildiği) durumda ağ yaşam süresinde artış elde edilebilir mi?
10. Ağda yer alan tüm düğümler için ortak bir güç seviyesi belirlenmesinin, düğüm bazında en iyi güç seviyesinin seçildiği duruma göre ağ yaşam süresine etkisi ne kadar olur?
11. Ağ genelinde tek bir güç seviyesi seçilerek tüm düğümler için ortak kullanıldığı durumda kullanılacak en uygun güç seviyesini seçmenin pratik bir yöntemi var mıdır?
12. Analiz edilen güç atama stratejilerinin bant genişliği gereksinimleri nelerdir? Hangi strateji daha fazla bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır? Bu güç seviyeleri için veri üretim oranının ağ yaşam süresine etkileri neledir?

1.4 Sınırlılıklar

KAA düğümü üreten bir çok firma olmakla birlikte bu çalışmada CrossBow Technology Inc. tarafından üretilen Mica ve Mica2 düğümleri baz alınmıştır. Kullanılan bazı deneysel ölçümler ve referans alınan sabitler Mica ve Mica2 düğümlerine aittir.

1.5 Varsayımlar

Bu çalışmada, genel kabul gören aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

1. KAA'lar ile ilgili yapılan bir çok çalışmada, ağdaki ilk düğümün enerjisinin tükendiği an, sistemin bütünüyle işlevselliğini yitirdiği kabul edilmiştir. Bunun sebebi, sınır güvenliği, çevre takip ve gözetimi gibi kritik uygulamalarda

düğümlerden gelmesi gereken bir bilginin ulaşamaması durumunda sistemin güvenilirliğinin kaybolması başka bir deyişle izlenen olayın kapsama alanı dışında kalmasıdır.

2. Algılayıcı düğümlerden gelen verileri toplayan baz istasyonunun tüm topoloji bilgisine sahip olduğu varsayılmış, bununla birlikte pozisyonlama hatalarının etkileri ayrıca incelenmiştir. Baz istasyonunun gerekli hesaplamaları yapabilmek için yeterli seviyede işlem yapabilme kabiliyeti ve enerji kaynağına sahip olduğu kabul edilmiştir.
3. Pozisyonlama hatalarının ağ yaşam süresine etkileri incelenirken bu konuda yapılan çalışmalar referans alınarak 0 ile 10 m arasındaki hatalar göz önüne alınmıştır.
4. Verilen bir ağ için pozisyonlama hatası e_{max} 'ın bilindiği varsayılmıştır.
5. Tüm düğümlerin birbiriyle zamanlama açısından senkron olduğu varsayılmıştır. KAA için tasarlanmış, herhangi bir ek yük getirmeyen ve tatmin edici senkronizasyon performansı sağlayan bir çok protokol bulunmaktadır [23].
6. Zamanın ağ yaşam süresi boyunca eşit aralıklara bölüldüğü ve her bir aralığın $T_{rnd}=1$ saniye olduğu kabul edilmiştir.
7. Her algılayıcı düğümün periyodik olarak eşit miktarda veri ürettiği (s_i sabit) kabul edilmiştir.
8. Algılayıcı düğümlerde haberleşme sırasındaki enerji tüketiminin hesaplamaya göre baskın olduğu varsayılmıştır. KAA test ortamlarında yapılan ve [24]'te özetlenen bazı çalışmalar toplam enerjinin %90'dan fazlasının haberleşme sırasında harcadığını göstermiştir.
9. Ağın yeniden yapılanma süresi yeterince uzundur, böylece topoloji keşfi ve yönlendirme hesaplanması için gerekli enerji maliyeti, toplam enerji maliyetinin küçük bir bölümünü oluşturmaktadır (%1'den daha küçük [25]).
10. Ortamda, bağlantılar arasındaki girişim miktarını azaltan zaman bölümlenmeli çoklu erişim (TDMA) bulunan bir MAC katmanı kullanıldığı düşünülmüştür. Çakışma olmadan böyle bir zaman dilimi yerleştirme algoritmasının mümkün olduğu [14]'te gösterilmiştir. Dolayısıyla yeterli

bant genişliği gereksinimi sağlandığında çakışmasız bir haberleşmenin yapılabileceği bilinmektedir.

11. Bant genişliği analizinde birbirine komşu düğümlere ait bağlantıların zaman içerisinde sırasıyla yapıldığı varsayılmıştır. Bu durumda aynı anda yapılabilecek bağlantılar göz ardı edildiği için fazladan bant genişliği gereksinimi ortaya konulmuştur.

1.6 Katkılar

Bu tez çalışması, daha önce yapılan bir çok çalışmada bahsi geçen ancak gerçek hayatta karşılığı olmayan bazı varsayımları ortadan kaldırarak daha gerçekçi KAA modelleri vasıtasıyla ağ yaşam süresinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. MAC katmanında çakışmasız bir iletimi garanti etmek üzere önceki çalışmalardan birinde tanımlanan yeterli koşul iyileştirilerek gerekli koşul elde edilmiş ve bu sayede ideal durumda ihtiyaç duyulan bant genişliği miktarı bulunmuştur. Sağlanan iyileştirme yardımıyla harcanan enerji miktarı azaltılmış, dolayısıyla ağ yaşam süresi uzatılmıştır. Çalışmanın önemli katkılarından bir diğeri, istenilen bir yapılandırma için belli ağ parametreleri altında gerekli kanal bant genişliği miktarının belirlenmesidir. Böylece amaca uygun donanım seçimi mümkün hale gelmektedir.

Bununla birlikte, güç kontrolü konusunda ayrık iletim gücü kullanılması halinde ayrıklaştırmanın etkileri net biçimde ortaya konulmuş, bu sonuçlara pozisyonlama hataları ve olasılıksal radyo yayılımının etkileri ayrıca ele alınmıştır. Son olarak daha önce ele alınmayan iletim gücünün aynı çalışma içerisinde farklı şekillerde atanması konusu incelenmiş, farklı stratejilerin ağ yaşam süresi açısından verimliliği ve bant genişliği ihtiyaçları karşılaştırılarak net şekilde ortaya konulmuştur.

Takip eden bölümler şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de KAA’larda bant genişliği ve ayrık iletim gücü analizi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar verilmiştir. Bölüm 3’te konu ile ilgili kavramsal çerçeve çizilmiş, detaylı olarak kablosuz algılayıcı ağlar, matematiksel programlama ve kullanılan araçlar anlatılmıştır. Bölüm 4’te çalışmaya konu olan sistem modelleri verilerek ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Bölüm 5’te bir önceki bölümde tanımlanan modeller ile ilgili numerik analizler yapılmış, elde edilen bulgular ve bunlara ait değerlendirmeler

paylaşlmıştır. Son olarak, Bölüm 6'da bulunan sonuçlar özetlenmiş ve önerilere değinilmiştir.

2. İLGİLİ LİTERATÜR

Kablosuz algılayıcı ağlarda ağ yaşam süresinin arttırılması en önemli tasarım kriterlerinden birisidir [26, 27]. Bu doğrultuda sistem tasarımı [28, 29], donanım tasarımı, protokol geliştirme [7–10, 16, 30], güç yönetimi [4, 5, 31–33], güvenlik [34–38], gizlilik [36, 37, 39], bant genişliği [14, 15, 40–46], düğüm konumlandırma [47–52], kendi kendine kalibre olabilme [53, 54] ve grup yönetimi gibi bir çok konuda çalışmalar yapılmıştır [55, 56]. İlgili alanımıza giren bant genişliği ve güç yönetimi konusundaki çalışmalar ilgili alt başlıklarda daha detaylı biçimde ele alınmıştır.

2.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Girişim ve Bant Genişliği Konusunda Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmanın ilk bölümünde ele alınan KAA'ların bant genişliği konusunda daha önce yapılan bazı çalışmalar problemi farklı yönlerden incelemiştir. Enerji tüketiminin azaltılması sırasında girişim ve bant genişliği kısıtlarının göz ardı edilmesi halinde elde edilen sonuçların uygulanabilir olmadığı [14]'te gösterilmiştir. Optimum enerji sarfiyatı için kullanılması gereken bazı veri akışlarının bant genişliğindeki kısıtlar nedeniyle çözüme dahil edilemediği durumlar bulunabilmektedir. Dolayısı ile KAA'larda gerçekçi bir analiz yapabilmek için girişimin etkilerinin ve bant genişliği kısıtlarının dikkate alınması şarttır.

[40]'ta girişimin kablosuz ağ performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yazarlar ağın veri taşıma kapasitesinin girişime duyarlı bir yönlendirme algoritması kullanılarak arttırılabileceğini göstermişlerdir. Bant genişliğindeki kısıtlamaların ve girişimin kablosuz plansız (ad hoc) ağlar üzerindeki etkileri başka bir çalışmada

incelenmiştir [41]. Liu ve arkadaşları, algılayıcı düğümlerden veri toplayarak baz istasyonuna gönderen birden fazla gezici aktarma düğümü kullanarak KAA'ların veri taşıma kapasitesini incelemişlerdir [42]. Gezici aktarma düğümlerinin sayısını arttırmamın belli bir eşik değere kadar veri taşıma kapasitesini doğrusal olarak arttırdığını, bu eşikten itibaren kapasitenin, girişim faktörü ve iletim menziline bağlı bir sabit haline geldiğini göstermişlerdir. Başka bir çalışmada [43] yazarlar, ağın veri taşıma kapasitesinin güç tüketiminden daha önemli olduğu özel durumu incelemişlerdir. Daha iyi bir veri taşıma kapasitesi elde edebilmek için, bir bağlantı grubunu önceden belirlenmiş sayıda zaman dilimi içerisine yerleştirmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Cheng, Gong, Cai ve Jia [15]'te bant genişliği etkilerini göz önüne alarak toplam güç tüketimini ve toplam girişim miktarını minimize eden algoritmalar önermişlerdir. Bunların dışında KAA'larda bant genişliği ile ilgili hizmet kalitesini (QoS) arttırma konusunda [44–46] gibi farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Bu konuda yapılan bahsi geçen tüm çalışmalar bant genişliği kısıtlarının KAA performansı üzerindeki etkilerini incelemekle birlikte bildiğimiz kadarıyla bunlardan sadece ikisi ([14, 15]) enerji optimizasyonu ve kısıtlı bant genişliği konusunu birlikte ele almıştır. Her iki çalışmada da toplam enerji sarfiyatı minimize edilmiştir. Ancak toplam enerji tüketimini en aza indirmenin ağ yaşam süresini optimize etmekle aynı olmadığı bilinmektedir [2].

Bu çalışmada öncelikle ağ yaşam süresini maksimize eden bir doğrusal programlama (DP) modeli oluşturulmuş ve bant genişliği kısıtlarının etkileri incelenmiştir. Daha sonra [14] ve [15]'teki gibi toplam enerji sarfiyatını minimize etmek yerine en fazla enerji harcayan düğümün tükettiği enerjiyi minimize edecek bir doğrusal programlama (DP) modeli önerilmiştir. Bu model aynı zamanda ağ yaşam süresini optimize etmektedir. Ayrıca bant genişliği (B) ve diğer ağ parametreleri (iletim menzili (t_r), her düğümün veri üretim oranı (s_i), yol kaybı katsayısı (α), ağın yayılım yüzeyinin yarıçapı (R_{net}), düğüm sayısı (N)) arasındaki ilişki detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın bant genişliği kısıtları konusundaki en çarpıcı katkısı, bant genişliği kısıdı olmadığı durumdan daha fazla enerji tüketimi gerektirmeyen ve kullanılabilir veri akışlarına sahip olan düğüm başına en yüksek veri üretim oranını belirlemektir. Benzer şekilde, bant genişliği kısıtlaması olmadan elde edilebilen en uzun ağ yaşam süresinin en az hangi bant genişliği ile elde edilebildiği ayrıca analiz edilmiştir.

2.2 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayırık İletim Gücü ve Güç Atama Stratejileri Konusunda Yapılan Çalışmalar

Çalışmanın ikinci bölümüne konu olan "KAA'larda Güç Yönetimi"nin ağ yaşam süresi üzerinde doğrudan ve dramatik bir etkisi vardır. İletim gücü kontrolü konusunda literatürde daha önce yapılmış bir çok çalışma bulunmaktadır [4,5,31–33]. En fazla enerji tüketimi iki düğüm arasındaki haberleşme sırasında yaşandığı için [1], optimum yönlendirme teknikleri [11–13, 20], veri kümelenmesi [17] ve farklı bir çok konuda [1], baz istasyonuna doğru yapılan trafiği iyileştirmek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. KAA'ların enerji verimliliğini konu alan bir çok çalışmada düğümlerin iletim gücünü sürekli ölçekte ayarlayabildikleri, yani hedef düğümün uzaklığına göre hesaplanan gücü aynen kullandıkları varsayılmıştır [57–60]. Buna rağmen gerçek hayatta iletim gücünün sürekli ayarlanamadığı, üretim kısıtlamaları nedeniyle sadece önceden belirlenmiş bazı güç seviyelerine karşılık gelen iletim güçlerinin kullanılabildiği bilinmektedir. Hatta bazı durumlarda iletim gücünün değişken olarak ayarlanması tercih edilmemekte, tüm çalışma süresi boyunca bütün düğümler için önceden belirlenen iletim gücü seviyesi kullanılmaktadır [16, 61]. Chipara ve diğerleri, iletim gücünün ve tek atlamalı haberleşmenin uçtan uca etkilerini inceledikleri çalışmada, iletim gücünün bağlantı kalitesini artırarak ve bir paketi iletmek için geçilmesi gereken düğüm sayısını azaltarak paket iletim oranı üzerinde daha büyük etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [62]. Bunun yanında bir paketi daha büyük bir güç seviyesinde göndermenin, iletebilecek paket miktarında azalma, iletim kanalında çakışma ve girişimde artma gibi yan etkileri olduğu saptanmıştır.

Heinzelman, Chandrakasan ve Balakrishnan [28]'de alıcı ve verici düğüm arasındaki mesafeye bağlı olarak iletim gücünün sürekli ölçekte ayarlanabildiği bir radyo modeli önermişlerdir. Daha sonra yapılan bir çok çalışmaya temel teşkil eden bu model, bu çalışmada yeniden tasarlanarak ayırık güç kullanımının ve ayrıştırma kullanılan seviyelerin etkilerini incelemek amacıyla bazı ufak değişiklikler ile ayırık bir radyo modeline dönüştürülmüştür.

Diğer taraftan, alıcı ve verici düğüm arasında veri iletmek için kullanılması gereken güç miktarı iki düğüm arasındaki mesafeye bağlı olup bu mesafe pratikte tam doğrulukla ölçülememektedir. Bununla birlikte mesafenin ancak

belli bir pozisyonlama hatası çerçevesinde tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. Konum belirleme ve maksimum pozisyonlama hatası konusunda literatürde bir çok çalışma bulunmaktadır [47–50]. Bu çalışmalarda kullanılan farklı yöntemler vasıtasıyla en fazla 10 m. pozisyonlama hatası bildirilmiştir. Örneğin [47]'deki deneysel sonuçlar, alınan sinyal seviyesi göstergesi (received signal strength indicator - RSSI) kullanılarak 2m.'nin altında pozisyonlama hatası elde edildiğini göstermektedir. Yön değiştirebilen anten kullanılarak [48]'de pozisyonlama hataları 80 cm'nin altına düşürülmüştür. [49]'da pozisyonlama hataları 4-9 m. aralığında iken [50]'de hesaplanan mesafelerin %68'i 1 m.'den az, %89'u da 2m. sınırları içerisinde kalmıştır. Dolayısı ile bu çalışmada pozisyonlama hatalarının etkileri incelenirken 0-10 m. aralığı dikkate alınmıştır.

Diğer yandan KAA'larda iki düğüm arasındaki bağlantının kalitesi; yol kaybı katsayısı, kanalın gölgeleme değişkeni, modülasyon ve kodlama gibi pek çok radyo ve kanal parametresine bağlıdır. Bağlantı kalitesi konusu farklı metrikler kullanılarak günümüze dek bir çok çalışma [63–68] kapsamında incelenmiştir. Benzer şekilde yol kaybı konusu da farklı çalışmalarda [69–73] ele alınmıştır. [69]'da kullanılan yol kaybı modeli, KAA'ların gerçek hayatta kullandıkları haberleşme karakteristiğine oldukça benzemekle birlikte haberleşme sırasındaki olasılıksal durumları da modelleyebilmektedir. Bu nedenle söz konusu etkilerin ve olasılıksal durumların göz önüne alınabilmesi için bahsi geçen yol kaybı modeli, bu tez çalışmasına adapte edilmiştir.

Günümüze kadar çalışılmış olan güç atama yöntemleri üç ana grup altında toplanabilmektedir: ağ genelinde yapılan atama, düğüm bazında yapılan atama ve düğümler arasındaki bağlantı bazında yapılan atama [74]. Daha hassas şekilde yapılan güç atamasının enerjisi daha verimli kullanacağı ve böylece ağ yaşam süresini arttıracığı bilinirken farklı güç atama yöntemlerinin ağ yaşam süresi üzerindeki net etkileri halen belirsizliğini korumaktadır. Bu çalışmada önerdiğimiz yapı, hem bahsedilen etkinin ölçülmesini, hem de farklı stratejilerin sistematik olarak karşılaştırılmasını sağlayacaktır.

Vales-Alonso ve arkadaşları, MAC katmanında önerdikleri iletim gücü kontrol mekanizmaları ile enerji tüketimindeki tasarruf oranını incelemişlerdir [21]. 26 farklı güç seviyesinin kullanıldığı çalışmada %20'ye varan oranlarda enerji tasarrufunun sağlanabildiği gösterilmiştir.

Mallinson, Drane ve Hussain, gerçek radyo donanımlarındaki iletim maliyetlerinde

ayrık güç seviyeleri kullanımının etkilerini incelemiş [22], iletim menzili arttığında maliyetlerin her zaman artmadığı ortaya konulmuştur. Yapılan deneylerde MICA2 düğümlerinde de yer alan ve 8 ayrı güç seviyesine sahip CC2420 yongası kullanılmıştır. Farklı mesafeler ve güç seviyeleri için RSSI ölçülmüş ve paket alma oranı (packet reception rate - PRR) hesaplanmıştır. Çalışmada paket büyüklüklerinin artmasının hata olasılığını arttırdığı ve bu durumun ağ kalitesini düşürdüğü sonuçları elde edilmiştir.

Bu çalışmada farklı güç atama stratejilerinin karşılaştırıldığı bölümde [21,22]'deki deneysel sonuçlardan faydalanılmıştır.

Sun ve Shayman, [75]'te ayarlanabilir bir güç kontrol mekanizması önermiştir. Ağın, merkezde yer alan bir baz istasyonu ve etrafında rastgele yerleştirilen düğümlerden oluşan ve uzaklıklarına göre belirlenen katmanlardan oluşacak şekilde yerleştiği, tüm düğümlerin başlangıç enerjilerinin ve veri üretim hızlarının eşit olduğu varsayılmıştır. Çalışma sonunda her düğümün baz istasyonuna doğrudan erişebildiği durumda, optimum sonucu almak için tüm düğümlerin baz istasyonuna ya doğrudan erişmesi ya da bir iç katmandaki düğüm üzerinden erişmesi gerektiği belirlenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar, sadece merkeze daha yakın olan katmanların iletim gücünü ayarlayabildiği durumda bile modelin uygulanabildiğini ve sonuçları önemli derecede etkilediğini göstermiştir.

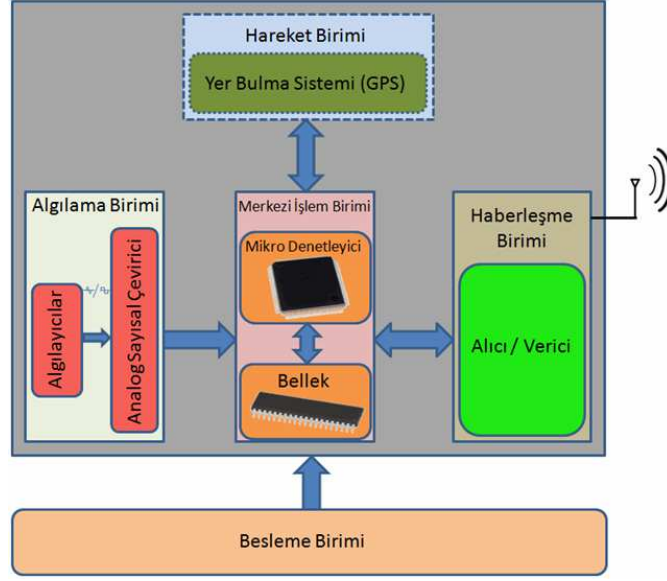
Bildiğimiz kadarıyla güç kontrolü konusunda bahsi geçen çalışmalar içerisinde sadece [75] ayrık güç seviyesi kullanımını doğrusal programlama ile incelemiştir. Bu çalışmada tasarlanan farklı matematiksel programlama (MP) modelleri yardımıyla iletim gücü kontrolü; ayrık güç seviyeleri, pozisyonlama hataları, kayıplı olasılıksal yol modeli ve farklı güç atama stratejileri açısından ele alınmıştır.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

3.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlar

Kablosuz algılayıcı ağ (KAA)'lar ilk olarak askeri uygulamalar ile ağır sanayi sistemlerinde kullanılmış ve KAA'lara benzeyen ilk kablosuz ağ, 1950'li yıllarda Amerikan ordusunun Sovyet denizaltıları izlemek için kullandığı "Sound Surveillance System (SOSUS) [76]" olmuştur. Bu amaçla Atlantik ve Pasifik okyanuslarında akustik sensörler ve bu sensörlerden gelen bilgileri toplayan hidrofonlar kullanılmıştır. Bu teknoloji günümüzde halen kullanılmaktadır.

Bunu takiben 1960 ve 1970'li yıllarda Amerikan Gelişmiş Savunma Araştırma Projeleri Birimi (DARPA), günümüzde kullanılan İnternet teknolojisi donanımını geliştirmek için gerekli yatırımları yapmış, 1980 yılında ise Ayrık Algılayıcı Ağlar (Distributed Sensor Networks - DSN) programını başlatmıştır. Böylece KAA'lar ile ilgili araştırmalar DSN programı ile resmi olarak başlamış, Carnegie Mellon ve MIT gibi üniversitelerin işbirliği ile akademik camiaya tanıtılmıştır. Bu esnada Amerikan Gelişmiş Araştırma Projeleri Birimi Ağı (ARPANET)'nin üniversiteler ve araştırma enstitülerindeki 200 istemci tarafından bir kaç yıldır kullanıldığı bilinmektedir. Her ne kadar DSN tasarımcıları tasarım vizyonunu belirlemiş olsalar da o dönemde teknolojinin henüz hazır olmaması, özellikle algılayıcıların büyük olması DSN'lerin potansiyel uygulama alanlarını kısıtlamıştır. Ayrıca ilk DSN'ler ağ katmanında kablosuz teknolojileri kullanmamıştır. İlerleyen yıllarda hesaplama, haberleşme ve mikroeletromekanik teknolojideki gelişmeler KAA araştırmalarına ciddi bir yönelime neden olmuş, araştırmaları esas vizyonuna yaklaştırmıştır. 1998 yılında bu araştırmalarda yeni bir akım başlamış ve uluslar arası katılım hızla artmıştır. Yarı iletken, ağ ve malzeme bilimi teknolojilerindeki son gelişmeler sayesinde algılayıcı ağların boyutları küçülmüş ve fiyatları düşmüş, böylece bir çok sivil uygulamada da kullanılır hale gelmiştir. [77]



Şekil 3.1: Algılayıcı Düğüm Birimleri

Üstlendikleri misyon itibariyle KAA'lar, bir veya daha fazla baz istasyonu ve bu baz istasyonuna topladıkları bilgileri gönderen algılayıcı düğümlerden oluşan, buldukları ortamdaki bazı fiziksel büyüklükleri (sıcaklık, nem, basınç, ışık miktarı, v.b.) algılayıcılar vasıtasıyla ölçebilen, kısa haberleşme mesafesine, sınırlı işlem gücü ve küçük boyutlara sahip, genellikle düşük güç tüketimine ve düşük maliyete sahip olması beklenen sistemlerdir.

Bir algılayıcı düğüm donanımı, genellikle merkezi işlem birimi (MİB), haberleşme birimi, algılama birimi ve besleme birimi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Hareket etme yeteneğine sahip olan düğümlerde beşinci bir birim daha bulunabilmektedir. Hareket birimi olarak adlandırılan bu birimde genellikle bir yer bulma sistemi (Global Positioning System - GPS) bulunmaktadır. Bahsi geçen birimler ve birbirleriyle etkileşimleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

3.1.1 Kablosuz Algılayıcı Ağ Donanım Birimleri

3.1.1.1 Algılama Birimi

Bu birim, çeşitli fiziksel büyüklükleri ölçen algılayıcılar ve algılayıcılardan gelen analog veriyi mikro denetleyicinin anlayabileceği sayısal veriye çeviren Analog/Sayısal Çeviricilerden (Analog Digital Converter - ADC) oluşmaktadır.

Bazı durumlarda doğrudan mikro denetleyiciler üzerinde bulunabilen ADC'ler kullanılabilir. Günümüzde kullanılan algılayıcılar vasıtasıyla ölçülebilen başlıca büyüklükler aşağıda sıralanmıştır [78]:

- Sıcaklık
- Nem
- İvme
- Basınç
- Işık
- Sismik hareketler
- Bir nesnenin hızı, boyutu, yönü
- Elektromanyetik alan
- Resim
- Ses
- Toprağın bileşimi

3.1.1.2 Merkezi İşlem Birimi

Merkezi işlem birimi (MİB), algılayıcı düğüm üzerinde veri alışverişini ve bellek yönetimini sağlayan, aynı zamanda tüm birimleri yöneten bir mikro denetleyici ve kullanılan verilerin saklandığı bir miktar bellekten oluşmaktadır. İşletim sistemini barındıran mikro denetleyicinin yükümlülükleri kaynakları yönetmek, çevresel birimleri kontrol etmek ve uygulamaları çalıştırmaktır. Diğer düğümler ile yapılan haberleşme ve bu haberleşmede meydana gelen veri transferi MİB tarafından yönetilmekte, algılayıcıdan veya ADC'den gelen veriler alınıp işlenmektedir. Gerektiği durumlarda mevcut veriler ışığında değerlendirme yapıp düğüm davranışı belirlenmektedir. Bu esnada ihtiyaç duyulan veriler bellekte saklanmaktadır. Hareket birimine sahip düğümlerde yer bulma sistemi ile veri alışverişi yapılmakta, gerekli hallerde düğüm konumuna göre davranış şekline karar verilmektedir.

3.1.1.3 Haberleşme Birimi

Haberleşme birimi, genellikle aynı yonga içerisinde yer alan bir Alıcı/Verici devre ile antenden meydana gelmektedir. Alıcı/verici olarak sıklıkla düşük frekanslarda çalışan ve kullanılan sinyal gücünü gösteren "Radyo Sinyal Gücü Göstergesi"ne (RSSI) sahip CC1000 ve TR1000 yongaları kullanılmış, son zamanlarda bu cihazların yerini yeni nesil üretim olan ve düğümler arasındaki bağlantı kalitesini gösteren Bağlantı Kalite Göstergesine (Link Quality Indicator - LQI) sahip CC2420 ve EM2420 yongaları almıştır.

3.1.1.4 Besleme Birimi

Algılayıcı düğümde yer alan tüm elektronik bileşenlerin ihtiyacı olan besleme gerilimini sağlayan birimdir. Genelde 2 adet AA pil tercih edilmekle birlikte pillerin ürettikleri gerilim 2.0 V ile 3.2 V arasında değişebilmektedir. Şarj edilebilen piller ile alkalın pillerin bir çoğunda üretilen gerilim 1.2 V'un altına düşmektedir. Düğümde bulunan mikro denetleyici besleme aralığı genelde 2.7 V ile 5.5 V, alıcı/verici devre besleme aralığı ise 2.1 V ile 3.6 V olup tipik değer 3.0 V'tur. Bu nedenle tüm bileşenlerin kullanabileceği besleme değeri 3.0 V olarak belirlenmiş olup bu değeri sağlayabilmek için besleme biriminde bir regülatör devre kullanılmaktadır.

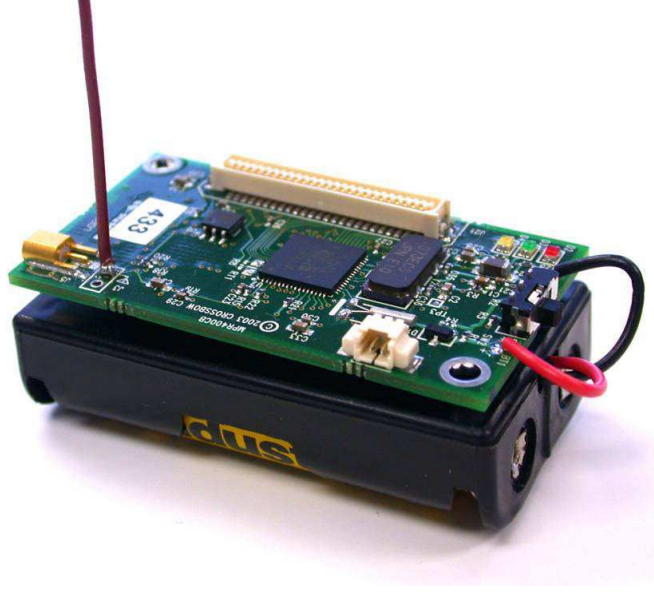
3.1.1.5 Hareket Birimi

Sadece bazı düğümlerde yer alan bu birimde düğümün konumunu belirlemeye yarayan yer bulma sistemi (GPS) bulunur. Özellikle gezici düğümler kullanılan uygulamalarda bu birime ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışmaya konu olan örnek Mica2 donanımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir [79].

3.1.2 Kablosuz Algılayıcı Ağ Karakteristikleri

KAA'ları plansız (ad hoc) ağlardan ayıran karakteristik özellikleri aşağıda sıralanmıştır [80]:



Şekil 3.2: Örnek Mica2 düğüm donanımı

- Algılayıcı düğümler hataya eğilimlidir.
- Ağ içerisindeki dağılım yoğundur.
- Topoloji sık sık değişebilir.
- Düğüm sayıları yüksektir.
- Veri işleme ve güç yetenekleri sınırlıdır.
- Global eşsiz bir kimlikleri olmayabilir.

3.1.3 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Tasarım Kısıtları

KAA'ların tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar aşağıda sıralanmıştır [80]:

Donanım Kısıtları: Şekil 3.1'de gösterilen algılama, merkezi işlem, haberleşme ve besleme birimlerinin tümü oldukça kısıtlı güç tüketecek biçimde ve küçük hacimlerde bir araya getirilmelidir.

Üretim Maliyeti: Tek bir düğümün maliyeti bahsedilen özellikler sağlanacak şekilde oldukça düşük olmalıdır. İdeal olarak 1 \$'ın altında fiyatlar hedeflenmektedir.

Hata Toleransı: Her düğüm beklenmeyen hatalara eğilimli olduğu için bir düğümün servis dışı kalması tüm topolojinin çalışmasına engel olmayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Ölçeklenebilirlik: Toplam düğüm sayısı ortalama 100 ile 1000 arası olduğu için kullanılan protokol bu ölçeğe çıkabilmeli ve bu tür yoğun ağların avantajlarını kullanabilmelidir.

Çevresel Faktörler: Sıcaklık, nem, hareket, sualtı ve yeraltında kullanılma gibi çevresel etkiler göz önüne alınmalıdır.

İletim Ortamı: Kızıl ötesi, radyo frekansı, optik ve akustik ortamlarda çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Güç Tüketimi: Algılama, haberleşme ve veri işleme sırasında güç tüketimi minimum olmalıdır.

Bu faktörler göz önüne alındığında kısıtlar iki başlık halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kaynak kısıtları
 - Kısıtlı enerji
 - Kısa haberleşme mesafesi
 - Düşük bant genişliği
 - Kısıtlı işlem yapabilme yeteneği
 - Kısıtlı depolama
- Dizayn kısıtları
 - Uygulama bağımsız olma
 - Çevreden bağımsız olma
 - * Ağ büyüklüğü, düğüm sayısı
 - * Yerleştirme stratejisi
 - * Ağ topolojisi

3.1.4 Kablosuz Algılayıcı Ağ Çeşitleri

Kullanım amaçlarına göre kablosuz algılayıcı ağ çeşitleri ve bu tipteki ağların başlıca özellikleri aşağıda sıralanmıştır [80]:

- Karasal Kablosuz Algılayıcı Ağlar
 - En çok kullanılan KAA çeşididir.
 - Plansız (ad hoc) veya önceden planlanıp kurulan ağlardır.
- Yeraltı Kablosuz Algılayıcı Ağlar
 - Planlı kurulan ağlardır.
 - Kullanılan ekipmanlar, bakımı ve yönetimi daha pahalıdır.
- Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlar
 - Seyrek bir dağıtıma sahiptir, daha az düğüm kullanılır.
 - Karasal ağlardan daha pahalıdır.
 - Akustik dalga haberleşmesi kullanır.
- Çoklu Ortam Kablosuz Algılayıcı Ağlar
 - Kameralar ve mikrofonlar ile donatılmış algılayıcı düğümlere sahiptir.
 - Yüksek bant genişliği / düşük enerji, servis kalitesi, filtreleme, veri işleme ve sıkıştırma teknikleri kullanılır.
- Hareketli Kablosuz Algılayıcı Ağlar
 - Her düğümde kendisini yeniden konumlandırma ve organize yeteneği vardır.
 - İlk yerleştirildiği bölgeden başlayıp bilgi toplamak için alana dağılan düğümler kullanılır.

3.1.5 Kablosuz Algılayıcı Ağların Uygulama Alanları

Teknolojik, elektronik ve mekanik sistemlerdeki gelişmelere bağlı olarak 1990'lı yıllarda popüler bir araştırma alanı haline gelen ve günümüzde pek çok alanda

yaygın olarak kullanılmaya başlanan kablosuz algılayıcı ağların başlıca uygulama alanları şunlardır [55]:

- Daha çok savunma sanayi ağırlıklı askerî uygulamalar
- Güvenlik ve gözetim uygulamaları
- Çevresel takip ve gözlem uygulamaları
- Medikal takip ve tıbbî izleme (Vücut Alan Ağları) gibi sağlık uygulamaları
- Hassas tarım, araç trafik yönetimi gibi endüstriyel uygulamalar
- Otomasyon ve akıllı ev uygulamaları
- Felaket algılama
- Tedarik zinciri yönetimi gibi ticari uygulamalar

3.1.6 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Araştırmaya Açık Konular

Kablosuz algılayıcı ağlar oldukça büyük potansiyele sahip ilgi çekici bir konu olmakla beraber günümüzde zor görünen bazı araştırma sorunlarının çözülmesiyle birlikte oldukça ses getirebilecek bir alandır. Halen araştırmaya açık olduğu düşünülen bazı konu başlıkları şu şekildedir [80,81]:

- Kablosuz algılayıcı ağları daha verimli hale getirmek üzere yazılım ve donanım optimizasyonu
- Veri yapısı konusunda performans optimizasyonu ve enerji etkin veri saklama birimleri
- Performans iyileştirme (haberleşme kapasiteleri, ölçeklendirme konuları, farklı katmanlarda protokol optimizasyonları)
- Düğümleri hata öncesi ve sonrasında kontrol edebilecek servisler
- Tüm ağın kapsanması konusunda enerjinin etkin kullanılması ve korunması

- Yapılan saldırıları izleyen, algılayan ve tepki veren protokollerin geliştirilmesi
- Katmanlar arası optimizasyon ve işbirliği
- Adil kullanım (paketlere öncelik atayabilme)
- Kuyruk kullanarak sıkışma kontrolü ve önleyici tedbirler
- Farklı yönlendirme algoritmalarında güvenlik konularının incelenmesi
- Düğümlerin hareketliliği
- Haberleşme güvenilirliğini ve enerji tasarrufunu artırma
- Enerji etkin protokol ve algoritmaların geliştirilmesi
- Mevcut protokollerin iyileştirilmesi

3.1.7 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda İletim Gücü Kontrolü İçin Tasarım Prensipleri

KAA'larda en fazla enerji iki düğüm arasındaki haberleşme sırasında tüketildiği için [1] ağ yaşam süresi açısından iletim gücü kontrolü önemli bir kriter haline gelmiştir. Güç kontrolü; gecikme, enerji tüketimi ve birim zamanda işlenebilen veri miktarı gibi performans ölçütleri için de oldukça önemli bir konudur.

Kullanılan güç seviyesi, ağın çalışmasını bir çok yönden etkilemektedir [16]:

- İletim gücü seviyesi alıcı tarafında elde edilen sinyalin kalitesini belirlemede, dolayısıyla güç kontrolü fiziksel katmanı etkilemektedir.
- Güç kontrolü iletim yapılan mesafeyi belirlemede, bu nedenle ağ katmanını etkilemektedir.
- Güç kontrolü diğer alıcılar için ortaya çıkan girişimin miktarını belirlediği için iletim katmanı etkilenmektedir.
- Güç kontrolü tüm sistemin genel performansı üzerinde çok boyutlu bir etkiye sahiptir.

- Güç seviyeleri; ortam kullanımı için çekişme, iletim menzili içerisindeki düğüm sayısına bağlı olduğu için MAC performansını etkilemektedir.
- Güç seviyesi seçimi ağdaki tüm düğümlere erişilebilirliği etkilemektedir.
- Güç seviyesi seçimi ağın veri işleme kapasitesini belirlemektedir.
- Güç seviyesi seçimi hedef düğüme ulaşmak için atlanması gereken düğüm sayısını etkilemektedir.

Bu etkiler göz önüne alınarak güç kontrolü konusunda aşağıdaki tasarım kriterleri belirlenmiştir [16]:

1. Ağın kapasitesini arttırmak için iletim gücü seviyesini düşürmek idealdir.
2. Güç seviyesinin düşürülmesi MAC katmanındaki ortalama çekişmeyi azaltmaktadır.
3. Güç kontrolünün toplam enerji tüketimi üzerindeki etkisi donanımın enerji tüketim örüntüsüne bağlıdır.
4. Ağdaki trafik miktarı yüksek olduğunda düşük güç seviyeleri daha az uçtan uca gecikme sağlarken düşük trafik yüklerinde daha yüksek güç seviyeleri tercih edilmelidir.
5. Güç kontrolü ağ katmanı problemi olarak ele alınmalıdır.

3.1.8 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Optimizasyon Yöntemleri

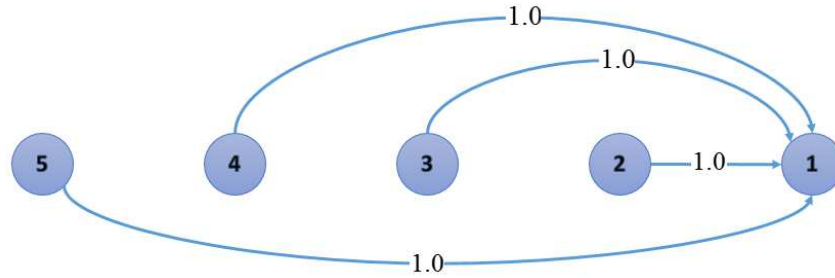
KAA'larda temel amaç algılayıcı düğümlerde toplanan verileri optimum şekilde baz istasyonuna aktarmaktır. Bunun için bir çok çalışmada ağ yaşam süresi veya toplam enerji tüketimi optimize edilmiştir. Ergen ve Varaiya, [2]'de kablosuz KAA'larda enerji verimliliği için iki farklı yönlendirme modeli üzerinde çalışmış, ilk modelde düğümlerin minimum ağ yaşam süresinin en büyük değerinin, ikinci modelde ise harcanan toplam enerjinin en küçük değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Toplam enerji sarfiyatının en aza indirilmesinin, ağ yaşam süresini optimize etmek için yeterli olmadığı, aynı zamanda enerjinin düğümler

bazında dengeli tüketilmesi gerektiği ortaya konulmuştur. Çok atlamalı veri akışı vasıtasıyla yapılan iletimin toplam enerji tüketimini düşürdüğü gözlenmiştir. Sonuçta belirtildiği üzere toplam enerji sarfiyatını minimize etmek, ağ yaşam süresi optimizasyonu ile eşdeğer değildir.

Bu nedenle bu çalışmada enerji optimize edilirken ağda en fazla enerji tüketen algılayıcı düğümün enerji sarfiyatını minimize etme yoluna gidilmiştir. Bu yöntem ağ yaşam süresi optimizasyonu ile eşdeğer olup her iki yöntemde de enerjinin minimum ve dengeli tüketilmesi amaçlanmıştır. Başka bir deyişle veri akışlarının optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu amaca ulaşabilmek için düğümlerin birbirleriyle yardımlaşması gerekmektedir. Zira [2]'de de gösterildiği gibi daha önce yapılan benzer çalışmalar çok atlamalı iletimin direkt iletme kıyasla enerji tasarrufu bakımından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

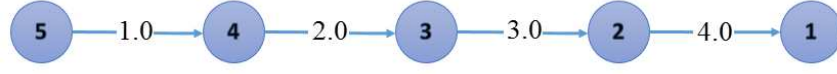
Veri akışı optimizasyonunun daha iyi anlaşılabilmesi için tek atlamalı ve çok atlamalı iletim konusunu örneklerle açıklamak faydalı olacaktır. Verilen tüm örneklerde KAA, dört algılayıcı düğüm ve bir baz istasyonundan (1 no'lu düğüm) oluşmaktadır. Düğümler arasındaki mesafeler eşittir. Her düğüm eşit miktarda veri (1 birim) üretmektedir. Akışlar üzerinde gösterilen değerler birim veri miktarını göstermektedir. Bir düğüme giren veri miktarı ile düğümde üretilen veri miktarının toplamı düğümden çıkan veri miktarına eşittir.

Tek atlamalı doğrudan iletme örnek Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu örnekte düğümler arası yardımlaşma bulunmamakta, tüm düğümler verilerini doğrudan baz istasyonuna göndermektedir. İletim sırasında tüketilen enerji hedef düğümün uzaklığı arttıkça artacağı için baz istasyonuna en uzak düğüm konumundaki 5 no'lu düğüm, iletim sırasında en fazla enerjiyi harcamakta, dolayısıyla enerjisini diğerlerinden önce tüketmekte ve ideal olmayan bir durum ortaya çıkmaktadır.



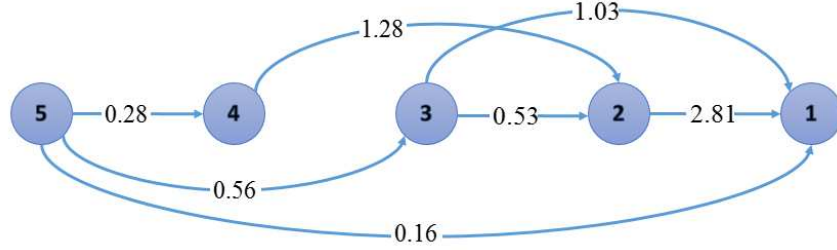
Şekil 3.3: Tek atlamalı doğrudan iletim

Şekil 3.4'te, tek atlamalı dolaylı iletme örnek gösterilmiştir. Bu kez her düğüm



Şekil 3.4: Tek atlamalı dolaylı iletim

kendi enerji kısıtlarını göz önüne alarak iletimi kendisine en yakın düğüme yapmaktadır. Bu durumda 2 no'lu düğüm, diğer algılayıcı düğümlerden gelen verileri de aktardığı için en fazla enerjiyi harcayacaktır. Dolayısıyla diğer düğümlerden önce enerjisi tükenecek ve yine verimsiz bir tüketim modeli ortaya çıkacaktır.



Şekil 3.5: Çok atlamalı iletim

Daha önceki çalışmalarda doğrulandığı üzere en ideal veri akışı çok atlamalı iletimde gerçekleşmektedir. Şekil 3.5'teki örnek, çözülmüş gerçek bir problemten alınmıştır. Bu iletim şeklinde düğümler bir taraftan enerji sarfiyatını azaltmaya çalışırken, diğer taraftan tüketimi kendi aralarında dengeli şekilde dağıtmaya çalışmaktadır. Her iki durumun da sağlanabilmesi için düğümlerin çoklu atlama yöntemini akıllıca kullanmaları ve gerekirse verilerini bölerek birden fazla düğüme göndermeleri gerekmektedir. Bu ideal durumun bulunması ise matematiksel programlama ile mümkün olmaktadır.

3.2 Matematiksel Programlama (MP)

Matematiksel programlamanın temeli optimizasyona dayanmaktadır. Optimizasyon; matematik, bilgisayar bilimleri, işletme, ekonomi ve endüstri mühendisliği gibi bir çok disiplinde kullanılan, elde edilecek kârı maksimize, ortaya çıkacak maliyeti minimize ederek kısıtlı kaynakları mümkün olan en verimli şekilde tahsis etmeyi sağlayan oldukça önemli bir yöntemdir. Günümüzde endüstriyel planlama, kaynak tahsisi, çizelgeleme ve karar alma mekanizmaları gibi bir çok konuda optimizasyon tekniklerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Örneğin bir fabrikada forkliftler vasıtasıyla taşınan paletlerin optimum şekilde hangi sırayla ve hangi yollar takip edilerek yerleştirilmesi gerektiği konusu bir optimizasyon problemidir. Bu problemin çözümünde minimum maliyet modeli kullanılmalıdır. Benzer şekilde üretim yapan bir firmanın hammaddeyi nereden alacağı, hangi tesisinde hangi makinelerle nasıl işleyeceği, ürettiği ürünleri kimlere ve hangi fiyattan satacağı, sattığı ürünleri nasıl transfer edeceği konusu başka bir optimizasyon problemidir. Bu problemin çözümü için bu kez maksimum kâr modeli kullanılmalıdır.

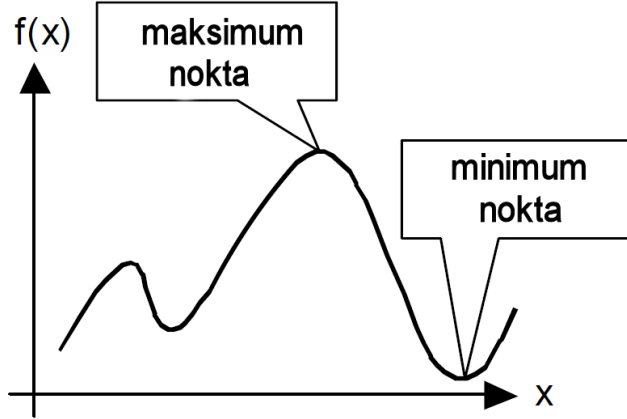
Günümüzde kullanılan büyük ölçekli optimizasyon tekniklerinin kökeni II. Dünya Savaşı'na kadar uzanmaktadır [82]. Savaş esnasında milyonlarca asker ve teçhizata sahip büyük orduların lojistik problemlerini çözmek için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Savaşta ortaya konulan çabayı daha verimli hale getirecek her türlü tekniğe ihtiyaç duyulmuştur. Geniş ölçekli optimizasyon tekniklerinin temelini oluşturan ilk optimizasyon uygulaması olan simpleks metodu George Dantzig tarafından savaş sırasında (1947) geliştirilmiştir. Savaştan sonra ilk bilgisayarların kullanılmaya başlaması ile yöntem daha da iyileştirilmiş, daha anlamlı hale gelmiştir. Bilgisayarların kullanılmaya başladığı ilk yıllarda bilgisayarlarda çalışan hesaplamaların büyük bir kısmı simpleks metoduna ayrılmıştır.

MP, bir çok alternatif içerisinde sistematik olarak en iyi çözümü bulmayı sağlamaktadır. En basit haliyle, izin verilen küme içerisinde değişkenleri seçmek suretiyle bir reel fonksiyonu minimize veya maksimize etmeyi ve fonksiyonun değerini bulmayı mümkün kılmaktadır. Kullanılan tekniklere göre doğrusal programlama (DP), doğrusal olmayan programlama, tamsayı programlama (TP), konveks programlama, dinamik programlama gibi alt dallara ayrılmaktadır. Chinneck, [82]'de yer alan notlarında MP ve bazı alt dallarını oldukça faydalı biçimde özetlemektedir. Takip eden alt bölümlerde bu notlardan faydalanılarak bu tez çalışmasında kullanılan doğrusal programlama ve tamsayı programlama anlatılacaktır.

3.2.1 Doğrusal Programlama (DP)

Kısıtsız basit bir optimizasyon probleminde hedef, bir amaç fonksiyonu üzerinde maksimum veya minimum noktayı bulmaktır (Şekil 3.6). Optimizasyonun söz konusu olması için birden fazla çözüm olmalıdır. Şekil 3.6'da fonksiyon üzerindeki

her nokta bir çözümlü ifade etmektedir. Tek bir reel değişken olduğu için sonsuz sayıda çözümlü mevcuttur. Bu aşamada optimizasyon ise bu çözümlü içerisinden en iyisini seçmektir.



Şekil 3.6: Kısıtsız basit bir optimizasyon problemi

Kısıtlara sahip çoğu optimizasyon probleminde kısıtlar ve amaç fonksiyonu doğrusal olduğu için problemler DP sınıfına girmektedir. Kısıtlara sahip optimizasyon türü, kısıtsız olana göre nispeten daha zordur çünkü bu kez en iyi çözümlü bulunmaya çalışırken aynı anda bir takım kısıtlara da riayet edilmek durumundadır.

Kısıt bulunan optimizasyon problemlerinde dört temel eleman vardır:

- **Değişkenler:** Karar değişkenleri olarak da isimlendirilir. Değişkenlerin değerleri problemin başlangıcında bilinmemektedir. Genelde ayarlanabilen veya kontrol edilebilen şeyler için kullanılır. Örneğin mamüllerin üretilme hızı gibi. Hedef amaç fonksiyonunun en iyi değerini veren değişkenlerin değerlerini bulmaktır.
- **Amaç Fonksiyonu:** Amacı ifade etmek için kullanılan ve değişkenler kullanılarak tanımlanan matematiksel fonksiyondur. Örneğin üretimdeki kâr bir amaç fonksiyonudur. Amaç fonksiyonu çalışma sonucunda maksimize veya minimize edilmelidir.
- **Kısıtlar:** Mevcut çözümleri limitleyen ve değişkenler kullanılarak tanımlanan matematiksel ifadelerdir. Örneğin üretim sırasında bazı makineleri sadece belli işçilerin kullanabilmesi veya günlük kullanılacak en fazla hammadde miktarı birer kısıttır.

- **Değişken Sınırları:** Çok nadir durumlarda, kullanılan değişkenler $-\infty, +\infty$ arasında değer alabilir. Genelde değişkenler sonlu sınırlara sahiptir. Örneğin üretimde kullanılan bir makineden çıkabilecek ürün sayısının 0 ile 1000 arasında olması gibi.

DP’de amaç fonksiyonunda kullanılan tüm değişkenler ve tanımlanan tüm kısıtlar doğrusaldır. Kısıt bulunan çoğu optimizasyon problemi bu kriterleri sağladığı için DP ile modellenebilmektedir. DP, gerçek hayattaki problemleri modellemek için oldukça basit görünmesine rağmen çok geniş bir alanda uygulanmaktadır. Bir çok üretim probleminin modellenmesi için doğrusal ilişkiler yeterli olmaktadır. Çoğu yönlendirme problemi doğrusaldır. Düzenli olarak çözülen en büyük kısıtlara sahip optimizasyon problemlerinde DP kullanılmaktadır. Örneğin hava yolu çizelgeleme problemleri yüzbinlerce kısıta ve milyonlarca değişkene sahiptir. Elbette doğrusal programlamanın uygun olmadığı problemler de mevcuttur. Bu tür problemlerin çözümünde kullanılan yöntemlerden biri olan tamsayı programlama Bölüm 3.2.2’de anlatılmıştır.

Bir doğrusal programlama modelinde yer alan tüm fonksiyonların doğrusal olması şarttır. Bir $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ fonksiyonunun doğrusal olması demek, bir (x_1, x_2, \dots, x_n) değişken kümesine sadece bir sabitler seti (c_1, c_2, \dots, c_n) ile bağlı olması demektir.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (3.1)$$

Buna göre örneğin $f(x_1, x_2) = 7x_1 - 2x_2$ fonksiyonu, x_1 ve x_2 ’nin doğrusal bir fonksiyonudur. Ancak $f(x_1, x_2) = 5x_1^3 \cdot x_2$ fonksiyonu doğrusal değildir.

$$c^T x = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (3.2)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (3.3)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad (3.4)$$

...

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (3.5)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \quad (3.6)$$

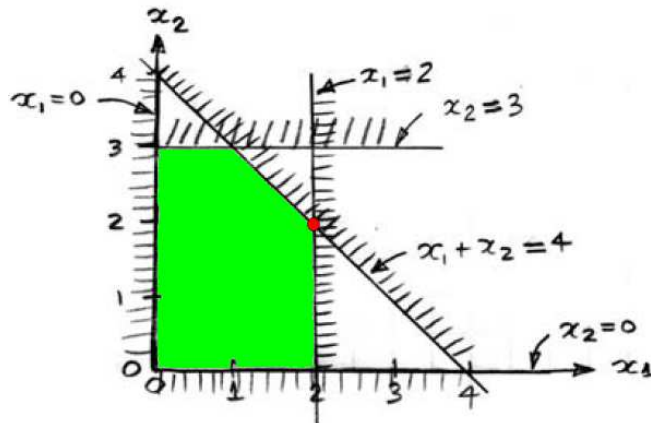
Şekil 3.7: Standart doğrusal programlama modeli.

Genel bir doğrusal programlama modeli Şekil 3.7’de verilmektedir. Burada c reel

sayılardan oluşan n -boyutlu sabit vektörünü, x n -boyutlu reel sayılardan oluşan değişken vektörünü, a $m \times n$ boyutunda eşitsizliklerde kullanılan reel sayılardan oluşan sabit matrisini, b ise m -boyutlu reel sayılardan oluşan sabit vektörünü ifade etmektedir. T bir matrisin transpozisini ifade etmektedir. Modelde m adet kısıt bulunmaktadır. Amaç, (3.2) nolu denklemde tanımlanan amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize etmektedir.

Daha iyi anlaşılması açısından DP bir örnekle açıklanacaktır. Bir üretim hattında x_1 ve x_2 mamülleri üretilmektedir. x_1 mamülünden günlük en fazla 2 adet, x_2 mamülünden günlük en fazla 3 adet üretilmektedir. Her iki ürün de ortak kullanılan bir sonlandırma bandından geçmek durumundadır ve bu bandın günlük kullanım limiti 4'tür. x_1 mamülünden günlük elde edilebilen kâr 15 TL iken x_2 mamülü için 10 TL'dir. Bu üretim hattından elde edilebilecek günlük en yüksek kârın hesaplanması için gerekli sistem modeli aşağıdaki gibidir:

- Değişkenler: x_1, x_2
- Değişkenlerin pozitif olma kısıtı: $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$
- Birinci mamül üretim kısıtı: $x_1 \leq 2$
- İkinci mamül üretim kısıtı: $x_2 \leq 3$
- Sonlandırma bandı üretim kısıtı: $x_1 + x_2 \leq 4$
- Amaç fonksiyonu: $K = 15x_1 + 10x_2$



Şekil 3.8: Örnek DP problemi için çözüm bölgesi ve optimum çözüm

Optimum kâr hesaplanabilmesi için amaç fonksiyonunun maksimize edilmesi gerekmektedir. Problemin mümkün olan çözüm bölgesi Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Yeşil ile taralı alan çözüm bölgesini göstermektedir. Yani bu alan içerisindeki her çözüm mümkündür. Ancak bunlardan en iyi çözümü veren yani günlük en yüksek kâr sağlayan sadece bir nokta vardır, o da kırmızı ile işaretli olan optimum noktadır. Zira problem çözüldüğünde $x_1 = 2$ ve $x_2 = 2$ için günlük maksimum kâr $K = 50 TL$ olarak bulunmaktadır.

3.2.2 Tamsayı Programlama (TP)

Daha önce incelenen DP modellerinde tüm değişkenler 1.453 veya 26.16 gibi reel değerler alabilmektedir. Ancak gerçek hayatta bazı modellerdeki değişkenler sadece tamsayı değerlere sahip olmakta ve TP ile çözülmektedir. Örneğin bir takım 6 veya 11 kişiden oluşabilirken 5.6 kişiden oluşması mümkün değildir. Benzer şekilde bir transistör, silikon dioksit veya galyum arsenidenden yapılabilirken bir takım karışımlardan üretilmesi mümkün değildir. İkili değişkenler ise tamsayı değişkenlerin 0 veya 1’lerden oluşan bir alt kümesidir.

Bu konuda karşılaşılan genel hatalardan birisi; TP çözümüne, DP çözümündeki reel değişkenlerin en yakın tamsayı değerlere yuvarlanması ile elde edilen tamsayı değişkenleri kullanarak ulaşılabileceği kanısındır. Ancak bu durumun doğru olmadığı aşağıdaki örnek ile açıkça ortaya konulmaktadır.

- Değişkenler: x_1, x_2
- Değişkenlerin pozitif olma kısıtı: $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$
- Değişken kısıtları: $x_1 \leq 2$
- Değişken kısıtları: $x_1 + 10x_2 \leq 20$
- Amaç fonksiyonu: $K = x_1 + 5x_2$

Bu örnekte hedef, amaç fonksiyonunu maksimize etmektir. Problemin DP ile çözümü sonrası $K = 11$, $x_1 = 2$ ve $x_2 = 1.8$ bulunmaktadır. TP çözümü için x_2 en yakın tamsayı değere yuvarlandığında $x_2 = 2$ olması gerekirken ikinci değişken kısıtı yüzünden bu mümkün olmamaktadır. Bu durumda x_2 değişkeni 1’e

yuvarlanır ve $K = 7$ elde edilir. Ancak bu çözüm optimum sonucu vermemektedir. Tamsayı değişkenler ile optimum çözüm $x_1 = 0$ ve $x_2 = 2$ için elde edilmekte ve $K = 10$ bulunmaktadır.

TP problemlerinin çözümünde "dallandır, sınırlandır ve buda" benzeri yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemde tamsayı değerlerin tam dökümü yardımıyla bir ağaç oluşturulur, ağacın fazla büyümemesi için çözüme uygun olmayan dallar sınırlandırılır, uygulanması mümkün olmayan dallar ise budanır. Son olarak ağacı genişletmeye son veren bir durma kriterine ihtiyaç vardır. Bu kriter optimum çözümü garanti etmelidir. Aşağıda tamsayı değişkenler ile tanımlanmaya uygun problemlere örnekler verilmiştir:

- Taşınması gereken bir çok kargo paketi için gereken araç sayısını belirlemek bir TP problemidir. Araç sayısı tamsayı değerler alabileceği için değişkenler tamsayıdır.
- Bir yüzme takımındaki üyelerin ve bu üyelerin belli kulaç türleri için tipik tamamlama sürelerinin bilindiği durumda, çeşitli kulaç türlerinden oluşan çok turlu bir yarışmada en iyi toplam süreyi elde etmek için kimlerin hangi turlarda yarışacağını seçmek bir ikili TP problemidir. Her bir turda ekip üyeleri ya dahil edilir ya da dışarıda kalır, DP'deki mantık gibi iki kişiden bir kişi oluşturulup dahil edilemez.
- Bir üniversitede akademisyenleri, sınıfları, dersleri ve öğrencileri çakışma olmadan dağıtma işlemi yine bir ikili TP problemidir. Bir akademisyen aynı anda birden fazla yerde bulunamaz.

Bu örneklerden de anlaşılacağı üzere TP'nin bazı özel durumları mevcuttur. Tüm değişkenlerin sadece 0,1 değerlerini aldığı durum TP'nin bir alt kümesi olup "İkili Tamsayı Programlama (İTP)" olarak isimlendirilmektedir. Benzer şekilde değişkenlerin tamamının veya bir kısmının tamsayı değerleri aldığı, amaç fonksiyonu ve tüm kısıtların doğrusal olduğu durum ise "Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP)" olarak anılmaktadır.

3.2.2.1 İkili Tamsayı Programlama (İTP)

İTP'deki değişkenlerin $\{0,1\}$ değerlerini alması kabul etme/reddetme, bir anahtarı açma/kapama gibi iki durum arasında seçim yapmayı gerektirmektedir. İTP problemlerinin çözümünde bir yöntem Balas algoritması yardımıyla "dallandır, sınırlandır, buda" yaklaşımını kullanmaktır. İTP problemleri aşağıdaki gibi standart bir forma sahiptir:

- Amaç fonksiyonu: *Minimize/MaksimizeEt* $Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$
- m adet kısıt için eşitsizlikler: $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$
- Karar değişkenleri: $x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$
- Amaç fonksiyonu katsayıları: $c_j \geq 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$
- Katsayıların sıralanışı: $0 \leq c_1 \leq c_2 \leq \dots \leq c_n$

3.2.2.2 Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP)

Kullanılan modeldeki karar değişkenlerinin bir kısmının reel bir kısmının tamsayı olması durumunda model Karma Tamsayı Programlama (KTP) olarak isimlendirilmektedir. Eğer amaç fonksiyonu ve kısıtların tamamı doğrusal formda ise bu kez "Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP)" ismini almaktadır. KTDP problemlerinin çözümünde kullanılan algoritmalardan birisi Dakin'in algoritmasıdır. Bu yöntemde problem biraz gevşetilerek tüm değişkenler reel değerler alabileceği gibi düşünülür. Bu sayede amaç fonksiyonunda elde edilebilecek en iyi çözüm bulunarak bu değer "dallandır, sınırla, buda" yaklaşımında sınırlamalar için kullanılır.

KTDP problemleri; iki kısıt arasında seçim yapacak, K adet kısıttan k_1 adedinin sağlanmasına imkan verecek veya ayrık değerlerdeki kısıtlardan aynı anda sadece birisinin doğru olmasını sağlayacak şekilde farklı amaçlarla kullanılabilir. KAA'lar için kullandığımız modellerde bu durum ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

3.3 Faydalanılan Programlar

3.3.1 GAMS Genel Cebirsel Modelleme Sistemi

SETS:	(i, j, k gibi endeks kümeleri) Kullanılacak kümelerin belirtilmesi Küme elemanlarının atanması
Girdiler	(Sabit, parametre, tablo gibi girdiler) Kullanılacak girdilerin belirtilmesi Girdilerin değerlerinin atanması
VARIABLES	(Modelde kullanılacak değişkenler) Kullanılacak değişkenlerin belirtilmesi Değişken tipi atanması (Opsiyonel) Alt / üst sınır, ilk değer veya sabit değer atanması
EQUATIONS	(Modelde kullanılacak denklemler) Kullanılacak denklemlerin belirtilmesi Denklemlerin tanımlanması
MODEL	Modelin ismi Modelde kullanılacak denklemler
OPTIONS	(Opsiyonel) Model opsiyonlarının belirtilmesi Seçilen parametrelerin atanması
SOLVE	model_ismi "using" mp_modeli maximizing/minimizing karar_değişkeni
DISPLAY	(Opsiyonel) Çıktı olarak yazılacak sonuçlar

Şekil 3.9: GAMS kodunun genel formatı

Bu çalışmada ortaya koyduğumuz problemleri modellemek ve numerik analizini yapabilmek için GAMS genel cebirsel modelleme sistemi kullanılmıştır [83]. GAMS, matematiksel programlama ve optimizasyon problemlerinin modellenmesi için yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Kendine ait bir derleyicisi bulunan GAMS içerisinde bir çok yüksek performanslı çözücü bulunmaktadır. DP, TP, İDP, KTDP gibi bir çok problem çeşidi için içlerinde simpleks'in de yer aldığı çözücülerin tam listesine [84]'ten ulaşılabilmektedir.

Bir problemi modellemek için kullanılacak GAMS kodunun genel formatı Şekil 3.9'da verilmektedir [85].

Bu doğrultuda Bölüm 4'te Şekil 4.5'te verilen DP modelini çözmek için oluşturulan örnek GAMS kodu Ek-A'da verilmiştir. Bu kod sayesinde verilen bir bant genişliği ve başlangıç enerjisi kullanılarak elde edilebilen en yüksek ağ yaşam süresi hesaplanmakta, sonuçlar ve kullanılan değişkenler belirtilen çıktı dosyalarına yazılmaktadır.

3.3.2 MATLAB Programlama Dili

MATLAB, MATrix LABoratory kelimelerinin kısaltmasından oluşan, MathWorks firması tarafından geliştirilen, numerik hesaplama, görsel raporlama ve programlama için kullanılan yüksek seviyeli bir programlama dilidir [86]. MATLAB kullanılarak veri analizi yapılabilmekte, algoritmalar geliştirilebilmekte, model ve uygulamalar oluşturulabilmektedir. Sinyal işleme, haberleşme, resim ve video işleme, kontrol sistemleri, hesaplamalı finans gibi bir çok alanda MATLAB yaygın olarak kullanılmaktadır. MATLAB ile matris işleme, fonksiyon ve veri çizme, kullanıcı arayüzü oluşturma ve diğer dillerle yazılmış programlar ile etkileşim oluşturma gibi çok çeşitli işlemler yapılabilmektedir [87]. MATLAB ayrıca C, C++, Java ve Fortran gibi diller ile birlikte kullanılabilir.

MATLAB içerisinde çok güçlü bir grafik çizdirme motoru bulunmaktadır. Bu çalışmada GAMS ile elde edilen numerik sonuçlar MATLAB yardımıyla grafiklere dönüştürülmüştür. MATLAB çok çeşitli grafik türlerinin çizdirilmesine imkan vermektedir. Bunlardan bazıları aşağıda listelenmiştir.

- Çizgi grafik
- Sütun grafik
- Pasta dilimi grafik
- Yükselti grafik
- Fonksiyon örgü grafik
- Yüzey yükselti grafik

Örnek teşkil etmesi açısından Şekil 5.1(a)'da görülen grafiği çizdiren MATLAB kodu EK-B'de verilmiştir. 1 ile 300 bps aralığındaki normalize edilmiş ağ yaşam süresi değerleri 4 farklı düğüm sayısı için çizdirilmiştir.

4. SİSTEM MODELİ

4.1 Referans Zaman ve Enerji Modeli

KAA'larda ağ yaşam süresinin (t) veya enerji tüketiminin optimizasyonu için daha önce de bir çok çalışmada sistem modellemesi yapılmıştır. Bu amaçla yaygın olarak zaman modeli ve enerji modeli olmak üzere iki referans model kullanılmıştır.

Zaman modelinde her düğümün başlangıçta sahip olduğu enerji miktarının bilindiği ve eşit olduğu düşünülerek mevcut enerji ile ağ yaşam süresinin maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Enerji modelinde ise daha önce belirlenmiş bir ağ yaşam süresi içerisinde minimum enerji tüketilerek düğümlerdeki verilerin baz istasyonuna aktarılması hedeflenmiştir.

İlgilendiğimiz problemde ağ topolojisi, $G = (V, A)$ ile gösterilen bir tam yönlü çizgeden oluşmakta ve bir baz istasyonu ile N sayıda algılayıcı düğümden meydana gelmektedir. V , baz istasyonu dahil düğümlerin kümesini, W ise baz istasyonu hariç düğümlerin kümesini ifade etmektedir. Düğümler arasındaki akışların kümesi $A = \{(i, j) : i \in V, j \in V - \{i\}\}$ ile verilmektedir. i düğümünden j düğümüne doğru yönlü veri akışı f_{ij} ile gösterilmektedir.

1-boyutlu topolojide düğümlerin baz istasyonu ile aynı düzlem üzerinde birbirine eşit mesafede yer aldığı kabul edilmiştir. 2-boyutlu topolojide ise ağın, merkezde yer alan bir baz istasyonu ve etrafında R_{net} yarıçapına sahip bir disk içerisinde rastgele yerleştirilmiş algılayıcı düğümlerden oluştuğu kabul edilmiştir.

KAA'lar için ideal bir haberleşme ortamında sadece enerji ve veri akış kısıtları göz önüne alınarak tanımlanan referans DP zaman modeli Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu modelde düğümlerin başlangıçtaki enerji miktarları (e_i) eşittir.

Amaç : t 'yi maksimize etmek

Kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.1)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij} = \sum_{j \in W} f_{ji} + s_i \cdot t \quad \forall i \in W \quad (4.2)$$

$$E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}(d_{ij}) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.3)$$

Şekil 4.1: KAA'larda ağ yaşam süresi optimizasyonu için referans DP modeli.

Daha önce de belirtildiği gibi ağ yaşam süresini maksimize etmek ile toplam enerji tüketimini minimize etmek birbirine eşit değildir [2]. Enerji minimize edilirken veri akışlarının düğümler arasında en verimli şekilde paylaşılarak dengeli tüketilmesi ile optimum sonuç elde edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan enerji modeli, toplam tüketimi minimize etmek yerine en fazla enerji tüketen düğümün enerji sarfiyatını minimize etmekte, böylece enerji sarfiyatının düğümler arasında paylaşılmasını sağlayarak zaman modeline eşdeğer bir çözüm önermektedir.

Zaman modeline eşdeğer referans DP enerji modeli Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu modelde belli bir ağ yaşam süresi ($t=1$ sn) içerisinde enerji sarfiyatı dengeli bir biçimde minimize edilmektedir.

Amaç : E 'yi minimize etmek

Kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij} = \sum_{j \in W} f_{ji} + s_i \quad \forall i \in W \quad (4.5)$$

$$E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}(d_{ij}) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.6)$$

$$e(i) \leq E \quad \forall i \in W \quad (4.7)$$

Şekil 4.2: KAA'larda enerji optimizasyonu için referans DP modeli.

Bu modellerde (4.1) ve (4.4) no'lu denklemler veri akışlarının negatif olamayacağını ifade etmektedir. (4.2) ve (4.5) no'lu denklemler akış dengeleme kısıtlarıdır. Buna göre baz istasyonu hariç tüm düğümler için, düğüme giren veri miktarı ile düğümden çıkan veri miktarına eşittir. Aynı denklemlerde tüm düğümlerin sabit ve eşit veri üretim oranında (s_i) veri ürettiği ifade edilmektedir. (4.3) ve (4.6) no'lu denklemler enerji kısıtını ortaya koymaktadır. Bu kısıta göre düğümlerde yaşam süresi boyunca veri

alıp verme esnasında harcanan enerjilerin toplamı, hiç bir düğüm için başlangıç enerjisinden daha fazla olmamalıdır. (4.7) no'lu denklem ise enerji modelinde her düğümde harcanan enerjinin minimize edilmesi için kullanılmaktadır.

Heinzelman, Chandrakasan ve Balakrishnan [28]'de, enerji kısıtlarında bahsi geçen bir bit veri almak için gereken enerji E_{rx} ve bir bit veri göndermek için gereken enerji E_{tx} 'i sırasıyla (4.8) ve (4.9)'daki gibi tanımlamış ve daha sonraki bir çok çalışmada ([2, 20]) bu model ya olduğu gibi ya da çok benzer şekilde kullanılmıştır. Bu enerji modeli bundan böyle yazarlarından isimlerinin baş harflerinden elde edilen kısaltma ile "HCB modeli" olarak anılacaktır. Burada bir bit almak için gereken enerji sabit iken bir bit göndermek için gerekli enerji iki düğüm arasındaki mesafeye (d_{ij}) bağlıdır. Elektronik devredeki enerji yayılımını ρ ile ifade edilirken ε vericinin verimliliğini, α ise yol kaybı katsayısını göstermektedir.

$$E_{rx} = E_{rx}^{C-HCB} = \rho \quad (4.8)$$

$$E_{tx}(d_{ij}) = E_{tx}^{C-HCB}(d_{ij}) = \rho + \varepsilon d_{ij}^\alpha \quad (4.9)$$

Şekil 4.3: Sürekli HCB modeli.

Bu kısımda ele alınan referans modellerde iletim ortamı ideal olarak kabul edilmiş, bant genişliği kısıtları, girişimin etkileri dikkate alınmamış, iletim için gerekli güç miktarının sürekli ölçekte ayarlanabildiği varsayılmıştır. Ayrıca düğümlerin her mesafeye iletim yapabildikleri kabul edilmiş, radyo ve kanal parametrelerinden kaynaklanan olasılıksal kayıplar göz ardı edilmiştir. Düğümlerin yerlerinin tam olarak bilindiği düşünülmüştür. Takip eden bölümlerde bu modeller daha gerçekçi bir biçimde ele alınmak suretiyle çalışmada ilgi alanımıza giren bant genişliği ve ayrık iletim gücü konusunda analizler yapabilmek için gerekli sistem modelleri tanımlanacaktır.

4.2 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Girişim ve Bant Genişliği Analizi için Sistem Modellemesi

Bir KAA'da bulunan düğümler genellikle kısıtlı kaynaklara sahiptirler. Bir çok kaynak kısıtı teknolojidaki son gelişmeler ile aşılmış, en kritik kaynak enerji haline gelmiştir. Algılayıcı düğümlerdeki bataryaların şarj edilmesi veya

değiştirilmesi pratik olmadığı için enerji sarfiyatının azaltılması en önemli tasarım kriteri haline almıştır. Başka bir deyişle, enerji verimli çözümler KAA'lardaki enerji sıkıntısını aşmak için kilit bir noktaya ulaşmıştır. Bununla birlikte, enerji minimizasyonu sırasında haberleşmede girişimin etkileri ve bant genişliği kısıtları ihmal edildiği durumda önerilen çözümlerin uygulanamayabileceği [14]'te açıkça gösterilmiştir. Enerji açısından verimli görünen bazı veri akışları verilen bir bant genişliğinde çözüme dahil edilemeyebilmektedir. Bu nedenle KAA'larda daha gerçekçi analizler yapabilmek için bant genişliği kısıtlarını ve girişimin etkilerini dikkate almak bir gereklilik haline gelmiştir.

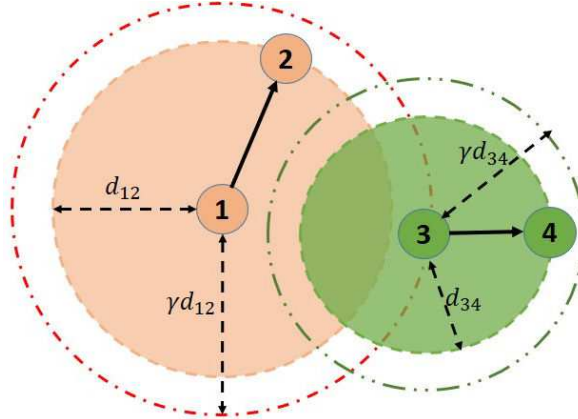
İncelenmesi gereken faktörlerden birisi olan girişim, bir kanal içerisinde iki düğüm arasında gerçekleşen bir haberleşme sırasında bu düğümlerden gönderilen sinyallerin ulaştığı diğer düğümlerde istenmeyen sinyaller oluşmasına sebep olmaktadır. Başka bir deyişle, iletimden etkilenen düğümlerde iletilmek istenen trafiğe bu etki nedeniyle ekstra bir takım sinyaller eklenmektedir. Bu yönüyle girişim, bir sinyali değiştirebilmekte veya bozabilmektedir.

Algılayıcı düğümler kendi aralarında kablosuz bağlantılarla haberleştikleri için kanalın bant genişliği bir çok düğüm tarafından paylaşılmaktadır. Bu nedenle iki düğüm arasındaki iletim, bu haberleşmeden etkilenen komşu düğümlerdeki mevcut bant genişliğinin bir kısmını işgal etmektedir. Dolayısıyla enerji açısından verimli bir veri akışı, bant genişliği kısıtları yüzünden çözüme eklenemeyebilir. Benzer şekilde mevcut bant genişliği ile kullanılabilen veri akışları enerji verimliliği açısından optimum olmayabilir. Enerji verimliliği ile bant genişliği kısıtları arasındaki ödünleşme; radyo sinyalinin yayılma karakteristiği, düğüm yoğunluğu, iletim menzili ve girişim menzili gibi bir çok sistem parametresine bağlıdır.

Bant genişliği kısıtlarının dikkate alınması için öncelikle her düğüme ait girişimden kaynaklanan akışları tanımlamak gerekmektedir. (4.10) no'lu denklem j düğümü ile k düğümü haberleşirken i düğümü üzerindeki girişimi tanımlamaktadır. Buna göre eğer j ile k düğümleri arasındaki mesafe ile γ 'nın çarpımı, i ile j düğümleri arasındaki mesafeden büyükse i düğümü üzerinde f_{jk} akışı kadar girişim meydana gelmekte, küçükse herhangi bir etkileşim olmamaktadır. Burada γ iletim ortamının girişim faktörünü ifade etmektedir. Düğümün kendisine gelen veya kendisinden çıkan veri akışları girişime dahil edilmemektedir.

$$I_{jk}^i = \begin{cases} f_{jk}, & \text{Eğer } \gamma d_{jk} \geq d_{ji} \text{ ve } i \neq j \neq k \text{ ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.10)$$

İletim menzili, bir düğümün kullanabildiği en yüksek güçte iletim yapabildiği noktaları sınır alan dairesel bir alanı ifade etmektedir. Bu alan dahilindeki herhangi bir noktaya uygun güç harcanarak iletim yapılabilmekte, bu alan dışında kalan bölgeye veri gönderilememektedir. Girişim menziline ise iletim menziline eşit veya daha büyük olduğu varsayılmaktadır ($\gamma \geq 1$). Aktif iletim menziline ötesinde sinyalin çözülemeyecek kadar zayıf ancak girişime sebep olabilecek kadar güçlü olduğu geçişli bir bölge bulunmaktadır [14]. Örneğin radyo donanımının en fazla 500 m. mesafeye iletim yapabildiği bir ortamda 650 m. mesafede bulunan sinyal deşifre edilip kullanılamayacak kadar zayıflamakta ancak bu bölgede bulunan düğümler üzerinde girişime sebep olabilecek kadar güçlü seviyelerde bulunmaktadır. Bu durum Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Girişim menziline gösterimi.

1 no'lu düğümünün 2 no'lu düğüme iletim yaptığı durumda yarıçapı d_{12} olan dairesel alan iletim menziline, yarıçapı γd_{12} olan dairesel alan ise girişim menziline ifade etmektedir. Girişim menziline içerisinde kalan her düğüm (bu örnekte 3 no'lu düğüm) bu iletimden etkilenmektedir. Buna rağmen 3 no'lu düğümün 4 no'lu düğüm ile haberleşmesi durumunda 1 ve 2 no'lu düğümler bundan etkilenmemektedir.

Girişim ve bant genişliği analizi, ilerleyen alt bölümlerde DP zaman modeli, DP enerji modeli ve KTDP enerji modeli olmak üzere üç alt bölümde incelenmiştir.

4.2.1 Doğrusal Programlama Zaman Modeli

İlk olarak bant genişliği kısıtlarının ağ yaşam süresi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Şekil 4.5'te gösterilen DP zaman modeli oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de verilen referans modele iletim menzili, bant genişliği ve girişim ile ilgili kısıtlar eklenmiştir.

Amaç: t 'yi maksimize etmek
Kısıtlar:
$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.11)$
$\sum_{j \in V} f_{ij} = \sum_{j \in W} f_{ji} + s_i \cdot t \quad \forall i \in W \quad (4.12)$
$E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}(d_{ij}) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.13)$
$f_{ij} = 0, \text{ Eğer } d_{ij} \geq t_r \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.14)$
$\sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} + \sum_{k \in W} \sum_{l \in V} I_{kl}^i \leq B \cdot t \quad \forall i \in W \quad (4.15)$

Şekil 4.5: KAA'larda bant genişliği analizi için DP zaman modeli.

Burada eklenen (4.14) no'lu denklem, hedef düğümün iletim menzili dışında kalması durumunda bu düğüme veri iletilemeyeceğini ifade etmektedir. (4.15) no'lu denklemde ise bir düğüme gelen veri, düğümden çıkan veri ve girişim nedeniyle düğüme ulaşan veri miktarlarının toplamının ağ yaşam süresi boyunca düğümün bant genişliği oranında iletebileceği toplam veri miktarından fazla olamayacağı ortaya konulmaktadır. Bu kısıt [14]'te verilen yeterli koşulun değiştirilmesi ile elde edilmiştir.

Bu model, bant genişliği kısıtı olduğu durumda ağ yaşam süresinde hangi oranda bir azalma olacağını incelemeye yardımcı olacak, bant genişliğinin hangi aralıklarda etkili olduğunu araştırmamızı sağlayacaktır. Ayrıca hangi düğümün konumu itibarıyla diğerlerine nispeten daha fazla bant genişliğine ihtiyaç duyduğu incenebilecektir. Bu konudaki analizler Bölüm 5.1.1'de verilmektedir.

4.2.2 Doğrusal Programlama Enerji Modeli

Bant genişliği ile diğer ağ parametreleri (iletim menzili (t_r), her düğümün veri üretim oranı (s_i), yol kaybı (α), ağın yayılım yüzeyinin yarıçapı (R_{net}), düğüm

sayısı (N) arasındaki ilişkiyi incelemek üzere kapsamlı bir analiz yapabilmek için Şekil 4.5'teki zaman modeline eşdeğer bir enerji modeli tanımlanmıştır.

Amaç: E 'yi minimize etmek	
Kısıtlar:	
$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A$	(4.16)
$\sum_{j \in V} f_{ij} = \sum_{j \in W} f_{ji} + s_i \quad \forall i \in W$	(4.17)
$E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}(d_{ij}) \leq e_i \quad \forall i \in W$	(4.18)
$f_{ij} = 0, \text{ Eğer } d_{ij} \geq t_r \quad \forall (i, j) \in A$	(4.19)
$\sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} + \sum_{k \in W} \sum_{l \in V} I_{kl}^i \leq B \quad \forall i \in W$	(4.20)
$e(i) \leq E \quad \forall i \in W$	(4.21)

Şekil 4.6: KAA'larda bant genişliği analizi için DP enerji modeli.

Şekil 4.6'da verilen bu model vasıtasıyla hem çeşitli ağ parametrelerinin etkileri incelenecek, hem de bant genişliği kısıtı olmadan işin tamamlanabildiği enerji miktarını kullanarak kısıtlı bant genişliği altında elde edilebilen en yüksek düğüm başına veri üretim oranı bulunacaktır. Başka bir ifadeyle, sınırlı bant genişliğinin neden olduğu fazladan enerji tüketimine sebep olmayacak en yüksek veri üretim oranı belirlenecektir. Bu konudaki analizler Bölüm 5.1.2 altında yapılmaktadır.

Şekil 4.5 ve 4.6'da verilen iki model arasındaki temel fark, ilk modelde düğümlerde bulunan ve başlangıçta verilen ortak başlangıç enerjisi çerçevesinde ağ yaşam süresinin maksimize edilmesi, ikincisinde ise verilen bir ağ yaşam süresi çerçevesinde harcanan enerjinin dengeli bir biçimde minimize edilmesidir. Her iki modelde de bir bit veri almak ve iletmek için Şekil 4.3'te tanımlanan "sürekli HCB modeli" kullanılmaktadır.

4.2.3 Karma Tamsayı Doğrusal Programlama Enerji Modeli

Bölüm 4.2.1 ve 4.2.2'de [14]'te verilen yeterli koşulun değiştirilmesi ile elde edilen kısıt kullanılmakta ve bu durum gerektiğinden fazla bant genişliği hesap edilmesine neden olmaktadır. Bunun sebebi, girişimin hem veri gönderen hem de

veri alan düğümler için göz önüne alınmasıdır. Bu kısıt çözüm için yeterli olmasına rağmen optimum olmayan bir çözüme sebep olmaktadır. Başka bir deyişle girişim sadece veri alan düğümler için göz önüne alındığında enerji açısından daha verimli bir sonuç elde edilebilmektedir. Bu amaçla KTDP modeli tasarlanmıştır.

KTDP modelinde ağ yaşam süresi zaman dilimlerine (x) bölünmüştür. Her düğüm bir zaman diliminde bir paket göndermekte veya almaktadır. Toplam zaman dilimi sayısı (NS), paket büyüklüğü (PS) ve gönderilecek paket sayısı (NP) çalışma öncesi belirlenmektedir. Amaç en az sayıda zaman dilimi ile optimum enerjiyi elde etmektir. Zaman dilimi sayısı dolaylı olarak bant genişliği miktarını ifade etmektedir.

Bu modelde öncelikle iki farklı bağlantının aynı anda gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirten çakışma matrisinin ($c(i,j,k,l)$) tanımlanması gerekmektedir. Buna göre $c(i,j,k,l)=1$ olduğu durumda (i,j) bağlantısı ile (k,l) bağlantısı aynı anda gerçekleşemezken 0 olduğu durumda aynı anda meydana gelebilmektedir. Daha önce tanımlanan $I_k l^i$ girişim veri akışından farklı olarak bu defa veri gönderen düğüm girişim menzili içerisinde ise girişimden etkilenmemektedir.

$$c(i, j, k, l) = \begin{cases} 0 & \text{ilk eğer } i = k \text{ ve } j = l \\ 1 & \text{ikinci eğer } \gamma d(i, j) > d(i, l) \text{ veya } \gamma d(k, l) > d(k, j) \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.22)$$

Ardından herhangi bir x zaman diliminde i ve j düğümleri arasındaki bağlantının var olup olamayacağını gösteren $g(i, j, x)$ ikili değişkeni tanımlanmaktadır.

$$g(i, j, x) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } x \text{ zaman diliminde } (i, j) \text{ bağlantısı mevcutsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.23)$$

Bu doğrultuda tanımlanan KTDP modeli Şekil 4.7'de verilmiştir.

Bu modelde (4.24) no'lu denklem tüm veri akışlarının sıfırdan büyük olması gerektiğini ifade etmektedir. (4.25) no'lu denklem ise bir düğüme gelen ve düğümden üretilen veri miktarının düğümden çıkan veri miktarına eşit olmasını

Amaç: E 'yi minimize etmek

Kısıtlar:

$$g(i, j, x) \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall x \in NS \quad (4.24)$$

$$\sum_{x=1}^{NS} \sum_{j \in V} g(i, j, x) = \sum_{x=1}^{NS} \sum_{j \in W} g(j, i, x) + \sum_{x=1}^{NS} s(i, x) \quad \forall i \in W \quad (4.25)$$

$$\sum_{x=1}^{NS} \sum_{j \in W} g(j, i, x) = NP * (N - 1) \quad \text{for } i = 0 \quad (4.26)$$

$$\sum_{x=1}^{x_0} \sum_{j \in V} g(i, j, x) \leq \sum_{x=1}^{x_0} \sum_{j \in W} g(j, i, x) + \sum_{x=1}^{x_0} s(i, x) \quad \forall i \in W \quad (4.27)$$

$$g(i, j, x) + g(k, l, x) \leq 1, \text{ if } c(i, j, k, l) = 1 \quad \forall (i, j) \in A, \forall (k, l) \in A, \forall x \in NS \quad (4.28)$$

$$PS * E_{rx} \sum_{x=1}^{NS} \sum_{j \in W} g(j, i, x) + PS * \sum_{x=1}^{NS} \sum_{j \in V} g(i, j, x) E_{tx}(d_{ij}) = e(i) \quad \forall i \in W \quad (4.29)$$

$$\sum_{x=1}^{NS} s(i, x) = NP \quad \forall i \in W \quad (4.30)$$

$$e(i) \leq E \quad \forall i \in W \quad (4.31)$$

Şekil 4.7: KAA'larda bant genişliği analizi için KTDP enerji modeli.

sağlamaktadır. (4.26) no'lu denklemde baz istasyonuna iletilecek veri miktarının baz istasyonu hariç diğer düğümlerde üretilen veri toplamı kadar olması gerektiği belirtilmektedir. (4.27) no'lu denklemde ise herhangi bir x_0 zaman diliminde bir düğümün gönderilebileceği veri miktarının, bu zaman dilimine kadar diğer düğümlerden gelen veri ve düğümden üretilen veri miktarı toplamından küçük veya eşit olması gerektiği ifade edilmektedir. (4.28) no'lu denklem çakışma halinde ilgili bağlantılardan sadece birisinin aktif olmasını sağlamaktadır. (4.29) no'lu denklemde her düğümden veri göndermek ve almak için harcanan enerjilerin toplamı tanımlanmaktadır. (4.30) no'lu denklemde ise herhangi bir i düğümünde tüm zaman dilimlerinde üretilen paket sayısına bir üst limit getirilmektedir. (4.31) no'lu denklem ile her düğümden harcanan enerjinin minimize edilmesi sağlanmaktadır.

Şekil 4.7'de verilen bu model vasıtasıyla yeterli koşul yerine gerekli koşul kullanıldığında enerji tüketiminde ne kadar bir iyileşme sağlanacağı incelenecektir. Bu konudaki analizler ise Bölüm 5.1.3 altında verilmektedir.

4.3 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücü ve Güç Atama Stratejilerinin Analizi için Sistem Modellemesi

KAA'larda tüketilen enerji iki düğüm arasındaki haberleşme enerjisi tarafından domine edildiği için [1] enerji verimli tasarım çalışmaları, iletim gücünün efektif kullanılması konusunda yoğunlaşmıştır. Daha önceki bir çok çalışma iletim gücünün iletim mesafesi doğrultusunda sürekli ölçekte ayarlanabildiğini varsaymıştır. Halbuki mevcut radyo donanımları iletim gücünün sadece belli aralıklarda ayarlanabilmesine izin vermektedir.

Diğer taraftan iletim gücünün haberleşen iki düğüm arasındaki mesafeye bağlı olduğu bilinmektedir. Ancak bu mesafenin doğruluğu düğüm konumlarının tam olarak belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Pratikte düğüm konumları tam doğrulukla tespit edilememekte ancak belli bir pozisyonlama hatası ile tahmin edilebilmektedir. Bu da düğümler arasındaki mesafelerdeki doğruluğu etkilemektedir.

Yapılan çalışmalarda doğruluğu etkileyen bir diğer etken pratikte radyo dalgalarının olasılıklar dahilinde iletilmesidir. İki düğüm arasında yapılan bağlantının kalitesi; yol kaybı katsayısı, kanalın gölgeleme değişkeni, modülasyon ve kodlama gibi bir çok radyo ve kanal parametresine bağlıdır.

İletim gücü kontrolü konusunda bugüne dek yapılan çalışmalarda güç atamaları; ağ genelinde, düğüm seviyesinde ve bağlantı seviyesinde olmak üzere üç farklı şekilde yapılmıştır. Daha hassas şekilde yapılan güç kontrolünün ağ yaşam süresinde iyileşme sağlayacağı açık olmasına rağmen farklı güç atamalarının net etkisi belirsiz kalmıştır.

Bahsi geçen tüm faktörlerin etkilerini inceleyebilmek ve çalışmada bu konuları ele alabilmek için yukarıda sıralanan durumlar dört alt başlıkta tanımlanan modeller vasıtasıyla incelenmiştir.

4.3.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayırık İletim Gücünün Modellenmesi

KAA'larda güç seviyelerinin ayırık olarak ayarlanmasının etkilerini incelemek amacıyla Bölüm 4.1'de bahsi geçen "HCB modeli" referans alınmış ve iletim enerjisinde yapılan değişiklikler ile Şekil 4.8'de verilen "ayırık HCB modeli" oluşturulmuştur. Buna göre (4.8)'de verilen bir bit almak için gerekli enerji E_{rx} sabit kalırken, (4.9)'da verilen ve bir bit göndermek için harcanan enerji E_{tx} , (4.33)'deki gibi değiştirilmiştir.

$$E_{rx} = E_{rx}^{D-HCB} = \rho \quad (4.32)$$

$$E_{tx}(d_{ij}) = E_{tx}^{D-HCB}(d_{ij}) = \rho + \eta \left\lceil \frac{\varepsilon d_{ij}^\alpha}{\eta} \right\rceil \quad (4.33)$$

Şekil 4.8: Ayırık HCB modeli.

Elektronik devrede harcanan enerji sabit kaldığı için alıcı tarafındaki enerji değişmemekte, verici tarafındaki enerji ise vericinin verimliliği (ε), yol kaybı katsayısı (α) ve ayarlanabilen en küçük enerji seviyesine (η) bağlı olarak ayırık değerlerde ayarlanabilmektedir. Buradaki $\lceil \cdot \rceil$ sembolü tavan fonksiyonunu ifade etmekte ve içerisindeki sayıyı kendisine eşit veya kendisinden büyük en yakın tamsayıya yuvarlamak için kullanılmaktadır. Örneğin $\lceil 5.24 \rceil$ sonucu 6 olurken $\lceil 3.0 \rceil$ sonucu 3 olmaktadır.

Amaç: t 'yi maksimize etmek

Kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.34)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij} = \sum_{j \in W} f_{ji} + s_i \cdot t \quad \forall i \in W \quad (4.35)$$

$$E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}(d_{ij}) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.36)$$

$$f_{ij} = 0, \text{ Eğer } d_{ij} \geq t_r \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.37)$$

Şekil 4.9: KAA'larda ayırık iletim gücü analizi için DP zaman modeli.

Ayırık iletim gücü kullanımının modellenmesi için Şekil 4.1'deki zaman modeli referans alınmış, iletim menzili için bir kısıt eklenerek enerji tüketimleri için Şekil 4.8'de verilen "ayırık HCB modeli" kullanılmıştır. Elde edilen zaman modeli Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Bu model iletim gücünün ayrık seviyelerde ayarlanabildiği durumda sürekli ayarlandığı duruma kıyasla nasıl bir değişim gözlemlendiğini incelemeye yardımcı olacak, veri akışlarında meydana gelen değişimleri tetkik etmeye imkan verecektir. Ayrıca iletim gücünü ayrık hale getirme sırasında kullanılan ayarlanabilir en küçük enerji miktarının farklı değerleri için ağ yaşam süresindeki değişim analiz edilebilecektir. İlgili analizler Bölüm 5.2.1 altında verilmektedir.

4.3.2 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Pozisyonlama Hatalarının Modellenmesi

Daha önce ifade edildiği gibi KAA'larda düğüm konumlarının tam olarak belirlenememesi ve bunun sonucu olarak belli pozisyonlama hataları (e_{max}) dahilinde ancak tahmin edilebilmesi bu durumun kullanılan modellerde göz önüne alınmasını gerektirmektedir. Konu ile ilgili literatür çalışmalarında değinildiği üzere daha önce bir çok çalışmada farklı yöntemler kullanılarak pozisyonlama hatalarının minimize edilmesine çalışılmış ve 0-10 m. aralığında hatalarla konum belirleyen teknikler geliştirilmiştir. Bu amaçla çalışmamızda 0-10 m. aralığındaki pozisyonlama hataları dikkate alınarak etkileri incelenmiştir.

Pozisyonlama hatalarında e_{max} sınır olmak üzere, kullanılan modelde pozisyonlama hatası $[-e_{max}, +e_{max}]$ aralığında düzgün rastgele dağılan sıfır-ortalımalı bir formda kullanılmıştır. Buna göre, iki düğüm arasındaki gerçek mesafe d_{ij} iken hesaplanan mesafe d_{ij}^e ise $[d_{ij} - e_{max}, d_{ij} + e_{max}]$ aralığında kalmaktadır. Bu hatalar sonucu kullanılacak daha düşük bir iletim gücü seviyesi nedeniyle harcanan iletim gücünün, gerçek iletim gücünden (pozisyonlama hatalarının olmadığı durumda) daha az çıkması için bu aralık e_{max} oranında kaydırılarak düzeltilmiş mesafe d_{ij}^c bulunmuştur ($d_{ij}^c = d_{ij}^e + e_{max}$). Böylece düzeltilmiş hesaplanan mesafenin $[d_{ij}, d_{ij} + 2e_{max}]$ aralığında kalması sağlanmıştır.

Bu doğrultuda, Şekil 4.9'da verilen DP modelinde ve hem sürekli hem de ayrık HCB modellerinde d_{ij} geçen denklemlerde d_{ij}^c kullanılmıştır. Dolayısıyla (4.9) no'lu denklem yerine aşağıda yer alan (4.38) no'lu denklemi, (4.33) no'lu denklem yerine (4.39) no'lu denklemi, (4.36) ve (4.37) no'lu denklemler yerine (4.40) ve (4.41) no'lu denklemleri kullanmak suretiyle konu incelenmiştir.

$$E_{tx}(d_{ij}^c) = E_{tx}^{C-HCB}(d_{ij}^c) = \rho + \varepsilon(d_{ij}^c)^\alpha \quad (4.38)$$

$$E_{tx}(d_{ij}^c) = E_{tx}^{D-HCB}(d_{ij}^c) = \rho + \eta \left[\frac{\varepsilon(d_{ij}^c)^\alpha}{\eta} \right] \quad (4.39)$$

$$E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}(d_{ij}^c) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.40)$$

$$f_{ij} = 0, \text{ Eğer } d_{ij}^c \geq t_r \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.41)$$

Bu model, verilen bir ağ için e_{max} 'ın bilindiği varsayımı ile pozisyonlama hatalarının etkilerini incelemeyi sağlayacaktır. Bu sayede hem sürekli güç ayarlanabildiği durumda, hem de ayırık iletim gücü kullanıldığı durumda pozisyonlama hatalarının sonucu nasıl etkilediği araştırılacaktır. Bu konudaki analizler Bölüm 5.2.2 altında yer almaktadır.

4.3.3 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Olasılıksal Radyo Yayılımının Modellenmesi

KAA'larda radyo düzensizlikleri oldukça yaygındır. Gerçek hayatta kullanılan radyo yongalarında yayılım her yöne doğru eşit değildir. Bazı kanal ve radyo parametrelerine bağımlı olması nedeniyle radyo dalgalarının yayılımı olasılığa bağlı bir ölçüttür. Örneğin kanal üzerinde yol kaybı katsayısı ve gölgelemedeki değişim etkili olurken, radyo yayılımı ise sinyallerde kullanılan kodlama tekniği ve modülasyon tarafından etkilenmektedir. Ayrıca girişim ve çoklu yol sönümlenmesi de etki eden faktörlerden bazılarıdır.

Kablosuz ortamlarda bir paketin başarılı olarak alınma olasılığı "Paket Alma Oranı (Packet Reception Rate - PRR)" ile ifade edilmektedir. Yukarıda bahsi geçen faktörlerden ötürü iki düğüm arasındaki bağlantılara ait PRR, ikili düzende olduğu gibi "0" veya "1"ler ile ifade edilememekte, aşamalı olarak azalan bir örüntü izlenmektedir. Örneğin PRR=0.85, bir paketin %85 olasılıkla alıcıya ulaşacağını başka bir deyişle gönderilen her 100 paketten 85'inin başarı

ile alıcıya ulaşacağını, diğer 15 paketin ise yol kaybına sebep olan bir çok etken nedeniyle iletilmeyeceğini göstermektedir. Gerçek hayatta gönderilen paketlerin olasılıklar dahilinde iletilmesi bu durumun kullanılan modellerde dikkate alınmasını gerektirmektedir.

Olasılık kuramı ve istatistik bilim dallarında log-normal dağılım logaritması normal dağılım gösteren herhangi bir rassal değişken için tek-kuyruklu bir olasılık dağılımdır [88]. Eğer Y normal dağılım gösteren bir rassal değişken ise, bu halde X , $\exp(Y)$ için olasılık dağılımı bir log-normal dağılımdır; aynı şekilde eğer X log-normal dağılım gösterirse o halde $\log(X)$ normal dağılım gösterir.

KAA düğümlerinin haberleşme karakteristiklerinin gerçekçi bir şekilde değerlendirilebilmesi için Zuniga ve Krishnamachari, log-normal gölgeleme (log-normal shadowing - LNS) yol kaybı modelini önermişlerdir [69]. Daha önceki bölümlerde ele alınmayan yayılmanın etkilerini incelemek için, bu çalışmadaki parametreler kullandığımız zaman modeline uyarlanmıştır.

LNS yol kaybı modelinde, bir d_{ij} uzaklığındaki desibel (dB) cinsinden yol kaybı ($PL(d_{ij}), dB$) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$PL(d_{ij}), dB = PL(d_0), dB + 10\alpha \log_{10}(d_{ij}/d_0) + X_\sigma, dB \quad (4.42)$$

Burada d_{ij} alıcı ile verici düğüm arasındaki mesafeyi, d_0 önceden belirlenmiş bir referans uzaklığı, $PL(d_0), dB$ referans mesafedeki dB cinsinden yol kaybını, α yol kaybı katsayısını ve X_σ, dB de σ standart sapmaya sahip dB cinsinden sıfır-ortalımalı Gauss rastgele değişkenini ifade etmektedir. Bu çalışmada referans alınan Mica düğümleri için $\alpha = 4$, $\sigma = 4$, $d_0 = 1$ m ve $PL(d_0) = 55$ dB olarak alınmıştır [69].

Alıcı düğüm tarafında alınan sinyalin gücü $P_{rx}(d_{ij}), dB$, iletim gücünden yol kaybının çıkarılması ile elde edilmektedir:

$$P_{rx}(d_{ij}), dB = P_{tx}(d_{ij}), dB - PL(d_{ij}), dB \quad (4.43)$$

Mica düğümlerinde kodlama tekniği olarak sıfıra-dönmeyen kodlama (Non Return to Zero - NRZ) ve modülasyon tekniği olarak da frekans kaydırmalı anahtarlama

(Frequency Shift Keying - FSK) kullanılmaktadır. Böylece bir d_{ij} mesafesindeki başarılı paket alma olasılığı aşağıdaki denklemde verilmektedir [69]:

$$PRR(d_{ij}) = \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-\psi(d_{ij})}{2} \frac{1}{0.64}\right)\right)^{8\varphi} \quad (4.44)$$

Burada $\psi(d_{ij})$, bir d_{ij} mesafesinde sinyalin gürültüye oranını (signal-to-noise ratio - SNR) ve φ bayt cinsinden paket büyüklüğünü göstermektedir. Bir d_{ij} mesafesindeki SNR:

$$\psi(d_{ij}), dB = P_{tx}(d_{ij}), dB - PL(d_{ij}), dB - P_n, dB \quad (4.45)$$

ile verilmektedir. Burada P_n, dB gürültünün taban değerini (noise floor) ifade etmekle birlikte Mica düğümleri için 300 Kelvin sıcaklıkta -145 dB olarak alınmaktadır [69].

X_σ 'nın dahil edilmesi halinde yol kaybı üstsel şekilde değişeceği için bu bölümde pozisyonlama hatalarının etkileri ayrıca ele alınmamıştır. Çünkü hatasız bir şekilde pozisyon bilgileri elde edilse dahi, alıcı ve verici arasındaki gerçek mesafeye bağlı tek yönlü bir hesaplama tekniği ile anlamlı bir şekilde gerçek yol kaybını hesaplamak mümkün değildir. Bu nedenle Lin ve diğerleri yol kaybının kapalı devre bir güç kontrol mekanizması ile ölçülmesi gerektiğini göstermişlerdir [74]. Bu çalışmada da böyle bir mekanizmanın kullanıldığı varsayılmıştır.

Bu bölümde radyo yayınlarının olasılıksal iletimini ele almak için önceki HCB modellerinde değişikliklere gidilmiştir. Öncelikle her düğüm çifti arasındaki yol kaybı $PL(d_{ij}), dB$, (4.42) no'lu denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Daha sonra hedeflenen bir PRR değeri için (4.44) no'lu denklem vasıtasıyla SNR değerleri bulunmuştur. Ardından (4.45) no'lu denklem kullanılarak iletim güçleri $P_{tx}(d_{ij}), dB$ hesaplanmıştır. Bulunan iletim gücünü watt cinsinden elde etmek için aşağıdaki çevrimden faydalanılmıştır.

$$P_{tx}(d_{ij}), W = 10^{\left(\frac{P_{tx}(d_{ij}), dB}{10}\right)} \quad (4.46)$$

Sürekli HCB modelinde bir bit iletmek için kullanılan iletim enerjisi, log-normal gölgeleme yol kaybını modellemek için $E_{tx}^{C-HCB-LNS}(d_{ij})$ olarak aşağıdaki gibi

değiştirilmiştir:

$$E_{tx}(d_{ij}) = E_{tx}^{C-HCB-LNS}(d_{ij}) = \rho + \varepsilon T_b P_{tx}(d_{ij}), W \quad (4.47)$$

Burada T_b bir bitin iletilmesi için gerekli zamanı ($52.08 \mu s$) ifade etmektedir. Benzer şekilde ayrık HCB modelindeki değişiklik aşağıdaki gibi yapılmıştır:

$$E_{tx}(d_{ij}) = E_{tx}^{D-HCB-LNS}(d_{ij}) = \rho + \eta \left[\frac{\varepsilon T_b P_{tx}(d_{ij}), W}{\eta} \right] \quad (4.48)$$

$E_{tx}(d_{ij})$ verici tarafından yayılan toplam enerjiyi ifade ederken $T_b P_{tx}(d_{ij}), W$ sadece antenden yayılan enerjiyi göstermektedir. HCB modelinin önceki versiyonlarında antenden yayılan enerji d_{ij}^α ile modellenirken log-normal gölgeleme (LNS) modelinde $T_b P_{tx}(d_{ij}), W$ ile ifade edilmektedir. Bu durumda orijinal HCB modelinin aksine, log normal gölgeleme HCB (HCB-LNS) modelinde yol kaybı, X_σ, dB 'nin ideal halde yani dairesel bir şekilde gerçekleşmemektedir. Başka bir deyişle aynı uzunluktaki iki farklı yol için yol kayıpları farklı olabilmektedir. Bunun dışında PRR her zaman %100'den daha düşük değerler almakta ve verilen bir iletim gücü için iletim mesafesi arttıkça beklenen PRR değeri azalmaktadır.

Çalışmada tüm ağ genelinde ortak bir hedef PRR (χ_{trg}) değeri kullanılmıştır. Sürekli HCB-LNS modelinde $E_{tx}^{C-HCB-LNS}(d_{ij})$ iletim enerjisi değerleri ayarlanarak tüm bağlantılar için aynı χ_{ij} değeri kullanılabilir. Ancak ayrık HCB-LNS modelinde tüm bağlantılar için sabit bir χ_{ij} değeri elde etmek, iletim enerjisindeki ayrıklaştırma nedeniyle mümkün olmamaktadır. Örneğin eğer $E_{tx}^{C-HCB-LNS}(d_{ij}) = \rho + 3.7\eta$ ise $E_{tx}^{D-HCB-LNS}(d_{ij}) = \rho + 4\eta$ olmaktadır. Bu nedenle, ayrık HCB-LNS modelinde her bağlantıdaki gerçek PRR değeri değişmektedir. Başka bir ifadeyle, sürekli HCB-LNS modelinde $\chi_{ij} = \chi_{trg}$ iken, ayrık HCB-LNS modelinde $\chi_{ij} \geq \chi_{trg}$ şeklinde gerçekleşmektedir. Yani ayrık HCB-LNS modeli için (4.48) no'lu denklem ile elde edilen iletim enerjisine en uygun güç seviyesi seçilerek buna bağlı iletim enerjisi kullanıldığında elde edilecek gerçek PRR değeri hesaplanmaktadır.

Gerçekleşen PRR değerinin hesaplanmasının ardından yol kayıplarını telafi edebilmek amacıyla paketlerin tekrar gönderilmesi göz önüne alınmalıdır. Örneğin bir iletim ortamında PRR=0.5 ise paketin başarı ile alıcıya ulaşmasını garantilemek

için ortalamada paketi 2 kez göndermek gerekmektedir. Kullandığımız modelde i ve j düğümleri arasındaki bağlantıya ait PRR değeri χ_{ij} ile gösterilmektedir. Herhangi bir (i, j) bağlantısı üzerinden paketlerin tekrar gönderilmesinden kaynaklanan enerji maliyeti λ_{ij} ile ölçeklenerek yeniden iletim hesaba katılmıştır [69]. Burada χ_{ij} ve λ_{ij} arasındaki ilişki $\lambda_{ij} = \frac{1}{\chi_{ij}}$ ile ifade edilmektedir. Örneğin, eğer $\chi_{ij} = 0.70$ ise paketlerin ortalama olarak 1.43 kez gönderilmesi gerekmektedir ($\lambda_{ij} = 1.43$).

Yeniden iletimden kaynaklı ekstra enerji sarfiyatını dikkate almak üzere, (4.3) no'lu denklem aşağıdaki gibi değiştirilmiştir:

$$E_{rx} \sum_{j \in W} \lambda_{ji} f_{ji} + \sum_{j \in V} \lambda_{ij} f_{ij} E_{tx}(d_{ij}) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.49)$$

Yeniden iletim sayısını ifade eden λ_{ij} terimi hem veri iletimi hem de veri alımı sırasında harcanan enerjilere katsayı olarak eklenmelidir. Bunun nedeni, veri iletimi başarısız veya eksik bile olsa alıcının bu esnada aynı miktarda enerjiyi harcamasıdır. Başka bir deyişle alınan paketin eksiksiz veya hatalı alındığına karar vermek için paketin tamamının alınması gerekmektedir.

Hem sürekli hem de ayrık HCB modellerinin analizi için olasılığa bağlı paket iletimini hesaba katmak üzere Şekil 4.9'daki model referans alınmış, yukarıda bahsi geçen değişiklikler uygulanarak yeni bir model geliştirilmiştir. Bu model radyo dalgalarının olasılıksal şekilde yayılmalarının ağ yaşam süresine etkilerini incelememize olanak verecek, durumun hem sürekli hem de ayrık HCB modellerinde ne tür değişikliklere neden olduğunu anlamamıza yardımcı olacaktır. Bununla birlikte ayrık HCB modelinde kullanılabilir minimum enerji seviyesinin farklı değerlerinin PRR ve ağ yaşam süresi üzerindeki tesirlerini ölçmek için kullanılacaktır. Bu doğrultuda yapılan analizler Bölüm 5.2.3 altında yer almaktadır.

4.3.4 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda İletim Gücü Atama Stratejilerinin Modellenmesi

KAA'ların enerji verimliliği konusunda yapılan çalışmalarda iletim gücü kontrolü çok önemli bir yer tutmaktadır [31]. İletim gücünün atanması ile ilgili

bugüne dek yürütülen araştırmalarda atamanın ağdaki tüm düğümler bazında yapılabileceği gibi, tek tek düğüm bazında ve düğümler arasındaki bağlantı bazında [74] yapılabileceği ortaya konulmuştur. Ancak bu çalışmalarda iletim gücü aynı çalışma içerisinde farklı şekillerde atanarak karşılaştırılmamış, bu atama yöntemlerinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkileri kıyaslanmamıştır. Bununla birlikte kullanılabilecek güç seviyesi sayısının ağ yaşam süresini nasıl etkileyeceği ilgi çeken bir diğer konu olarak ön plana çıkmıştır.

Bu bölümde, farklı açılardan ağ yaşam süresi optimizasyonu konusunu ele alan araştırmalara daha doğru ve daha esnek bir bakış açısı sağlayabilmek amacıyla orijinal HCB modeli genişletilerek farklı güç kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Ayrıca iletim gücü konusunda çalışan araştırmacılara somut öneriler sunmak bu çalışmanın diğer amaçlarından birisidir. Bu doğrultuda yaptığımız analizler deneysel çalışmalardan alınan ölçümlerin kullanılması vasıtasıyla genişletilmiştir.

Deneysel sonuçların paylaşıldığı iki farklı çalışmada [21, 22] yapılan ölçümleri kullanmak suretiyle konu iki alt başlıkta incelenmiştir. İlk çalışmada [21], sadece belli güç seviyelerinde harcanan güce karşılık iletim menzilleri ölçülmüş, bağlantılar arasındaki PRR değerlerinin "0" veya "1" olduğu kabul edilmiştir. İkinci çalışmada [22] ise güç seviyelerine karşılık hem iletim menzilleri hem de PRR değerleri ölçülerek aktif yol kayıpları dikkate alınmıştır. Takip eden bölümlerde bu ölçümlerden faydalanılarak iletim gücü ataması konusunda modellemeler yapılmıştır. Bu konuda yapılan analizler Bölüm 5.2.4 altında yer almaktadır.

4.3.4.1 Yol Kaybının Göz Önüne Alınmadığı Durum

Bu bölümde [21]'de verilen ve Mica düğümleri kullanılarak 26 farklı güç seviyesi için elde edilen enerji tüketim değerleri ve ilgili iletim menzilleri kullanılmıştır. Bu model "Mica enerji modeli" olarak tanımlanmış ve yapılan ölçümler Tablo 4.1'de verilmiştir. Veri alma enerjisi sabit olup bir bit için $E_{rx}^M = 0.922\mu\text{J}$ 'dur.

İlerleyen alt bölümlerde ağ bazında, düğüm bazında ve bağlantı bazında güç atamalarını tanımlayabilmek için geliştirilen farklı MP modelleri incelenecektir. Bu konu daha önce incelenmiş olmasına rağmen bu çalışmada, tanımlanan MP altyapısı sayesinde farklı atama stratejileri ağ yaşam süresi açısından karşılaştırılarak literatüre katkı sağlanacaktır.

Tablo 4.1: Mica düğümlelerinde farklı güç seviyelerinde iletim enerjileri ($\mu J/\text{bit}$) ve ilgili iletim menzilleri (m).

Güç Seviyesi (l)	$E_{tx}^M(l)$	$t_r^M(l)$	Güç Seviyesi (l)	$E_{tx}^M(l)$	$t_r^M(l)$
1 (l_{min})	0.672	19.30	14	0.844	41.19
2	0.688	20.46	15	0.867	43.67
3	0.703	21.69	16	1.078	46.29
4	0.706	22.69	17	1.133	49.07
5	0.711	24.38	18	1.135	52.01
6	0.724	25.84	19	1.180	55.13
7	0.727	27.39	20	1.234	58.44
8	0.742	29.03	21	1.313	61.95
9	0.758	30.78	22	1.344	65.67
10	0.773	32.62	23	1.445	69.61
11	0.789	34.58	24	1.500	73.79
12	0.813	36.66	25	1.664	78.22
13	0.828	38.86	26 (l_{max})	1.984	82.92

A Ağ Genelinde Güç Ataması Yapılabilen Tek Seviyeli Mica Modeli (Per Network Mica Model - Single Level (PNM-SL))

PNM-SL modelinde mevcut güç seviyeleri içerisinde bir seviye (l_{PNM-SL}) seçilerek ağ genelindeki tüm iletişimlerde alıcı ve verici arasındaki mesafeden bağımsız olarak bu seviye kullanılmaktadır. Başka bir deyişle ağdaki her düğüm için önceden belirlenen güç seviyesi kullanılabilen ve tüm çalışma zamanı boyunca seçilen seviye sabit kalmaktadır. Eğer iki düğüm arasındaki mesafe seçilen seviye ile gönderilebilen en uzun mesafeden ($t_r^M(l_{PNM-SL})$) daha uzunsa iletim gerçekleşmemektedir. Bu modelde Şekil 4.9'daki model baz alınmış, iletim menzili ve enerji kısıtı ile ilgili denklemler değiştirilmiştir. Meydana gelen model Şekil 4.10'da verilmektedir.

Amaç: t 'yi maksimize etmek
Kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.50)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij} = \sum_{j \in W} f_{ji} + s_i \cdot t \quad \forall i \in W \quad (4.51)$$

$$E_{rx}^M \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}^M(l_{PNM-SL}) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.52)$$

$$f_{ij} = 0, \text{ Eğer } d_{ij} \geq t_r^M(l_{PNM-SL}) \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.53)$$

Şekil 4.10: PNM-SL güç atama DP modeli.

B Bağlantı Bazında Güç Ataması Yapılabilen Çok Seviyeli Mica Modeli (Per Link Mica Model - Multiple Level (PLM-ML))

PLM-ML modeli bağlantının gerçekleştiği iki düğüm arasındaki mesafeye göre Tablo 4.1’de verilen optimum güç seviyesi ve buna bağlı iletim enerjisinin seçilebilmesine izin vermektedir. Enerjinin sürekli ölçekte ayarlanması söz konusu değildir. Ayrık güç seviyeleri ise sonlu bir küme (S_L) içerisinde seçilmekte, 26 farklı seviye içerisinde seçim yapılabilmektedir. Tanımlanan model Şekil 4.9’daki DP modelini referans almış, iletim menzili ve enerji ile ilgili kısıtlar değiştirilmiştir (Şekil 4.11). Bu modelde her düğüm, veriyi göndereceği düğüme bağlı olarak her bağlantı için farklı güç seviyesi seçebilmekte, dolayısıyla çalışma süresi boyunca bu seviye değişken olmaktadır.

<p>Amaç: t'yi maksimize etmek</p> <p>Kısıtlar:</p> $f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.54)$ $\sum_{j \in V} f_{ij} = \sum_{j \in W} f_{ji} + s_i \cdot t \quad \forall i \in W \quad (4.55)$ $E_{rx}^M \sum_{j \in W} f_{ji} + \sum_{j \in V} f_{ij} E_{tx}^M(l_{opt} - ij) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.56)$ $f_{ij} = 0, \text{ Eğer } d_{ij} \geq t_r^M(l_{max}) \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.57)$ $l_{opt} - ij = \arg \min_{l \in S_L, d_{ij} \leq t_r^M(l)} (E_{tx}^M(l)) \quad (4.58)$

Şekil 4.11: PLM-ML güç atama DP modeli.

Verilen bir d_{ij} mesafesinde iletim için optimum güç seviyesi $l_{opt} - ij$ ile ifade edilmektedir. Örneğin kendisinden 30 m. uzaklıktaki bir j düğüme veri göndermek isteyen i düğümü, Tablo 4.1’e göre $29.03 \text{ m.} \leq d_{ij} \leq 30.78 \text{ m.}$ olduğu için 9. güç seviyesini kullanarak $0.758 \mu J$ enerji harcamaktadır. Aynı düğüm 60 m. uzaklıktaki başka bir düğüme iletim yapmak için 21. güç seviyesini kullanarak $1.313 \mu J$ enerji sarfetmektedir. Çünkü 58.44 m. ile 61.95 m. arasındaki iletim mesafeleri için 21. güç seviyesi optimum enerji tüketimini vermektedir. Bu modelde bir düğümün kullandığı güç seviyesi çalışma süresi boyunca değişebilmekte, hedef düğümün uzaklığına göre belirlenebilmektedir.

C Ağ Genelinde Güç Ataması Yapılabilen Çok Seviyeli Mica Modeli (Per Network Mica Model Multiple Level (PNM-ML))

Ağ genelinde tek bir güç seviyesi seçilebildiği durumda hangi seviyenin en uzun ağ yaşam süresini verdiği, yukarıda açıklanan PNM-SL modelinin her

seviye için ($1 \leq l_{PNM-SL} \leq 26$) ayrı ayrı çalıştırılarak karşılaştırılmasıyla elde edilebilmektedir. Oysaki birden fazla fakat tamamından daha az sayıda güç seviyesi kullanılabilir olduğunda benzer şekilde tek tek deneme yöntemi ile hangi güç seviyesi alt kümesinin optimum ağ yaşam süresini verdiğini bulmak içinden çıkılmaz bir hal almaktadır. Daha verimli bir yöntem olarak Şekil 4.12'de yer alan ve karma tamsayı doğrusal programlama (KTDP) kullanılan PNM-ML modeli geliştirilmiştir. Bu modelde tüm düğümler için "Mümkün olan l sayıda güç seviyesi içerisinde hangi güç seviyeleri kullanıldığında optimum çözüm elde edilir?" sorusuna cevap aranmaktadır. Örneğin 16 güç seviyesi kullanılabilirdiği durumda hangi güç seviyeleri kullanıldığında en uzun ağ yaşam süresi elde edilebilir sorusunu incelemek ve bu 16 seviyeden kaç tanesinin kullanılmasının yeterli olacağını belirlemek bu modelin temel amacını oluşturmaktadır.

Amaç: t 'yi maksimize etmek	
Kısıtlar:	
$g_{ij}^l \geq 0 \quad \forall l \in S_L, \forall (i, j) \in A$	(4.59)
$\sum_{l \in S_L} \sum_{j \in V} g_{ij}^l = s_i t + \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in W} g_{ji}^l \quad \forall i \in W$	(4.60)
$g_{ij}^l = 0, \text{ if } d_{ij} \geq t_r^M(l) \quad \forall l \in S_L \quad \forall (i, j) \in A$	(4.61)
$E_{rx}^M \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in W} g_{ji}^l + \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in V} g_{ij}^l E_{tx}^M(l) \leq e_i \quad \forall i \in W$	(4.62)
$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} g_{ij}^l = h^l \quad \forall l \in S_L$	(4.63)
$h^l \leq M a^l \quad \forall l \in S_L$	(4.64)
$\sum_{l \in S_L} a^l \leq L_{PNM-ML}$	(4.65)

Şekil 4.12: PNM-ML güç atama KTDP modeli.

Bu modelde PNM-SL ve PLM-ML modellerinde veri akışı için kullanılan f_{ij} yerine l . güç seviyesinde i düğümünden j düğümüne veri akışını gösteren g_{ij}^l kullanılmıştır. (4.59), (4.60), (4.61) ve (4.62) numaralı denklemler, kullanılan güç seviyesini gösteren l parametresine göre yeniden düzenlenmiştir. Son üç denklem olan (4.63), (4.64) ve (4.65) ise kullanılan güç seviyesi sayısını (L_{PNM-ML}) sınırlandırmak için tanımlanmıştır. (4.63) tüm güç seviyelerindeki veri akışı miktarlarının toplamını göstermektedir. (4.64)'te kullanılan a^l ikili değişkeni ise güç seviyelerini iki alt gruba bölmektedir. Buna göre l . güç

seviyesinde veri akışı varsa $a^l = 1$, yoksa $a^l = 0$ değerini almaktadır. (4.65) ise kullanılan güç seviyelerini sayarak bir üst sınır getirmektedir. Burada L_{PNM-ML} , kullanılacak güç seviyesi sayısının üst limitini ifade etmektedir. Dikkat çekilmesi gereken bir husus, $L_{PNM-ML} = 1$ seçildiğinde PNM-ML modeli PNM-SL modeline eşdeğer olmaktadır.

D Düğüm Bazında Güç Ataması Yapılabilen Çok Seviyeli Mica Modeli (Per Sensor Mica Model Multiple Level (PSM-ML))

PSM-ML modeli, PNM-ML modeline oldukça benzer şekilde tasarlanmıştır. Bu modelde ağ yerine düğüm bazında "Mümkün olan l sayıda güç seviyesi içerisinde hangi güç seviyeleri kullanıldığında optimum çözüm elde edilir?" sorusuna cevap aranmış ve Şekil 4.13'te verilen KTDP modeli oluşturulmuştur. PNM-ML modelindeki (4.63), (4.64) ve (4.65) no'lu denklemler (4.70), (4.71) ve (4.72) gibi değiştirilmiştir. Örneğin 16 güç seviyesi kullanılabildiği durumda her düğüm için ayrı ayrı hangi güç seviyeleri kullanıldığında en uzun ağ yaşam süresi elde edilebilir sorusu incelenmiş ve bu 16 seviyeden kaç tanesinin kullanılmasının yeterli olacağı belirlenmiştir. Bu durum ağda bulunan farklı düğümlerin bir üst limiti aşmayacak şekilde belli sayıda güç seviyesi kullanması anlamına gelmektedir. Yine bir örnek vermek gerekirse, bu modele göre ağ genelinde 16 güç seviyesi kullanmak mümkün iken 5 güç seviyesi kullanmanın optimum çözümü verdiği durumda, bir düğüm 2., 3., 7., 9. ve 15. güç seviyelerini kullanırken, başka bir düğüm 7., 10., 12., 13. ve 15. güç seviyelerini kullandığında optimum çözüm elde edilebilmektedir.

Burada kullanılan a_i^l ikili değişkeni ise i düğümüne ait güç seviyelerini iki alt gruba bölmektedir. Buna göre i düğümü için l . güç seviyesinde veri akışı varsa $a_i^l = 1$, yoksa $a_i^l = 0$ değerini almaktadır. PNM-ML modelinde ağdaki tüm düğümler için ortak seçilen güç seviyeleri kullanılırken PSM-ML modelinde her düğümde aynı sayıda fakat farklı güç seviyeleri seçilebilmektedir. Başka bir deyişle, ağdaki her düğüm için toplam güç seviyesi sayısı belirlenen limiti geçmemek kaydıyla farklı güç seviyeleri seçilebilmektedir. PSM-ML'in özel bir durumu kullanılabilir güç seviyesi sayısının maksimumuna yani $L_{PSM-ML} = 26$ 'ya eşitlendiği durumdur. Bu durumda PSM-ML, PLM-ML'e eşdeğer olmaktadır.

Bahsi geçen tüm güç atama stratejileri için bant genişliği ihtiyaçlarını araştırmak üzere (4.10) ve (4.15) no'lu denklemler modellere eklenerek Bölüm 4.2'de

Amaç : t 'yi maksimize etmek	
Kısıtlar :	
$g_{ij}^l \geq 0 \quad \forall l \in S_L, \forall (i, j) \in A$	(4.66)
$\sum_{l \in S_L} \sum_{j \in V} g_{ij}^l = s_i t + \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in W} g_{ji}^l \quad \forall i \in W$	(4.67)
$g_{ij}^l = 0, \text{ if } d_{ij} \geq t_r^M(l) \quad \forall l \in S_L \quad \forall (i, j) \in A$	(4.68)
$E_{rx}^M \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in W} g_{ji}^l + \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in V} g_{ij}^l E_{tx}^M(l) \leq e_i \quad \forall i \in W$	(4.69)
$\sum_{j \in V} g_{ij}^l = h_i^l \quad \forall i \in W, \forall l \in S_L$	(4.70)
$h_i^l \leq M a_i^l \quad \forall i \in W, \forall l \in S_L$	(4.71)
$\sum_{l \in S_L} a_i^l \leq L_{PSM-ML} \quad \forall i \in W$	(4.72)

Şekil 4.13: PSM-ML güç atama KTDP modeli.

izlenen yöntem uygulanmıştır. Önce bant genişliğinin yeterince büyük olduğu düşünülerek optimum ağ yaşam süresi bulunmuş, daha sonra bulunan ağ yaşam süresini veren minimum bant genişliği hesaplanmıştır.

4.3.4.2 Yol Kaybının Göz Önüne Alındığı Durum

Bölüm 4.3.4.1 altında, [21]'de verilen güç seviyelerine karşılık iletim enerjileri ve ilgili iletim menzillerini içeren ölçümlerden faydalanarak analiz yapmak üzere MP modelleri tanımlanmıştır. Ancak pratikte, verilen bir güç seviyesi için iletim menzilin bu kadar keskin değişmesi rastlanan bir durum değildir. Aksine bir bit için hata oranının %0 ile %100 arasında olduğu geçişli bir bölge olmalıdır. Örneğin maksimum 50 m.'ye kadar iletim yapabilen bir güç seviyesinde 35 m.'ye gönderilen sinyal seviyesi ile 50 m.'ye gönderilen sinyal seviyesi arasında farklar meydana gelmektedir. Bu durumu göz önüne almak için bir seçenek, Bölüm 4.3.3'te verilen olasılıksal modeli çözüme uyarlamaktır.

Bölüm 4.3.4'de deneysel sonuçlar vasıtasıyla analizler yapılmaya başlandığı için bu bölümde de [22]'de yer alan ve güç seviyeleri, iletim mesafeleri ve PRR değerlerini içeren ölçümler kullanılmıştır. Bu doğrultuda tanımlanan model "Yol kayıplı Mica enerji modeli (Mica energy model with packet loss (Mica-PL)) olarak adlandırılmıştır. Mallinson ve diğerleri [22]'de Mica düğümlerine ait 8

adet güç seviyesi kullanmıştır. Seçilen güç seviyeleri Mica için haberleşmede kullanılan CC2420 yongasında bulunan ve üretim öncesi belirlenmiş değerlerdir [89]. Kullandıkları 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. güç seviyeleri sırasıyla Tablo 4.1'deki 1, 6, 11, 14, 16, 18, 20 ve 21. güç seviyelerine karşılık gelmektedir. Bahsi geçen 8 güç seviyesi S_{PL} kümesi ile ifade edilmektedir. Her güç seviyesi için, alıcı ve verici arasındaki mesafe 5'er m.'lik aralıklarla 65 m.'ye kadar ele alınmış ve ölçülen PRR değerleri kaydedilmiştir. Böylece 13 farklı d_k mesafesi ($d_1 = 5$ m. ve $d_{13} = 65$ m.) ve 8 iletim gücü seviyesi için ölçülen PRR değerleri (χ_{ik}^M) Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Mica-PL enerji modelinde d_k (m) ve güç seviyesinin (PL) bir fonksiyonu olarak PRR (χ_{ik}^M) değerleri.

d_k	PL-1	PL-2	PL-3	PL-4	PL-5	PL-6	PL-7	PL-8
5 m.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10 m.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15 m.	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20 m.	0.0	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
25 m.	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
30 m.	0.0	0.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
35 m.	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9	0.8	0.6	0.9
40 m.	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0
45 m.	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50 m.	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	1.0	1.0	1.0
55 m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.0	1.0	1.0
60 m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	1.0	1.0
65 m.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.3

Ölçümlerin açık alanda gerçekleştiği, arazinin bir bölümünde bazı engebelerin (*örneğin*, 35-40 metre mertebesinde hafif bir tepe) görüldüğü, bunların veriyi düzensiz hale getirdiği not edilmiştir. Buna rağmen verilerdeki genel eğilim beklentiler ile örtüşmektedir (*yani*, mesafenin artması ile PRR düşmekte, aynı mesafede yüksek güç seviyeleri ile düşük olanlara kıyasla daha yüksek PRR değerleri elde edilmektedir). Bu nedenle, Bölüm 4.3.3'de olduğu gibi paket kayıplarını telafi etmek için veri akışları $\lambda_{ik}^M = \frac{1}{\chi_{ik}^M}$ ile ölçeklenmeli başka bir deyişle kayıpla orantılı sayıda tekrar gönderilmelidir. Takip eden bölümlerde Bölüm 4.3.4.1'de ele alınan 4 adet MP modeli değiştirilerek Mica-PL enerji modelleri oluşturulmuştur.

A Ağ Genelinde Güç Ataması Yapılabilen Tek Seviyeli Yol Kayıplı Mica Modeli (Per Network Mica Model Single Level (PNM-SL-PL))

DP kullanılarak oluşturulan yol kayıplı PNM-SL modeli, Şekil 4.10'da verilen modeli baz alarak oluşturulmuştur. (4.52) ve (4.53) no'lu denklemler (4.73) ve (4.74)'deki gibi değiştirilmiştir. İletim yapılabilecek en uzun mesafe (t_r^{M-PL}) 65 m. ve mesafeler 5'er metrelik aralıklarla ($\widehat{d}_{ji} = 5 \times \lceil \frac{d_{ji}}{5} \rceil$) ele alınmıştır. Burada kullanılan $\lambda_{PNM-SL, \widehat{d}_{ij}}^M$, seçilen güç seviyesi ve ilgili mesafede paketin yeniden gönderilme sayısını göstermektedir.

$$f_{ij} = 0, \text{ Eğer } d_{ij} > t_r^{M-PL} \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.73)$$

$$E_{rx}^M \sum_{j \in W} \lambda_{PNM-SL, \widehat{d}_{ij}}^M f_{ji} + \sum_{j \in V} \lambda_{PNM-SL, \widehat{d}_{ji}}^M f_{ij} E_{tx}^M(l_{PNM-SL}) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.74)$$

B Bağlantı Bazında Güç Ataması Yapılabilen Çok Seviyeli Yol Kayıplı Mica Modeli (Per Link Mica Model Multiple Level (PLM-ML-PL))

Yol kayıplı PLM-ML modeli, yukarıda tanımlanan $PNM-SL-PL$ modeline oldukça benzemektedir. Aradaki tek fark (4.74) no'lu denklem yerine (4.75) no'lu denklemin kullanılmasıdır. Mica-PL modelinde i düğümünden j düğümüne iletim için kullanılması gereken optimum güç seviyesi ($loptPL - ij$) (4.76) no'lu denklem yardımıyla bulunmaktadır.

$$E_{rx}^M \sum_{j \in W} \lambda_{loptPL-ji, \widehat{d}_{ji}}^M f_{ji} + \sum_{j \in V} \lambda_{loptPL-ij, \widehat{d}_{ij}}^M f_{ij} E_{tx}^M(loptPL - ij) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.75)$$

$$loptPL - ij = \arg \min_{l \in S_{PL}} \left(E_{tx}^M(l) \lambda_{l, \widehat{d}_{ij}}^M \right) \quad (4.76)$$

C Ağ Genelinde Güç Ataması Yapılabilen Çok Seviyeli Yol Kayıplı Mica Modeli (Per Network Mica Model Multiple Level (PNM-ML-PL))

KTDP kullanılan yol kayıplı PNM-ML modeli, Şekil 4.12’de verilen model baz alınarak oluşturulmuştur. (4.61) ile (4.65) arasındaki denklemler (4.77) ile (4.81) arasındaki denklemler ile değiştirilmiştir.

$$g_{ij}^l = 0, \text{ Eğer } d_{ij} > t_r^{M-PL} \quad \forall l \in S_{PL} \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.77)$$

$$E_{rx}^M \sum_{l \in S_{PL}} \sum_{j \in W} \lambda_{l, d_{ij}}^M g_{ji}^l + \sum_{l \in S_{PL}} \sum_{j \in V} \lambda_{l, d_{ij}}^M g_{ij}^l E_{tx}^M(l) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.78)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} g_{ij}^l = h^l \quad \forall l \in S_{PL} \quad (4.79)$$

$$h^l \leq M a^l \quad \forall l \in S_{PL} \quad (4.80)$$

$$\sum_{l \in S_{PL}} a^l \leq L_{PNM-ML} \quad (4.81)$$

D Düğüm Bazında Güç Ataması Yapılabilen Çok Seviyeli Yol Kayıplı Mica Modeli (Per Sensor Mica Model Multiple Level (PSM-ML-PL))

Yol kayıplı PSM-ML modeli, *PNM-SL-PL* modelinin değiştirilmesiyle elde edilmiştir. (4.79), (4.80) ve (4.81) no’lu denklemler yerine (4.82), (4.83), ve (4.84) no’lu denklemler kullanılmıştır.

$$\sum_{j \in V} g_{ij}^l = h_i^l \quad \forall i \in W, \quad \forall l \in S_{PL} \quad (4.82)$$

$$h_i^l \leq M a_i^l \quad \forall i \in W, \quad \forall l \in S_{PL} \quad (4.83)$$

$$\sum_{l \in S_{PL}} a_i^l \leq L_{PSM-ML} \quad \forall i \in W \quad (4.84)$$

Yol kayıplı güç atama stratejilerinde bant genişliği analizi için (4.10) ve (4.15) no’lu denklemler aşağıdaki gibi adapte edilerek modellere eklenmiş ve Bölüm 4.2’de izlenen yöntem uygulanmıştır. Önce bant genişliğinin yeterince büyük bir değeri için en yüksek ağ yaşam süresi bulunmuş, daha sonra bulunan ağ yaşam süresini veren minimum bant genişliği hesaplanmıştır.

$$I_{jl}^i = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } \gamma t_r^M(l) \geq d_{ij} \text{ ve } i \neq j \text{ ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.85)$$

$$\sum_{l \in S_L} \sum_{j \in W} \lambda_{ji}^l x_{ji}^l + \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in V} \lambda_{ij}^l x_{ij}^l + \sum_{l \in S_L} \sum_{j \in W} \sum_{k \in V} \lambda_{jk}^l x_{jk}^l I_{jl}^i \leq B \times t \quad \forall i \in V \quad (4.86)$$

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde; girişim ve bant genişliği kısıtları, ayrık iletim gücü ve güç atama stratejileri konularında Bölüm 4'te tanımlanan MP modellerinin GAMS modelleme aracı vasıtasıyla çözdürülmesi sonucunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara ilişkin değerlendirmeler paylaşılmıştır. Yapılan analizler sırasında 1-boyutlu ve 2-boyutlu ağ topolojileri kullanılmıştır. İncelenen ağlar genel olarak 1 adet baz istasyonu ve N adet algılayıcı düğümden meydana gelmektedir. 1-boyutlu topolojide algılayıcı düğümler birbirine eşit mesafede (d_{ij}) çizgisel bir hat üzerinde yer alırken 2-boyutlu topolojide merkezde yer alan baz istasyonunun çevresinde yarıçapı R_{net} olan dairesel bir alanda rastgele dağıtılarak yerleştirilmiştir. Rastgele dağıtma işlemi için (5.1), (5.2), (5.3) ve (5.4) no'lu denklemlerde tanımlanan yöntem kullanılmıştır.

$$\theta = 360 * uniform(0, 1) \quad (5.1)$$

$$R_{rand} = R_{net} * \sqrt{uniform(0, 1)} \quad (5.2)$$

$$x(i) = R_{rand} * \cos(\theta) \quad (5.3)$$

$$y(i) = R_{rand} * \sin(\theta) \quad (5.4)$$

Burada *uniform* fonksiyonu 0 ile 1 arasında rastgele bir değer üretmektedir.

R_{rand} , ağın yayılım yüzeyinin yarıçapı olan R_{net} içerisinde kalacak şekilde rastgele seçilen yarıçap değerini, $x(i)$ i düğümüne ait x eksenindeki koordinatı, $y(i)$ de i düğümüne ait y eksenindeki koordinatı göstermektedir. 2-boyutlu topolojilerde problem 100 ila 1000 arasında değişen sayılarda, her seferinde yukarıdaki denklemler kullanılarak rastgele dağıtma işlemi yapıldıktan sonra çözdürülmüş ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu nedenle 2-boyutlu topolojilere ait grafiklerde sonuçların standart sapmaları da çizdirilmiştir.

MP modellerinin çözümü GAMS [83] modelleme aracı ile elde edilirken ilgili sonuçların çizdirilmesi amacıyla MathWorks firmasının MATLAB [86] isimli programından faydalanılmıştır.

Yapılan analizlerde bazı parametrelerin farklı değerlerinin sonuca etkileri incelenirken Mica düğümlerine ait bazı parametreler tüm analizlerde sabit olarak kullanılmıştır. Bu sabitlerin aldıkları değerler Tablo 5.1'de sıralanmıştır.

Tablo 5.1: Analizlerde Ortak Kullanılan Sabitler

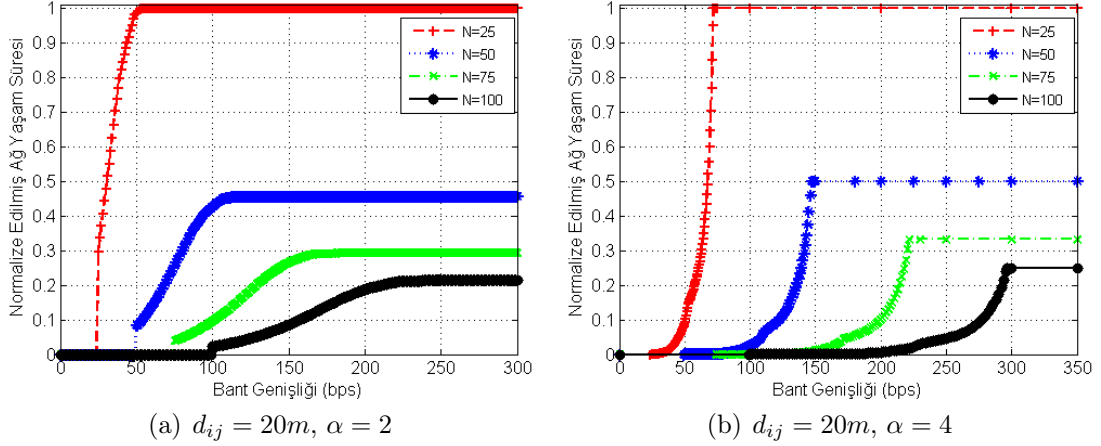
Sabit	Değeri	Açıklama
ρ	50 nJ	Elektronik devrenin enerji tüketimi
ε	100 pJ	Vericinin verimliliği
α	2 ve 4	Yol kaybı katsayısı
e_i	1 J	Zaman modelinde düğümlerin başlangıç enerjisi
t	1 sn	Enerji modelinde ağın verilen yaşam süresi

5.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Girişim ve Bant Genişliği Analizi

5.1.1 Doğrusal Programlama Zaman Modeli ile Yapılan Analizler

Bu bölümde ilk olarak girişim ve bant genişliği kısıtlarının ağ yaşam süresine etkileri incelenmiştir. Şekil 4.5'te verilen DP modeli, 1-boyutlu topolojide farklı düğüm sayıları (N), düğümler arası mesafe (d_{ij}), yol kaybı katsayısı (α) ve girişim faktörü (γ) için çözülmüştür. İletim menzilin (t_r) etkileri enerji modeli ile yapılan analizlerde incelenecek olup bu bölümde iletim mesafesi kısıtı göz ardı

edilmiştir ($t_r \rightarrow \infty$).



Şekil 5.1: Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğüm sayıları (N) ve $\gamma = 1.0$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).

Şekil 5.1'de Bölüm 4.2'de verilen zaman modeli farklı bant genişliği değerleri için çözdürülmüştür. Bütün sonuçlar, tüm düğüm sayıları içerisinde elde edilebilen en iyi yaşam süresi (burada $N = 25$ durumunda) ile normalize edilmiştir. Model, hem boşluk yayılma modeli ($\alpha = 2$), hem de çoklu yol yayılma modeli ($\alpha = 4$) için incelenirken ilk etapta iletim menzili ile girişim menzilinün aynı olduğu durum ($\gamma = 1$) ele alınmıştır. Her iki durumda da kullanılabilen ağ genişliğinin bir üst, bir de alt limiti bulunmaktadır. Sıfırdan başlayarak bant genişliği arttırılmaya başlandığında belli bir eşik değere (alt limit) gelene kadar ağ yaşam süresi "0" olmakta, yani problem çözülememektedir. Bu durum, her düğümün saniyede 1 bit veri ürettiği ($s_i = 1 \text{ bps}$) göz önüne alındığında kullanılan düğüm sayısı miktarınca bant genişliğinin kullanılabilir olmaması ile ilgilidir. Örneğin Şekil 5.1(a) ve 5.1(b)'de $N = 25$ için bant genişliği 25 olana dek çözüm bulunamamaktadır. Diğer bir ifadeyle; en az bir düğümde üretilen veri, yeterli bant genişliği bulunmadığı için baz istasyonuna aktarılamamaktadır. Düğüm sayısı değiştiğinde bant genişliğinin alt limiti de aynı oranda değişmektedir. Dolayısıyla alt limitin belirlenmesi her düğümün doğrudan baz istasyonuna iletim yapabildiği durumda saniyede üretilen bit sayısının düğüm sayısı ile çarpılması ile bulunmaktadır.

Her iki şekildeki bir diğer ortak nokta ise bant genişliğinin belli bir üst limiti geçtikten sonra artmasının ağ yaşam süresi üzerinde herhangi bir etkisinin kalmamasıdır. Üst limit yine düğüm sayısına göre değişiklik göstermekle birlikte belirlenmesi alt limitte olduğu kadar kolay olmamaktadır. Bu durum bir Minimum-Maksimum (MinMax) problemi olarak ele alınmış ve ilk olarak bant

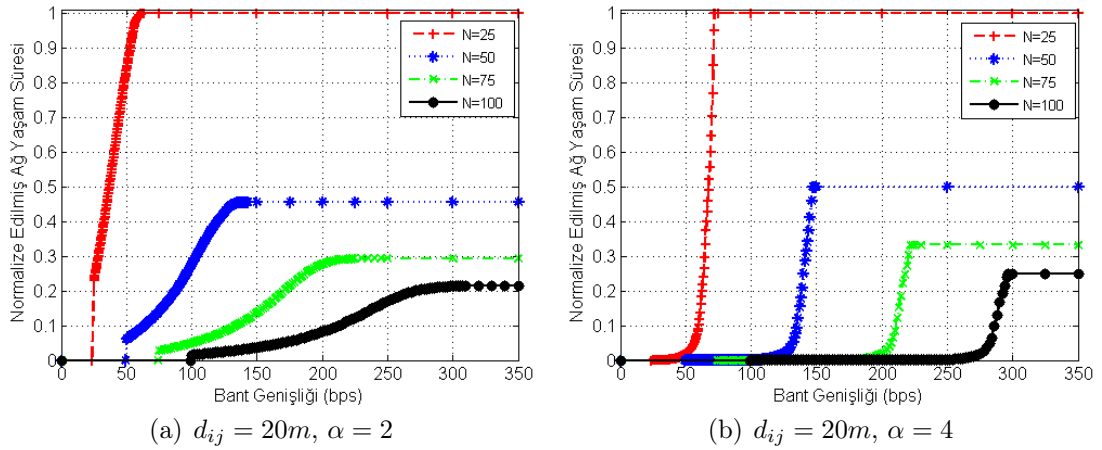
genişliği sınırsız kabul edilerek DP çözümünü veren en uzun ağ yaşam süresi elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen ağ yaşam süresi sabit olarak yerine konulup bu ağ yaşam süresini sağlayan bant genişliği minimize edilmiştir.

Genel itibariyle Şekil 5.1’de elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Beklenildiği gibi düğüm sayısı arttıkça ağ yaşam süresi kısalmaktadır.
- Bant genişliği ile ağ yaşam süresi arasında, bant genişliği için belirlenen alt limit ve üst limitler içerisinde doğru orantılı bir ilişki vardır. Bant genişliği arttıkça ağ yaşam süresi de artmaktadır.
- Bant genişliğinin alt limitine ulaşana kadar problem çözülememektedir. Bunun nedeni mevcut bant genişliğinin tüm düğümlerin ürettiği verileri taşımak için yetersiz kalmasıdır. Her düğüm doğrudan baz istasyonuna iletim yapabildiği durumda alt limit tam olarak düğümlerde saniyede üretilen veri miktarı ile düğüm sayısı çarpılarak elde edilmektedir.
- Bant genişliğinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkisi, belirlenen üst limitten itibaren anlamını kaybetmektedir. Başka bir deyişle bir noktadan itibaren, daha fazla bant genişliği olması ağ yaşam süresi üzerinde iyileşme sağlamamaktadır. Dolayısıyla ile bant genişliğinin üst limiti optimum ağ yaşam süresini elde etmek gereken minimum bant genişliğini ifade etmektedir.
- Düğüm sayısı arttıkça optimum ağ yaşam süresi için gerekli minimum bant genişliği miktarı da artmaktadır. Aynı zamanda bant genişliğinin alt limiti ile üst limiti arasındaki değişim daha yumuşak hale gelmektedir.
- Radyo yayılma modeli açısından bakıldığında boşluk yayılma modelinde ($\alpha = 2$) ağ yaşam süresi, çoklu yol yayılma modeline ($\alpha = 4$) göre daha keskin artmakta, diğer bir ifadeyle belirlenen bant genişliği üst limitine daha çabuk ulaşmaktadır. Dolayısıyla bant genişliği, ağ yaşam süresi üzerinde çoklu yol yayılma modelinde boşluk yayılma modeline kıyasla daha geniş bir etkiye sahiptir. Örneğin boşluk yayılma modelinde $N = 50$ için bant genişliğinin $[50, 116.9]$ bps değerleri arasında etkili iken çoklu yol modelinde etkili olduğu bölge $[50, 146.8]$ bps aralığıdır. Buna göre optimum ağ yaşam süresinin elde edilmesi için çoklu yol yayılma modelinin minimum bant genişliği ihtiyacı boşluk yayılma modelinin ihtiyacından fazladır.

- Yayılma modellerinin ağ yaşam süresi açısından değişim örüntüleri birbiriyle zıt değişim göstermektedir. Boşluk yayılma modelinde alt limite yakın değerlerde üssel, üst limite yakın değerlerde doğrusal bir değişim izlenirken çoklu yol yayılma modelinde aksine alt limite yakın değerlerde doğrusal, üst limite yakın değerlerde üssel değişim görülmektedir. Bununla birlikte aynı düğüm sayıları ve bant genişliği değerleri için boşluk yayılma modeli ile, çoklu yol yayılma modeline kıyasla çok daha uzun ağ yaşam süresi elde edilebilmektedir. Örneğin $N = 25$ ve $B = 100$ bps için çoklu yol yayılma modeline kıyasla 164 kat daha uzun ağ yaşam süresi elde edilebilmektedir.

Benzer analizler girişim menziline iletim menziline büyük olduğu durum ($\gamma > 1$) için yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



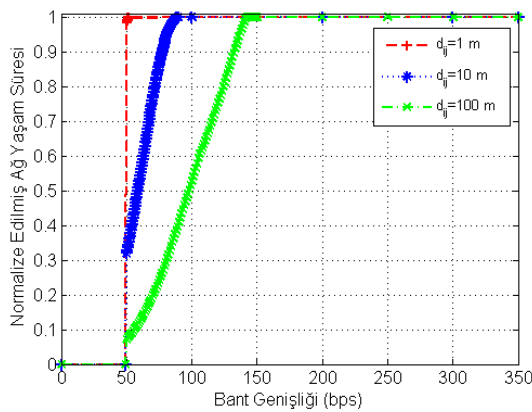
Şekil 5.2: Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğüm sayıları (N) ve $\gamma = 1.7$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).

Alınan sonuçlar Şekil 5.1’de elde edilen sonuçlar ile paralel eğilim göstermekle birlikte yapılan ilave değerlendirmeler aşağıda listelenmiştir:

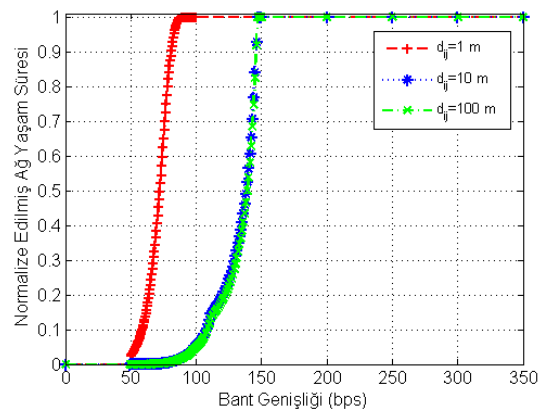
- Girişim menziline iletim menziline büyük olduğu durumlarda ($\gamma > 1$), eşit olduğu duruma kıyasla bant genişliğinin alt limiti ile üst limiti arasındaki fark açılmaktadır. Başka bir deyişle bant genişliğinin ağ yaşam süresi üzerinde etkili olduğu aralık büyümektedir. Aynı zamanda iki limit arasında daha yumuşak bir geçiş görülmektedir. Örneğin Şekil 5.1(a)’da $N = 75$ için bant genişliği $[75, 182.23]$ bps aralığında ağ yaşam süresini etkilerken, Şekil 5.2(a)’da bu aralık $[75, 224.58]$ bps şeklinde gerçekleşmektedir.

- Daha büyük girişim faktörü (γ) değerlerinde optimum ağ yaşam süresi elde etmek için gereken minimum bant genişliği daha fazla olmaktadır. Örneğin $N = 25$ ve $\gamma = 1.0$ için optimum sonucu veren minimum bant genişliği 53 bps iken $\gamma = 1.7$ için 63 bps olmaktadır.
- Esasen düğümler arasındaki mesafe sabit ve düğümler çizgisel bir hat üzerinde sıralandıkları için belirlenen topolojide $\gamma = 1.7$ olduğu durumda elde edilen en uzun ağ yaşam süreleri $\gamma = 1.0$ durumu ile birbirine eşittir. Ancak bant genişliğinin yeterli olmadığı durumlar kıyaslandığında aynı bant genişliği değerinde $\gamma = 1.0$ için elde edilen ağ yaşam süresi $\gamma = 1.7$ olduğu duruma kıyasla daha fazla olmaktadır. Örneğin $N = 100$ için bant genişliğinin 150 bps olduğu durumda $\gamma = 1.0$ için ağ yaşam süresi 34959 sn iken $\gamma = 1.7$ için 15240 sn olarak gerçekleşmektedir.

Ardından düğüm sayısı sabitlenerek farklı düğümler arası mesafeler için durum incelenmiştir. Şekil 5.3 seçilen üç farklı mesafe için elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu kez sonuçlar, tüm düğümler arası mesafe değerleri içerisinde elde edilebilen en iyi ağ yaşam süresi ile normalize edilmek yerine her d_{ij} değeri için elde edilebilen en iyi ağ yaşam süresi ile kendi içerisinde normalize edilmiştir. Yani $d_{ij} = 1 m$ için elde edilen sonuçlar $d_{ij} = 1 m$ için elde edilebilen en iyi ağ yaşam süresi ile, $d_{ij} = 10 m$ için elde edilen sonuçlar da $d_{ij} = 10 m$ için elde edilebilen en iyi ağ yaşam süresi ile normalize edilmiştir.



(a) $N = 50, \alpha = 2$



(b) $N = 50, \alpha = 4$

Şekil 5.3: Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğümler arası mesafeler (d_{ij}) ve $\gamma = 1.0$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).

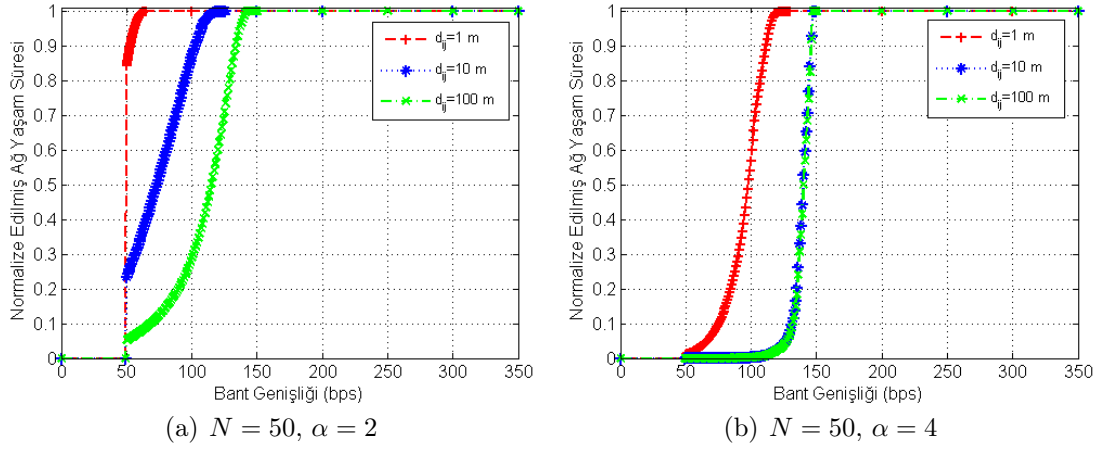
Sonuçlarla ilgili daha önce yapılan genel değerlendirmelere eklenen yorumlar

aşağıda sıralanmıştır:

- Farklı düğümler arası mesafe değerleri için bant genişliği ile ağ yaşam süresi arasında alt ve üst limit içerisinde doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır.
- Normalize edildiği için her ne kadar şekillerde görünmese de, elde edilen numerik sonuçlara göre beklenildiği gibi düğümler arası mesafe arttıkça ağ yaşam süresi azalmaktadır. Düğümler arası iletim sırasında harcanan enerji d_{ij} ile üssel olarak değiştiği için ağ yaşam süresi belirgin şekilde azalmaktadır.
- Genel olarak düğümler arasındaki mesafe arttıkça bant genişliğinin ağ yaşam süresi üzerinde etkili olduğu bölge genişlemektedir. Örneğin Şekil 5.3(a)'da $d_{ij} = 1$ m için bu aralık $[50, 51.96]$ bps iken $d_{ij} = 10$ m için ise $[50, 89.96]$ bps olmaktadır. Düğümler arası mesafe yeteri kadar arttığında (Şekil 5.3(b)'de olduğu gibi) ağ yaşam süresi üzerindeki etkisini kaybetmektedir. Dolayısıyla düğümler arası mesafe arttıkça optimum ağ yaşam süresi için gereken minimum bant genişliği ihtiyacı da artmaktadır.
- Radyo yayılım modelleri karşılaştırıldığında, boşluk yayılma modelinde elde edilen ağ yaşam süreleri çoklu yol yayılma modeline göre bir hayli fazla olmaktadır. En çarpıcı örnek, Şekil 5.3(a)'da $d_{ij} = 100$ m için elde edilen ağ yaşam süresi Şekil 5.3(b)'de elde edilen yaşam süresinin tam olarak 9619 katıdır.

Girişim menziline etkilerini incelemek üzere benzer incelemeler $\gamma = 1.7$ için tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar yine her d_{ij} için kendi içerisinde normalize edilmiştir. Şekil 5.4'te yer alan sonuçlar doğrultusunda yapılan ilave değerlendirmeler aşağıda yer almaktadır:

- Girişim faktörünün 1'den büyük olduğu ($\gamma > 1$) durumlarda, $\gamma = 1$ olduğu duruma kıyasla bant genişliğinin ağ yaşam süresi üzerinde etkili olduğu bölge genişlemektedir. Diğer bir deyişle bant genişliğinin alt limiti ile üst limiti arasındaki geçiş daha geniş bir alana yayılmaktadır. Örneğin Şekil 5.3(a)'da $d_{ij} = 10$ m için bant genişliği $[50, 89.6]$ bps aralığında ağ yaşam süresi üzerinde etkili olurken, Şekil 5.4(a)'da bu aralık $[50, 146.81]$ bps şeklinde gerçekleşmektedir.

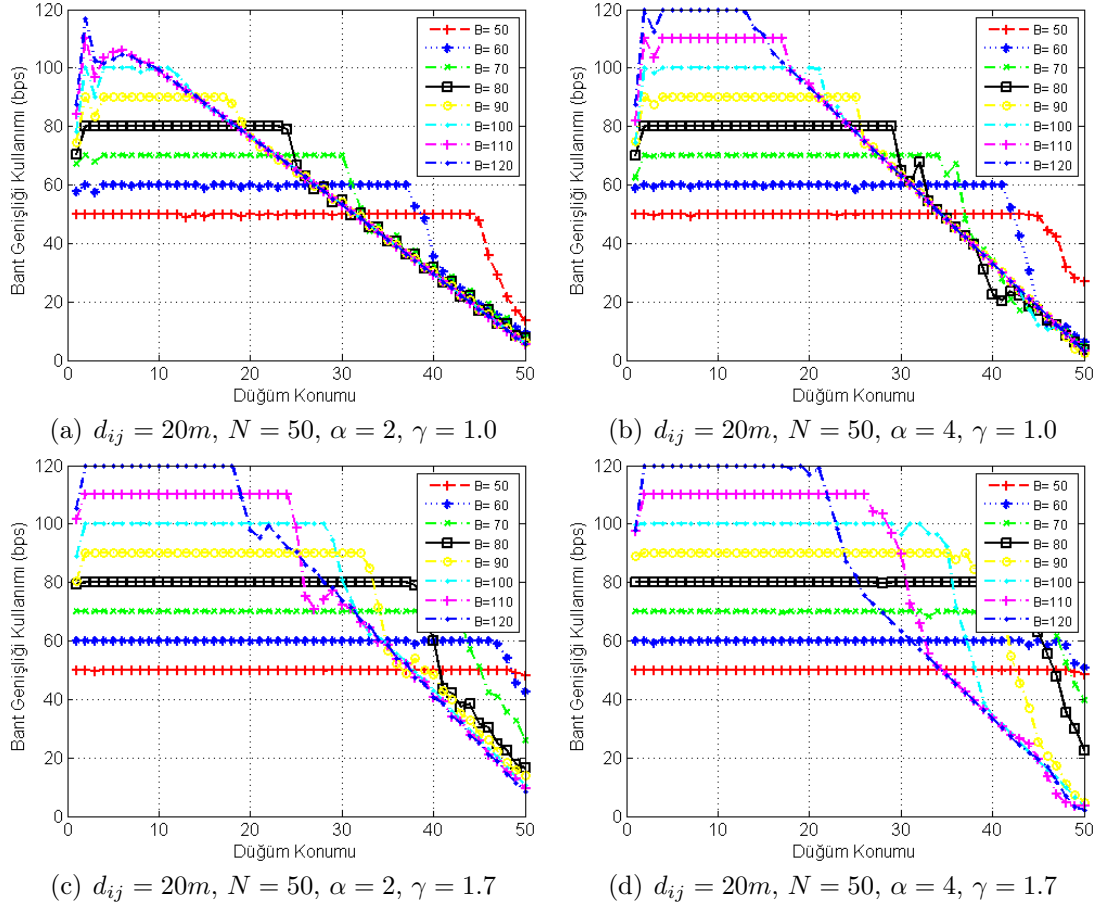


Şekil 5.4: Kullanılabilen bant genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak farklı düğümler arası mesafeler (d_{ij}) ve $\gamma = 1.7$ için normalize edilmiş ağ yaşam süresi (t).

- Girişim faktörü arttıkça optimum ağ yaşam süresi elde edebilmek için gereken minimum bant genişliği miktarı da artmaktadır. Örneğin $d_{ij} = 10 m$ ve $\gamma = 1.0$ için optimum çözümü veren minimum bant genişliği 90 bps iken $\gamma = 1.7$ için 126 bps olmaktadır.
- Belirlenen topoloji için $\gamma = 1.7$ olduğu durumda elde edilen ağ yaşam süreleri $\gamma = 1.0$ durumu ile birbirine eşittir. Ancak bant genişliğinin yeterli olmadığı durumlar kıyaslandığında aynı bant genişliği değerinde $\gamma = 1.0$ için elde edilen ağ yaşam süresi $\gamma = 1.7$ olduğu duruma kıyasla daha fazla olmaktadır. Örneğin $N = 100$ için bant genişliğinin 150 bps olduğu durumda $\gamma = 1.0$ için ağ yaşam süresi 34959 sn iken $\gamma = 1.7$ için 15240 sn olarak gerçekleşmektedir.

Zaman modeliyle yapılan son analizlerde ağdaki düğümlerin konumları itibariyle bant genişliği ihtiyaçları kıyaslanmıştır. Böylece ağda bant genişliği açısından dar boğaza sebep olan düğümler ile ilgili yorum yapmak mümkün olacaktır. Şekil 5.5'te sabit düğüm sayısı altında düğüm konumunun bir fonksiyonu olarak bant genişliği kullanımları gösterilmektedir. 0 no'lu düğüm baz istasyonu, 1 no'lu düğüm baz istasyonuna en yakın, 50 no'lu düğüm baz istasyonuna en uzak düğüm olmak üzere, farklı kullanılabilir bant genişliği (B) miktarlarında hangi düğümün ne kadar bant genişliği tükettiği çizdirilmiştir.

Alınan sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:



Şekil 5.5: Ağdaki düğümlerin konumları itibariyle bant genişliği kullanımları.

- Her durumda baz istasyonuna daha yakın olan düğümler uzak olan düğümlere göre daha fazla bant genişliği kullanmaktadır.
- Baz istasyonuna daha yakın düğümlerin daha fazla bant genişliği tüketmesi, uzak olan düğümlerin verilerini de baz istasyonuna aktarmalarından kaynaklanmaktadır. Daha önce belirtildiği üzere çoklu atlamalı iletim doğrudan iletme göre daha iyi sonuçlar vermektedir. 1-boyutlu topolojide çoklu iletim sırasında en fazla yük baz istasyonuna yakın düğümlerde meydana gelmektedir. Dolayısıyla baz istasyonuna yakın olan düğümler enerji tüketiminde dar boğaz oluşturmaktadır.
- Radyo yayılım modelleri kıyaslandığında, boşluk yayılma modelinde kullanılabilir maksimum bant genişliğine ihtiyaç duyan düğüm sayısı, çoklu yol yayılma modeline göre daha azdır. Başka bir deyişle çoklu yol modelinde daha fazla sayıda düğüm yüksek miktarda bant genişliği tüketmektedir. Örneğin $B = 90$ için Şekil 5.5(a)'da 2 ile 17 no'lu düğümler arasındaki

16 düğüm kullanılabilen maksimum miktarda bant genişliği (90 bps) kullanırken, Şekil 5.5(b)'de 2 ile 25 no'lu düğümler arasındaki 24 adet düğüm yüksek miktarda bant genişliği (90 bps) tüketmektedir.

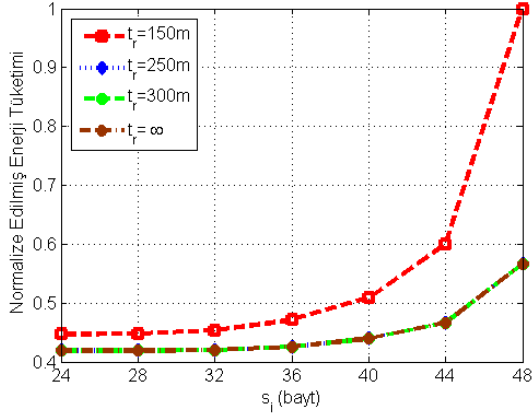
- Benzer şekilde daha yüksek girişim faktörü değerlerinde kullanılabilen maksimum miktarda bant genişliği tüketen düğüm sayısı artmaktadır. Örneğin Şekil 5.5(b)'de $B = 80$ ve $\gamma = 1.0$ için 2 ile 29 no'lu düğümler arasındaki 28 düğüm, Şekil 5.5(d)'de $\gamma = 1.7$ için ise 1 ile 39 no'lu düğümler arasındaki 39 düğüm yüksek miktarda bant genişliği tüketmekte ve enerji tüketimi açısından dar boğaza sebep olmaktadır.

5.1.2 Doğrusal Programlama Enerji Modeli ile Yapılan Analizler

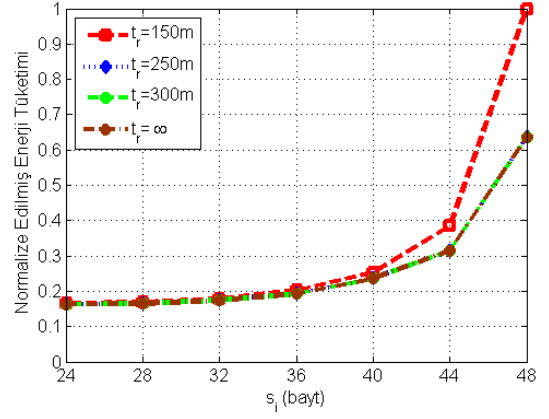
Bölüm 5.1.1'de zaman modeliyle yapılan analizlerin ardından bu bölümdeki analizler için Şekil 4.6'da verilen enerji modeli kullanılmıştır. Yapılan analizlerde 2-boyutlu ağ topolojisi kullanılmış olup düğümler baz istasyonu etrafında rastgele dağıtılmıştır. Her seferinde farklı konumlandırılan düğümler için verilen DP modeli 100 defa çözdürülmüş, elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. İlk olarak KAA'ların enerji tüketimi ve bant genişliği ihtiyaçlarını etkileyen çeşitli sistem parametrelerini incelemek üzere enerji modeli farklı t_r , R_{net} ve α değerleri için çözdürülmüş ve elde edilen normalize edilmiş enerji tüketim değerleri s_i 'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Normalizasyon işlemi, tüm enerji tüketim değerlerinin her alt şekilde elde edilen en yüksek tüketime bölünmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm enerji tüketim değerleri, farklı s_i değerlerinde birbiriyle uyumlu olması için bit başına harcanan enerjiyi ifade etmektedir. Mica düğümleri için kullanılabilen kanal bant genişliği 19.2 kbps kabul edilmiş olup bu değer tüm düğümler için toplam 2400 bayta karşılık gelmektedir. Analizlerin 50 düğümden oluşan ağ için yapıldığı düşünüldüğünde her düğümün eşit kullanması halinde düğüm başına kullanılabilir bant genişliği 48 bayt olmaktadır. Paket başlık büyüklükleri 20 bayt kabul edildiği için analizler $s_i = 24$ ile $s_i = 48$ bayt arasında yapılmıştır.

Sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda listelenmiştir:

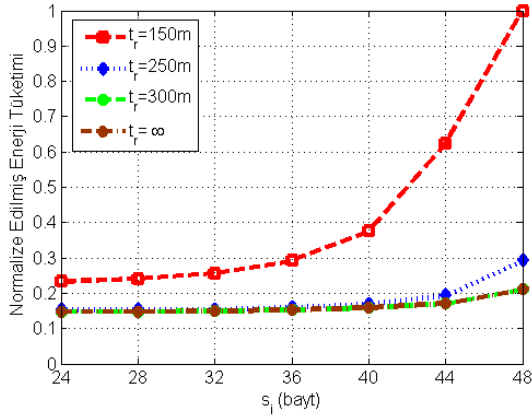
- Her algılayıcı düğümde üretilen veri miktarı (s_i) arttıkça genel eğilim olarak



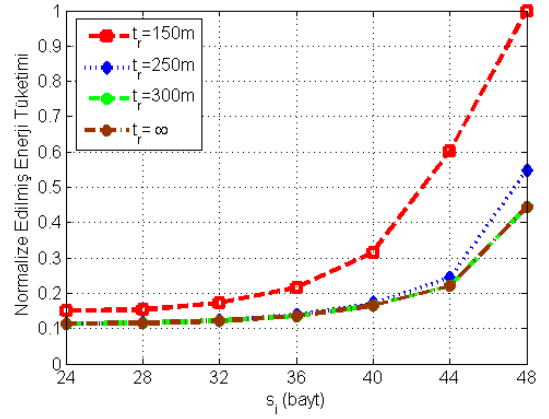
(a) $R_{net} = 200m, \alpha = 2$



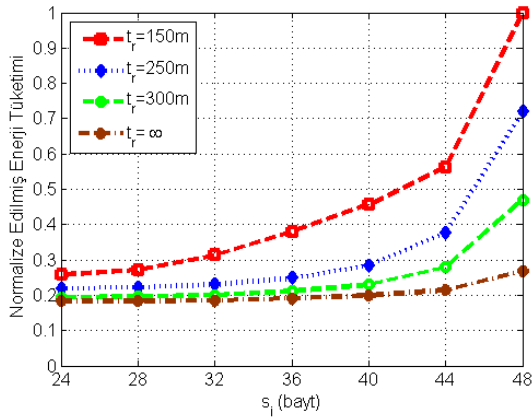
(b) $R_{net} = 200m, \alpha = 4$



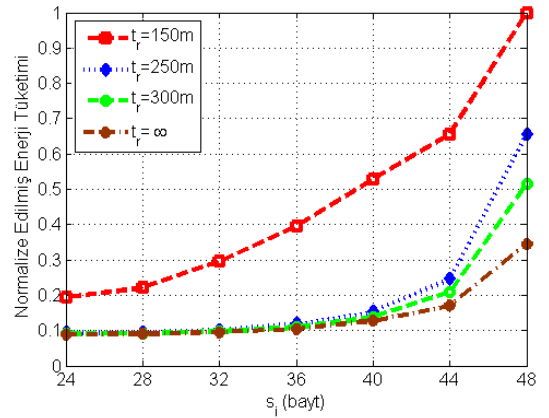
(c) $R_{net} = 300m, \alpha = 2$



(d) $R_{net} = 300m, \alpha = 4$



(e) $R_{net} = 400m, \alpha = 2$



(f) $R_{net} = 400m, \alpha = 4$

Şekil 5.6: $N = 50$ ve $\gamma = 1.7$ olduğu durumda farklı iletim menzili(t_r), girişim faktörü (γ) ve yol kaybı katsayısı (α) için s_i 'nin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş enerji tüketimi.

enerji tüketim değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni baz istasyonuna iletilecek toplam veri miktarı arttıkça enerji tüketiminin düğümler arasında dengelenmesini sağlayan bazı bağlantıların kullanılmamasıdır. Örneğin Şekil 5.6(e)'de $R_{net}=400$ m, $t_r = 250$ m, $\gamma = 1.7$, ve $\alpha = 2$ durumunda $s_i = 24$, $s_i = 32$ ve $s_i = 48$ için normalize edilmiş enerji tüketimleri sırasıyla 0.22, 0.25 ve 0.72 şeklindedir.

- Enerji sarfiyatı artmaya başlamadan önce, iletilecek toplam veri miktarının belli bir eşik değerine ulaşana kadar sabit kalmaktadır. Bu durum, o eşik değere ulaşana kadar enerji tüketimini dengeleyen bağlantıların halen kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bu noktadan itibaren iletilecek veri miktarı arttıkça harcanan enerji miktarı da artmaktadır. Örneğin $R_{net}=200$ m, $t_r = 150$ m, $\gamma = 1.7$ ve $\alpha = 2$ (Şekil 5.6(a)) durumunda normalize edilmiş enerji tüketimi $s_i \leq 32$ için 0.45 seviyesinde sabit kalmakta, bu noktadan itibaren artışa geçmektedir.
- Bazı durumlarda başlangıçta enerji tüketiminin sabit kaldığı davranış izlenmemektedir. Bunun sebebi daha başlangıçta ($s_i = 24$ olduğu durumda) bile, en düşük veri üretim oranı için talep edilen bant genişliği miktarının belirlenen eşik değerden fazla olması nedeniyle optimum olmayan bazı bağlantıların kullanılmasıdır. Örneğin Şekil 5.6(c)'de $t_r = 150$ m için bu durum gözlenmektedir.
- İletim menzilinin enerji tüketimi üzerinde önemli derecede etkisi bulunmaktadır. Özellikle daha yüksek s_i değerlerinde daha düşük iletim menzillerinin daha fazla enerji tükettiği görülmektedir. Örneğin $R_{net}=400$ m, $\gamma = 1.7$, $\alpha = 2$ ve $s_i = 24$ bayt olduğunda $t_r = 150$ m, $t_r = 250$ m, $t_r = 300$ m ve $t_r \rightarrow \infty$ için tüketilen normalize edilmiş enerji değerleri sırasıyla 0.26, 0.22, 0.19 ve 0.18 şeklinde gerçekleşmektedir. Benzer şekilde $s_i = 48$ bayt olduğunda $t_r = 150$ m, $t_r = 250$ m, $t_r = 300$ m ve $t_r \rightarrow \infty$ için normalize edilmiş enerji tüketim değerleri sırasıyla 1.00, 0.72, 0.47, ve 0.27 olmaktadır.
- İletim menzili arttıkça tek seferde ulaşılabilecek komşu düğüm sayısı ve yapılabilecek bağlantı sayısı da artmakta, böylece enerji dengelemek için daha fazla bağlantı alternatifi oluşmaktadır. Dolayısıyla bant genişliği kısıtının etkileri yüksek iletim menzili değerlerinde azalmaktadır.
- Her ne kadar normalizasyon nedeniyle açıkça görünmese de, radyo yayılma modelleri açısından durum kıyaslandığında, aynı şartlar altında çoklu

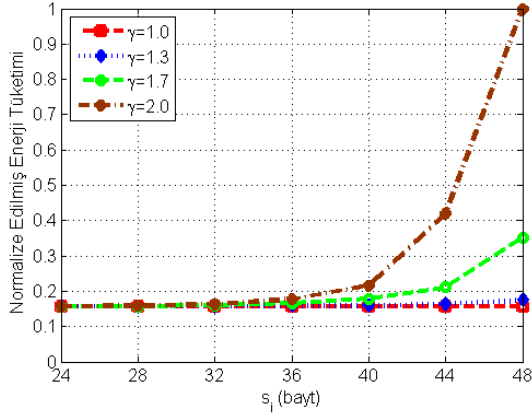
yol yayılma modelinde bit başına harcanan enerji, boşluk yol modelinde harcanan enerjiden önemli ölçüde büyüktür. Örneğin $t_r = 150$ m için Şekil 5.6(b)'de bit başına harcanan enerji, Şekil 5.6(a)'da harcanan enerjinin tam olarak 13260 katıdır.

- Düğümler arasındaki mesafeler açısından bakıldığında, ağın yayılım yüzeyi arttıkça düğümler arasındaki ortalama uzaklık artmakta, buna bağlı olarak da enerji sarfiyatı yükselmektedir. Bu durum iletim sırasında harcanan enerjinin düğümler arasındaki mesafeye bağlı olmasının bir sonucudur. Örneğin $t_r = 300$ m için Şekil 5.6(e)'de harcanan enerji, Şekil 5.6(c)'de harcanan enerjinin 3 katıdır.

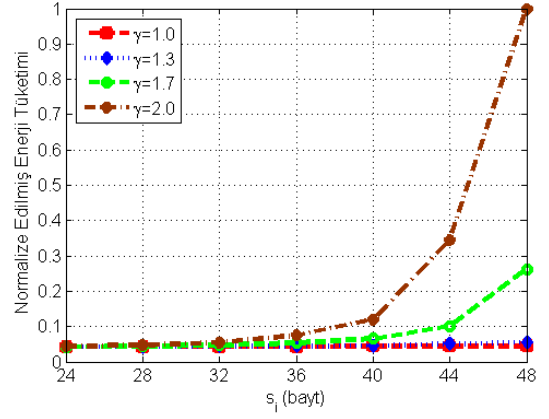
Girişim faktörünün etkilerini incelemek üzere Şekil 5.6'da yapılan analizler farklı γ değerleri için tekrarlanmıştır. Şekil 5.7'de ağın yayıldığı yüzey alan sabitlenerek ($R_{net} = 200$ m) bu kez 4 farklı γ değeri için s_i 'nin bir fonksiyonu olarak bit başına tüketilen normalize edilmiş enerji değerleri verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

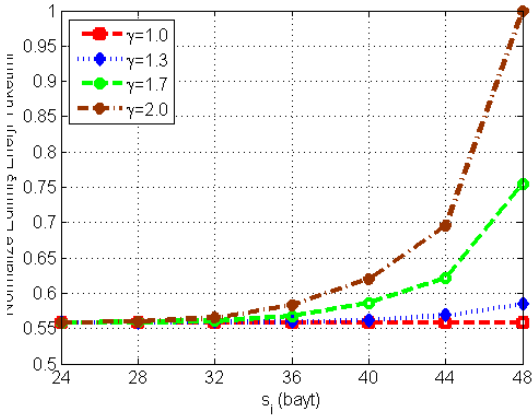
- Girişim faktörü (γ), optimum enerji çözümü için gereken bant genişliğinin kanalın sağlayabildiği bant genişliğinden yüksek olduğu durumda enerji sarfiyatını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin Şekil 5.7(d)'de ($R_{net} = 200$ m, $t_r = 250$ m ve $\alpha = 4$) $s_i = 44$ bayt olduğu durumda $\gamma = 1.0$, $\gamma = 1.3$, $\gamma = 1.7$ ve $\gamma = 2.0$ için normalize edilmiş enerji tüketim değerleri sırasıyla 0.11, 0.12, 0.21 ve 0.39 olmaktadır.
- Diğer taraftan optimum enerji çözümü için düğümlerin tüketimlerindeki dengeyi sağlamak üzere kanalın bant genişliğinin yeterli olduğu durumda girişim faktörünün enerji sarfiyatı üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Örneğin Şekil 5.7'de tüm alt şekillerde $s_i = 24$ bayt olduğu durumda harcanan enerji miktarları birbirine eşittir.
- Bant genişliği ihtiyacı bu çalışmada incelenen tüm sistem parametrelerine bağlı olup ağda kullanılan konfigürasyona göre değişmektedir. Örneğin Şekil 5.7(a), 5.7(b) ve 5.7(c)'de $s_i \leq 24$ bayt, $s_i \leq 28$ bayt ve $s_i \leq 32$ bayt için kanal bant genişliği yeterli olup optimal bağlantıların kullanılması mümkün olmaktadır. Kullanılan sistem parametrelerinin bu kombinasyonlarında optimum enerji çözümü sağlanabilmektedir.



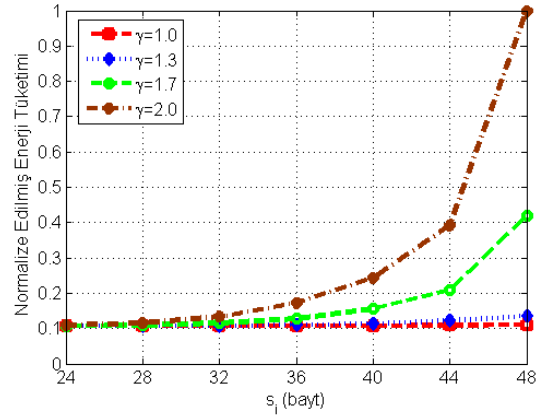
(a) $t_r = 150m, \alpha = 2$



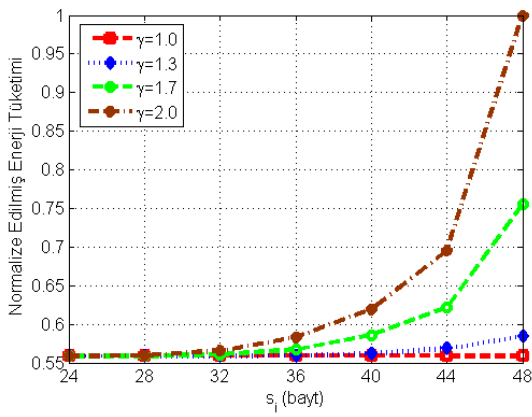
(b) $t_r = 150m, \alpha = 4$



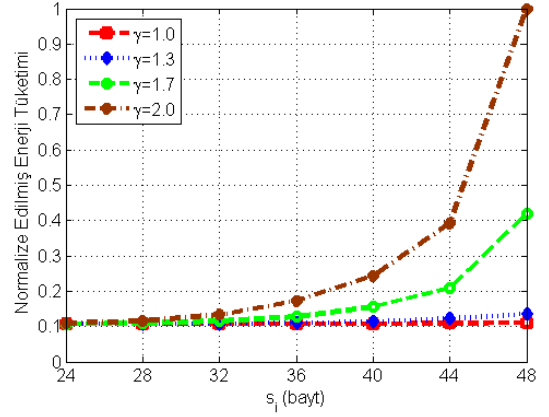
(c) $t_r = 250m, \alpha = 2$



(d) $t_r = 250m, \alpha = 4$



(e) $t_r = \infty, \alpha = 2$



(f) $t_r = \infty, \alpha = 4$

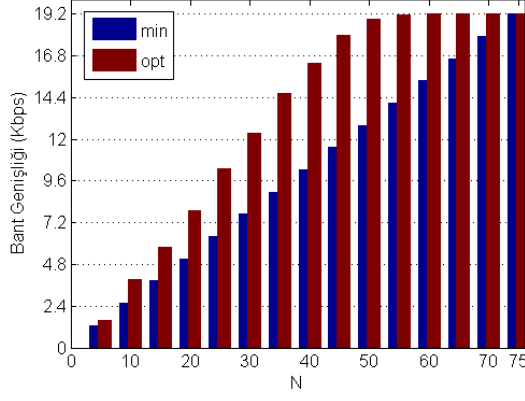
Şekil 5.7: $N = 50$ ve $R_{net} = 200m$ olduğu durumda farklı iletim menzili(t_r), girişim faktörü (γ) ve yol kaybı katsayısı (α) için s_i 'nin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş enerji tüketimi.

- Girişim menziline iletim menziline eşit olduğu durumda ($\gamma = 1.0$) bant genişliği açısından dar boğaz baz istasyonunun kendisidir. Baz istasyonu da algılayıcı düğümler gibi bant genişliği kısıtlarına maruz kaldığı için baz istasyonuna doğru iletilebilecek veri miktarı 19.2 kbps ile sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle $\gamma = 1.0$ için enerji tüketimi s_i 'nin bir fonksiyonu olarak değişmemektedir. Buna rağmen girişim faktörünün artması ile bant genişliği kısıtları daha etkin olduğu için enerji tüketimi artmaktadır.

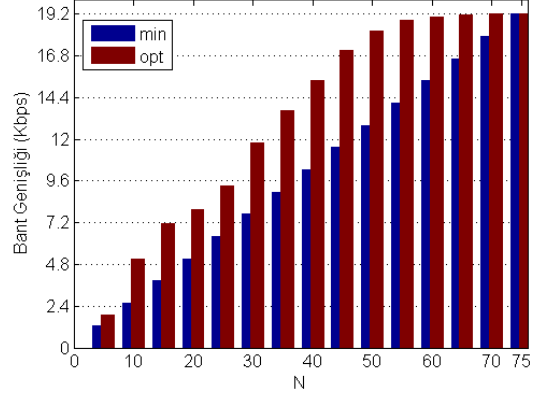
Bölüm 5.1.1'de ağ yaşam süresi için bahsi geçen bant genişliğinin alt ve üst limitleri, bu bölümde kullanılan enerji modelinde enerji tüketimi için de geçerlidir. Enerji modelinde yer alan tüm kısıtları sağlamak şartıyla herhangi bir çözüm elde etmek için gereken minimum bant genişliği miktarı alt limiti ifade etmekte ve şekillerde "min" olarak gösterilmektedir. Benzer şekilde optimum enerji çözümünü sağlayan bağlantıların kullanılmasına izin verecek minimum bant genişliği ise üst limiti ifade etmekte ve şekillerde "opt" olarak gösterilmektedir. Bu seviyeye kadar bant genişliğinin artması enerji tüketimi açısından daha verimli çözümler üretmeyi sağlarken bu noktadan itibaren bant genişliğindeki artışın enerji tüketimi üzerinde bir etkisi kalmamaktadır. Mica düğümleri için bant genişliğinin enerji tüketimi üzerinde etkili olduğu bölgeyi incelemek, başka bir deyişle alt ve üst limit arasındaki ilişkiyi araştırmak üzere farklı s_i ve α değerleri için düğüm sayılarına ait "min" ve "opt" bant genişlikleri karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 5.8 ve 5.9'da verilmiştir. Mica düğümlerinde kanalın kullanılabilen bant genişliği 19.2 Kbps kabul edildiği için incelemelerde bu değer üzerine çıkılmamış, x-ekseninde yer alan düğüm sayıları ilgili üretim oranında kullanılabilir maksimum düğüm sayısına göre ayarlanmıştır.

Bant genişliğinin alt sınırını (min) elde etmek için Şekil 4.6'daki modelde yer alan amaç fonksiyonu E yerine B olarak değiştirilmiş, E 'ye çok büyük bir değer verilerek B 'yi minimize etmek üzere model çözdürülmüştür. Bu durumda E bir parametre, B ise bir değişkendir. Bant genişliğinin değeri, hesaplanan minimum değer altına indiğinde düğümlerden en az birisi verisini baz istasyonuna iletememekte, dolayısıyla problemin çözümü mümkün olmamaktadır.

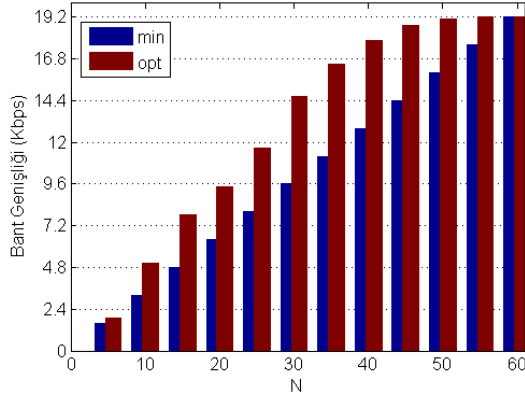
Bant genişliğinin üst sınırını (opt) belirlemek için iki aşamalı bir yöntem izlenmiştir. Önce Şekil 4.6'daki modelde B 'ye çok büyük bir değer verilerek minimum E değeri bulunmuştur. Bir anlamda bant genişliği limiti kaldırılmıştır. Ardından bulunan E değeri kullanılarak yukarıda alt limiti bulmak için kullanılan



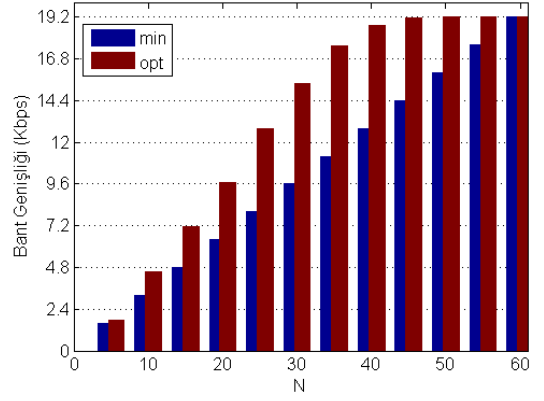
(a) $s_i = 32$ bayt, $\alpha = 2$



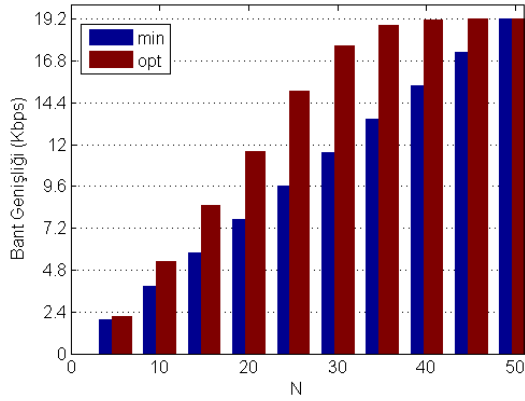
(b) $s_i = 32$ bayt, $\alpha = 4$



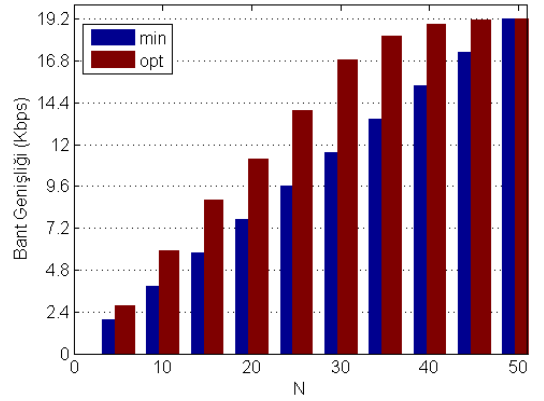
(c) $s_i = 40$ bayt, $\alpha = 2$



(d) $s_i = 40$ bayt, $\alpha = 4$



(e) $s_i = 48$ bayt, $\alpha = 2$



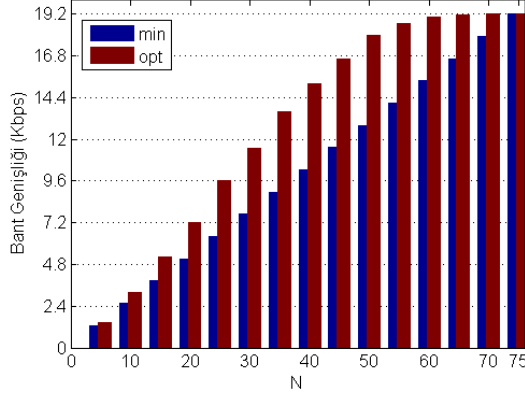
(f) $s_i = 48$ bayt, $\alpha = 4$

Şekil 5.8: $R_{net} = 200$ m, $\gamma = 1.7$ ve $t_r = 150$ m olduğu durumda farklı düğüm sayılarında ihtiyaç duyulan min ve opt bant genişlikleri.

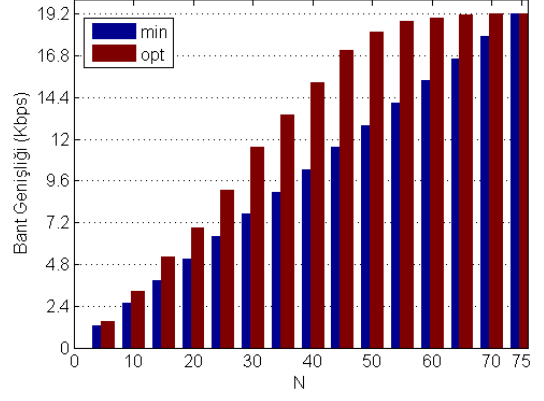
"değiştirilmiş DP modeli" çözdürülmüş, optimum bant genişliği bulunmuştur. Bu esnada optimum değer, mevcut kanal bant genişliğini (19.2 Kbps) geçmeyecek şekilde kısıtlanmıştır.

$t_r = 150$ m için Şekil 5.8 ve $t_r \rightarrow \infty$ için Şekil 5.9'da gösterilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

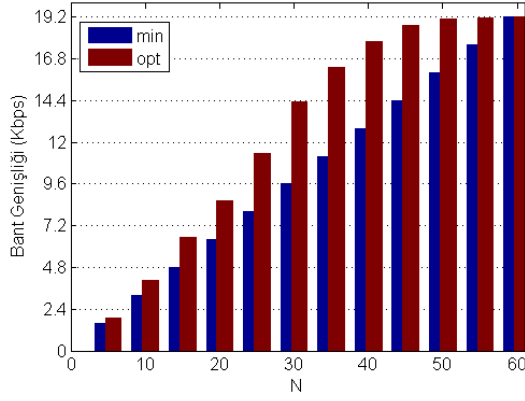
- $t_r \rightarrow \infty$ için her algılayıcı düğümün doğrudan baz istasyonuna iletim yapabildiği durumda bant genişliğinin alt limiti $N \times s_i$ formülü ile hesaplanabilmektedir.
- $t_r < R_{net}$ durumunda doğrudan baz istasyonuna iletim söz konusu değildir. Bant genişliğinin alt limiti bu durumda $N \times s_i$ çarpımının %0.3 (binde üç) komşuluğunda bulunmaktadır. Benzer şekilde optimum çözüm için gerekli bant genişliği (üst limit) bu durumda daha fazla olmaktadır. Diğer taraftan, mevcut kanal bant genişliğinde uygulanabilir bir veri akış diyagramı çerçevesinde aynı veri üretim oranını yakalayabilmek için düğüm sayısının azaltılması gerekmektedir.
- Optimum bant genişliğinin minimum bant genişliğine oranı [1.0,2.01] aralığında değişmektedir. Bunun anlamı, incelenen örnek aralığında optimum enerji tüketimi için gereken toplam bant genişliği, kanalın bant genişliğinin 2 katı ile sınırlıdır. Bu oranın maksimum değeri (2.01), $t_r = 150$ m., $s_i = 32$, $\alpha = 4$ ve $N = 10$ (Şekil 5.8(b)) değerlerinde elde edilmiştir. Dolayısıyla bant genişliğinin enerji tüketimi üzerinde en fazla etkili olduğu durum bu kombinasyonda görülmektedir.
- Aynı düğüm sayılarında, veri üretim oranları arttıkça genelde opt/min oranı azalmaktadır. Başka bir deyişle, daha düşük veri üretim oranları için bant genişliğinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi artmaktadır. Aynı zamanda yüksek s_i değerlerinde kanalın bant genişliği sınırı daha fazla hissedilmektedir. Örneğin $\alpha=2$, $t_r \rightarrow \infty$ ve $N=40$ için $s_i=32$, 40 ve 48 olduğu durumda optimum çözüm için gerekli minimum bant genişliği sırasıyla 15.18, 18.00 ve 19.08 kbps şeklinde gerçekleşmektedir. opt/min oranları ise aynı sırayla 1.48, 1.41 ve 1.24 olarak görülmektedir.
- Çoklu yol yayılma modelinde optimum enerji tüketimi için gereken bant genişliği boşluk yayılma modeline göre düşük düğüm sayılarında ($N \leq 15$)



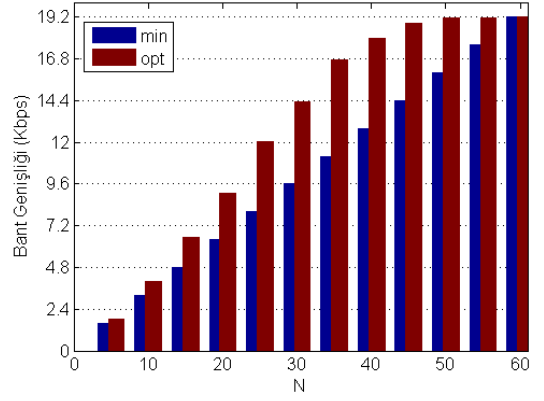
(a) $s_i = 32$ bayt, $\alpha = 2$



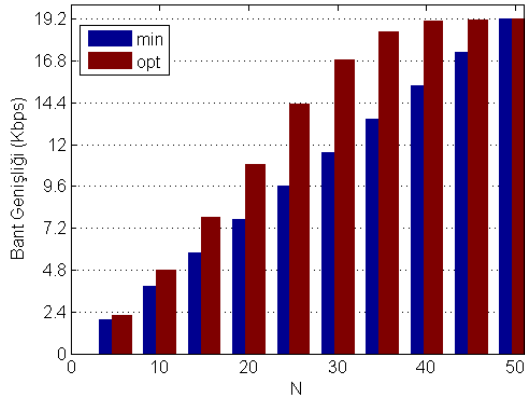
(b) $s_i = 32$ bayt, $\alpha = 4$



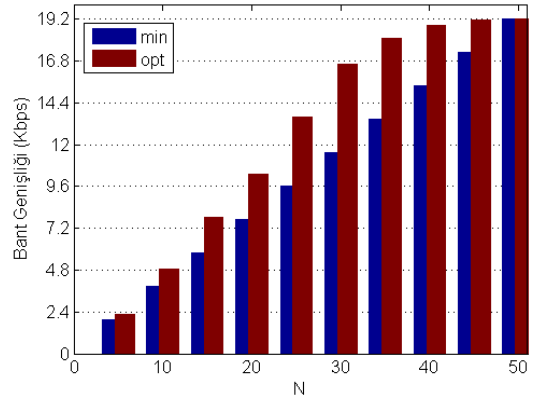
(c) $s_i = 40$ bayt, $\alpha = 2$



(d) $s_i = 40$ bayt, $\alpha = 4$



(e) $s_i = 48$ bayt, $\alpha = 2$



(f) $s_i = 48$ bayt, $\alpha = 4$

Şekil 5.9: $R_{net} = 200$ m, $\gamma = 1.7$ ve $t_r \rightarrow \infty$ olduğu durumda farklı düğüm sayılarında ihtiyaç duyulan min ve opt bant genişlikleri.

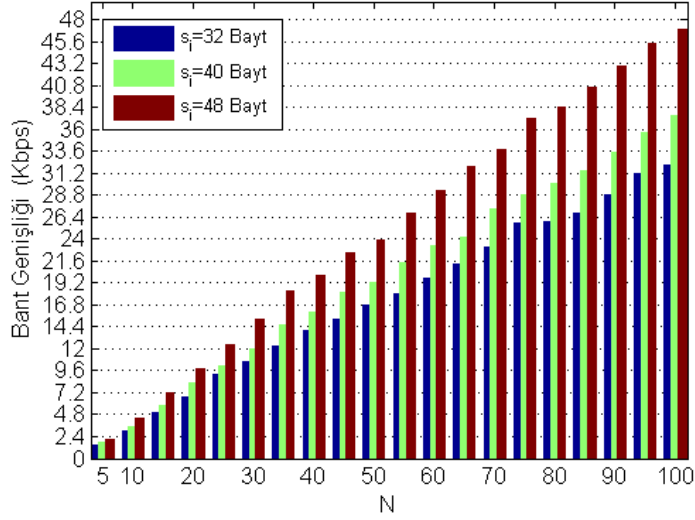
daha fazladır. $N > 15$ olduğunda boşluk modelinde gerekli bant genişliği miktarı daha fazla olmaktadır.

- Genel olarak düğüm sayısı arttırıldığında opt/min oranı, minimum bant genişliği mevcut kanal bant genişliğinin (19.2 kbps) yarısına eşit olana kadar artmakta, bu eşik geçildikten sonra yavaş yavaş azalmaktadır. Oranın azalması, kanal bant genişliğinin sabit olması ve bu eşik değerden itibaren optimum enerji çözümü için kullanılması gereken bazı bağlantılar için bant genişliğinde sıkışma yaşanmasından ileri gelmektedir. Yani bazı durumlarda bant genişliğinde meydana gelen sıkışma optimum enerji çözümünü elde etmeye mani olmaktadır. Daha açık bir ifadeyle daha fazla kullanılabilir bant genişliği olması durumunda, bazı hallerde daha az enerji sarfiyatı ile görev tamamlanabilmektedir. Bu durum tam olarak mevcut kanal bant genişliğinin yarısı aşıldığında görülmektedir.

Şekil 5.8 ve 5.9'a ilişkin değerlendirmelerde bahsedilen bant genişliğinde meydana gelen sıkışmayı daha belirgin şekilde analiz etmek ve etkilerini net bir şekilde ortaya koymak üzere öncelikle kanalın bant genişliği limiti ve iletim menzili ihmal edilerek elde edilebilen en iyi enerji çözümü hesaplanmıştır. Elde edilen enerji değeri Şekil 4.6'daki denklemde yerine koyularak amaç fonksiyonu, B 'yi minimize edecek şekilde değiştirilmiştir. Bu kez kanalın bant genişliği limitinden (19.2 Kbps) gelen kısıt kullanılmamış, optimum bant genişliği bu değeri aşabilecek şekilde model çözdürülmüştür. Şekil 5.8 ve 5.9'da incelenen s_i değerleri için optimum bant genişliklerinin kanaldaki limit olmadığında ne olduğu Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Böylece optimum enerji çözümü için, mevcut kanal bant genişliğine ilaveten ne kadar fazla bant genişliği kullanılabilir olmalı sorusu incelenmiştir.

Sonuçlar irdelendiğinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Düğüm sayısı (N) arttırıldığında optimum çözüm için gereken bant genişliği artarak bazı hallerde, pratikte kanal tarafından sınırlanan değeri (19.2 Kbps) aşmaktadır. Başka bir deyişle bazı hallerde kanal tarafından dikte edilen bant genişliği limiti, en verimli enerji çözümünü elde etmeye mani olmaktadır. Örneğin $s_i = 32$ bayt için düğüm sayısı 55'i geçtiğinde, $s_i = 40$ bayt için düğüm sayısı 50'yi geçtiğinde, $s_i = 48$ bayt için düğüm sayısı 35'i geçtiğinde pratikte karşılaşılan bant genişliği limiti aşılmaktadır. Yeterli



Şekil 5.10: Optimum enerji çözümü için farklı düğüm sayıları ve veri üretim oranlarında gerekli bant genişliği miktarları.

bant genişliği sağlanamadığı durumda düğümlerdeki tüm verileri aktarmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.

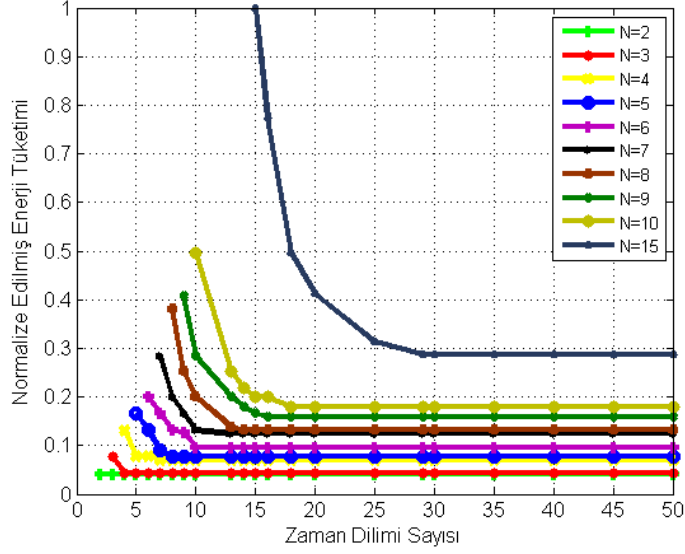
- Kanal tarafında daha fazla bant genişliği kullanmak mümkün olduğunda bazı durumlarda iş optimum enerji ile tamamlanmaktadır. Örneğin $N = 50$ ve $s_i = 48$ için %25 daha fazla bant genişliği kullanılabildiğinde işi %35 daha az enerji ile tamamlamak mümkün olmaktadır.

5.1.3 Karma Tamsayı Doğrusal Programlama Enerji Modeli ile Yapılan Analizler

Bu bölümde öncelikle Şekil 4.7’de verilen karma tamsayı doğrusal programlama enerji modeli yardımıyla farklı düğüm sayılarında harcanan enerji miktarının zaman dilimi sayısına göre değişimi incelenmiş, sonuçlar Şekil 5.11’de verilmiştir.

Sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Zaman dilimi sayıları bant genişliğini ifade etmektedir. Bu doğrultuda zaman dilimi sayısı belli değere gelene kadar herhangi bir çözüm üretilmemektedir. Bunun nedeni en az düğümlerden birisinde üretilen verinin baz istasyonuna iletilmemesidir. Bu değer bant genişliğinin alt limitini



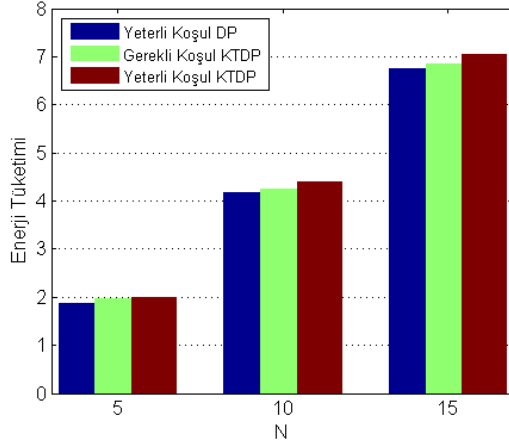
Şekil 5.11: Farklı düğüm sayıları için zaman dilimi sayısının bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş enerji tüketimi ($d_{int} = 20$ m, $\gamma = 1.0$, $PS = 2048$ bit, $NP = 1$).

sembolize etmektedir. İncelenen örnekte her düğüm 1 paket gönderdiği için zaman dilimi sayısı düğüm sayısına eşit olana kadar herhangi bir çözüm bulunamamaktadır.

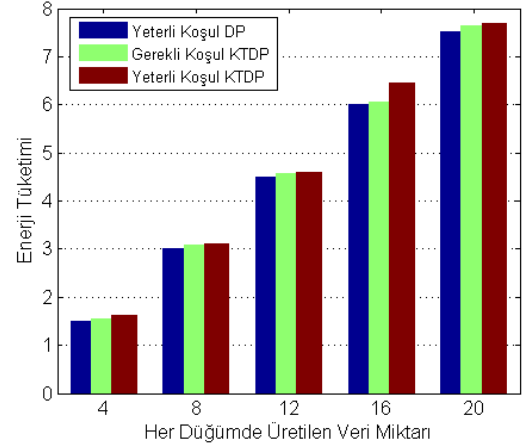
- Zaman dilimi sayısı yani bant genişliği miktarı alt limitten itibaren arttıkça enerji tüketiminde belli bir değere kadar iyileşme görülmektedir. Belli bir noktadan sonra zaman dilimi sayısı artsa da enerji tüketimi azalmamaktadır. Zaman dilimi sayısının bu değeri de bant genişliğinin üst limitini ifade etmektedir. Bu noktada enerjinin optimum çözümü elde edilmektedir.
- Düğüm sayısı arttıkça bant genişliğinin enerji tüketimi üzerinde etkisi de artmaktadır. Örneğin bant genişliğinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri $N=5$ için $[5,8]$ aralığında, $N=15$ için $[15,29]$ aralığında görülmektedir.

Bu bölümde incelenen KTDP modelinde, Bölüm 4.2.1 ve 4.2.2'de kullanılan yeterli koşulun yerine gerekli koşul tanımlanarak girişimden kaynaklı fazladan bant genişliği hesaplanmasının önüne geçilmiştir. Meydana gelen iyileştirmeyi görebilmek amacıyla yeterli koşulu sağlayan DP enerji modeli ile gerekli koşulu sağlayan KDTP enerji modeli karşılaştırılması amaçlanmıştır. Ancak DP enerji modelinde veri akışlarının sürekli aralıklarla yani reel sayılarla ayarlanabilmesi KTDP modeline göre bir iyileştirme sağlamakta ve sağlıklı bir karşılaştırma yapmaya engel olmaktadır. Bu nedenle yeterli koşulu sağlayan DP enerji modelinde

sadece veri akışları tamsayı değişkenlere çevrilerek yeterli koşulu sağlayan ikinci bir KTDP modeli elde edilmiştir. Böylece Şekil 5.12’de yeterli koşul DP modeli, gerekli koşul KTDP modeli ve yeterli koşul KTDP modeli ile elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır.



(a) Farklı düğüm sayılarında enerji tüketimleri



(b) Farklı veri üretim oranlarında enerji tüketimleri, $N=5$

Şekil 5.12: Yeterli ve gerekli koşulu sağlayan DP ve KTDP modellerinin karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Her durumda veri akışlarının reel sayı olabildiği DP problemi, her ne kadar fazladan bant genişliği hesaplanmış olsa dahi KTDP modellerine göre enerji açısından daha verimli olmaktadır. Başka bir deyişle veri akışlarının sürekli aralıklarla ayarlanabilmesinden kaynaklanan avantaj, yeterli koşul nedeniyle bant genişliği tarafında meydana gelen dezavantaja göre baskın olduğundan diğer iki modele göre daha verimli sonuçlar elde edilmektedir.
- Gerekli koşulun sağlandığı KTDP problemi, yeterli koşula göre daha az bant genişliği gerektirdiği için veri akışlarının tamsayılarla ayarlanabildiği durumda enerji açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Gerekli koşul KTDP modeli ile elde edilen çözüm, her zaman yeterli koşul DP modeli ile yeterli koşul KDTP modeli arasında kalmaktadır. Örneğin, $N=10$ için yeterli koşulu sağlayan DP modelinden %2 daha fazla enerji tüketirken, yeterli koşul KDTP modelinden %3.5 daha az enerji harcamaktadır. Benzer şekilde her düğümde 16 bit üretildiği durumda yeterli koşul DP modelinden

%1 daha fazla enerji tüketirken, yeterli koşul KDTP modelinden %6 daha az enerji harcamaktadır.

- Yeterli koşulun sağlandığı ve veri akışlarının tamsayılar ile ifade edildiği yeterli koşul KTDP modeli, fazladan bant genişliği hesaplandığı için her durumda diğer iki modele göre optimum olmayan sonuçlar üretmektedir.

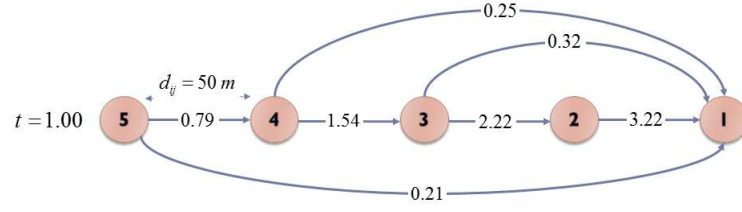
5.2 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücü ve Güç Atama Stratejilerinin Analizi

5.2.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ayrık İletim Gücü Kullanımının Analizi

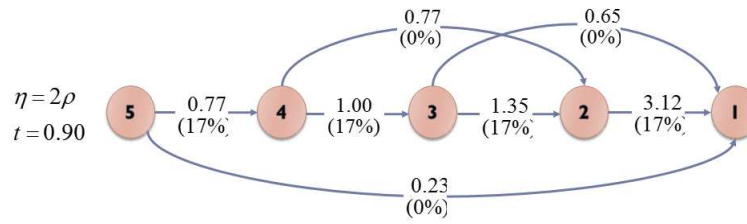
İlk olarak ayrık ve sürekli iletim gücü kullanımının ağ yaşam süresi üzerindeki etkilerini incelemek ve seçilen veri akışlarındaki değişiklikleri analiz etmek amacıyla Şekil 5.13'te gösterilen basit 1-boyutlu topoloji oluşturulmuştur. Ayrık iletim gücünde kullanılan farklı "ayarlanabilen en küçük enerji seviyesi (η)" değerleri için Şekil 4.8 ve 4.9'da verilen DP modeli çözdürülmüş ve $d_{ij} = 50$ m için Şekil 5.13'te gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Şekilde gösterilen tüm ağ yaşam süresi (t) değerleri (a)'da sürekli durumda elde edilen t' 'ye göre normalize edilmiştir. Her bağlantının üzerinde gösterilen değerler, 1'e göre normalize edilmiş olup iki düğüm arasındaki veri akışını göstermektedir. Parantez içerisinde gösterilen değerler ise enerji tüketiminde sürekli duruma göre meydana gelen ek yükü ifade etmektedir. Ayarlanabilen en küçük enerji seviyesi (η) değerleri şekillerin solunda verilmiştir. Her düğüme giren ve düğüme üretilen veri miktarlarının toplamı, düğümden çıkan veri miktarına eşittir. Bu örnekte karşılaştırmanın daha basit anlaşılması için iletim menzili kısıtı göz ardı edilmiş yani $t_r \rightarrow \infty$ alınmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

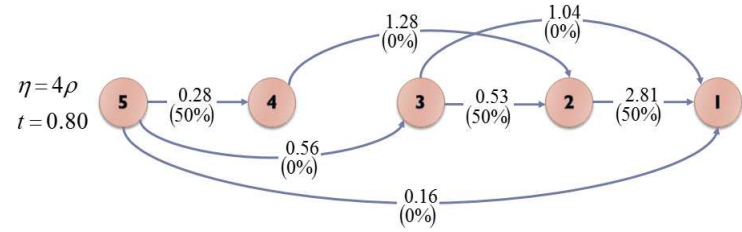
- η değeri ne olursa olsun, sürekli HCB modelinde elde edilen ağ yaşam süresi, her zaman ayrık HCB modelinde elde edilenden daha uzundur. Bu durum (5.5) no'lu denklem ile verilen eşitsizlikte yer alan tavan fonksiyonundan kaynaklanmaktadır. Bir düğümün bağlantı için harcaması gereken enerji,



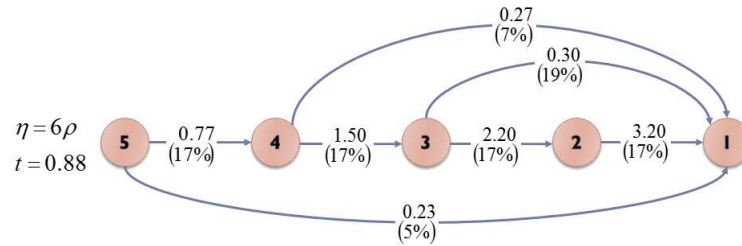
(a)



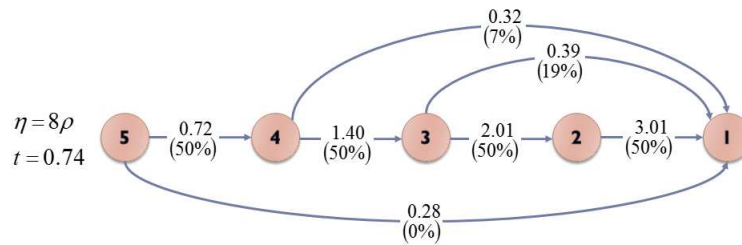
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 5.13: Sürekli ve ayırık HCB modellerinin farklı η değerleri için karşılaştırması.

bir "GS" güç seviyesinin çok az üzerinde de olsa ayrıık HCB modelinde "GS+1" no'lu güç seviyesi seçilmekte ve arada gereksiz yere fazladan enerji harcanmaktadır.

$$\varepsilon d_{ij}^{\alpha} \leq \eta \left[\frac{\varepsilon d_{ij}^{\alpha}}{\eta} \right] \quad \forall \eta \quad (5.5)$$

- Genel olarak η arttığında ağ yaşam süresi azalmaktadır. Ancak bu duruma uymayan bazı istisnalar bulunmaktadır. Örneğin $\eta = 6\rho$ için elde edilen ağ yaşam süresi $\eta = 4\rho$ için elde edilenden daha uzundur. İlk bakışta aykırı görünen bu durum, aslında daha yüksek η değerlerine ait enerji tüketiminin, daha düşük η değerlerinin enerji tüketiminden her zaman daha yüksek olmamasından kaynaklanmaktadır. Burada düğümler arasındaki mesafe (d_{ij}) belirleyici faktördür. Bir başka deyişle (5.6) no'lu denklemi sağlayan bazı d_{ij} mesafeleri mevcuttur.

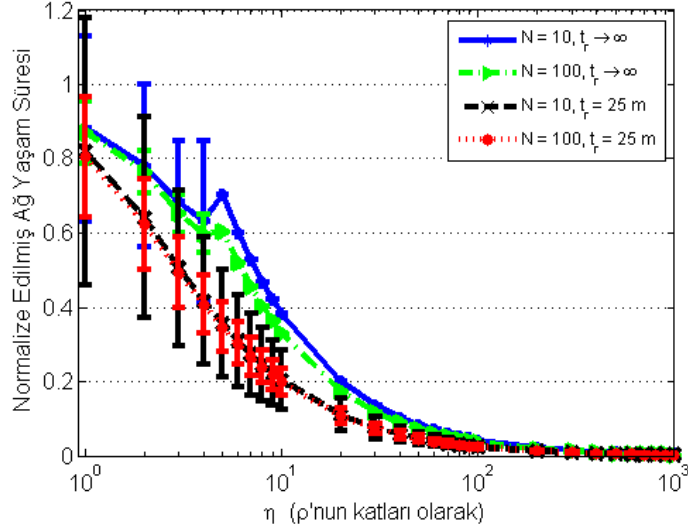
$$\rho + \eta_1 \left[\frac{\varepsilon d_{ij}^{\alpha}}{\eta_1} \right] < \rho + \eta_2 \left[\frac{\varepsilon d_{ij}^{\alpha}}{\eta_2} \right] \quad \text{eğer } \eta_1 > \eta_2 \text{ ise} \quad (5.6)$$

Örneğin sürekli durumda $E_{tx} = 6\rho$ iken, ayrıık durumda komşu düğümler ($d_{ij} = 50$ m) arasındaki iletim enerjisi E_{tx} , $\eta_1 = 6\rho$ ve $\eta_1 = 4\rho$ için sırasıyla 7ρ ve 9ρ olmaktadır. Bunun sonucu olarak komşu düğümler arasındaki iletim için gerekli enerji tüketim ek yükü Şekil 5.13(c) ve 5.13(d)'de sırasıyla %50 ve %17 şeklinde gerçekleşmektedir.

- Sürekli enerji modeli yerine ayrıık enerji modeli kullanıldığında optimum veri akışlarında önemli değişiklikler gözlenmiştir. Enerji değerlerinde olduğu gibi η , düğümler arasındaki veri akışları üzerinde hatırı sayılır etkiye sahiptir. Örneğin sürekli enerji modelinde 4 no'lu düğümden 2 no'lu düğüme bir veri akışı bulunmazken $\eta = 2\rho$ durumunda normalize edilmiş veri akış miktarı 0.77 mertebesindedir. Bu miktar $\eta = 4\rho$ için 1.28'e kadar artmakta, $\eta = 6\rho$ ve $\eta = 8\rho$ için tekrar 0'a düşmektedir. Ağdaki veri akışları, düğümlerdeki enerji tüketim miktarları vasıtasıyla enerji sarfiyatını dengelemek için böyle bir örüntü sergilemektedir.

Ayrıık iletim gücünün farklı ayırıklaştırma seviyelerinde ağ yaşam süresi üzerindeki etkilerini incelemek üzere daha büyük ağlarda baz istasyonu çevresinde rastgele dağıtılmış düğümlerden meydana gelen 2-boyutlu topoloji oluşturulmuş ve $R_{net} = 50$ m için en küçük ayarlanabilir enerji seviyesinin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Elde edilen tüm değerler

düğümlerin rastgele dağıtıldığı 1000 farklı topoloji için bulunan sonuçların ortalaması alınarak elde edilmiştir.



Şekil 5.14: En küçük ayarlanabilir enerji seviyesi η 'nın bir fonksiyonu olarak sürekli HCB modelinde elde edilen ağ yaşam süresine göre normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m$).

Tüm ağ yaşam süresi değerleri kendisine ait sürekli durumda elde edilen ağ yaşam süresine göre normalize edilmiştir. Örneğin, $\eta = 10 \rho$ için $N=10$ ve $t_r \rightarrow \infty$ durumları için elde edilen ağ yaşam süresi aynı N ve t_r değerleri için sürekli durumda elde edilen ağ yaşam süresine göre ölçeklenmiştir. Şekilde y-ekseni boyunca gösterilen hata çubukları alınan sonuçlardaki standart sapmaları göstermektedir.

İletim mesafesindeki kısıtlamalar ağda birbirinden yalıtılmış bölgeler oluşmasına neden olmakta, bu da ağda en az bir düğümün göndermesi gereken bilgiyi baz istasyonuna doğrudan veya diğer düğümler üzerinden gönderememesine neden olmaktadır. Dolayısıyla yalıtılmış bölge bulunması halinde ağ yaşam süresi "0" olmaktadır. Ağ yaşam sürelerinin ortalaması alınırken "0" olduğu durumlar ele alınmamıştır. Ele alınmayan durumlar toplamda elde edilen değerlerin en fazla %5'ini oluşturmaktadır. Şekilde yer alan sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Ağın yayılma yüzeyi sabit iken düğüm sayısının (N) artırıldığı durumlarda yani daha yoğun ağlardaki güç seviyelerindeki ayrıklaştırma, daha seyrek ağlardakine göre ağ yaşam süresinde daha fazla azalmaya neden olmaktadır.

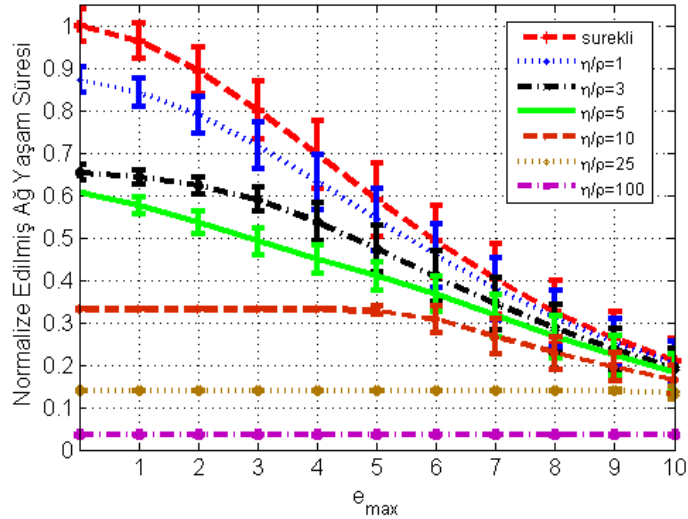
Daha seyrek ağlarda düğümler arasındaki mesafeler daha uzun olduğu için alıcı düğüme bir paket göndermek için daha fazla iletim gücü kullanılmaktadır. Daha yüksek iletim güçlerinde, ayırıklaştırmadan kaynaklı daha az ek yük görülmektedir. Örneğin ayırık iletim enerjisinin yarım birim olduğu durumda, çok yakındaki bir düğüme iletim yaparken yarım birim enerji harcanıp neredeyse %100 ek yük ortaya çıkmaktadır. Oysaki, uzaktaki bir düğüme iletim yaparken 9,5 birim enerji harcanırken ek yük sadece %5 olacaktır.

- İletim menzillerinin sınırlandırıldığı durumda güç seviyelerindeki ayırıklaştırma, sınırlandırılmadığı duruma kıyasla ağ yaşam süresi üzerinde daha fazla azalmaya neden olmaktadır. Bu durum ilk maddede belirtildiği gibi, düşük güç seviyelerinde ayırıklaştırmanın sebep olduğu ek yükün daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.
- η arttıkça genel olarak ağ yaşam süresinin azaldığı gözlenmektedir. Buna rağmen bu bölümde Şekil 5.13 ile ilgili yapılan 2. yorumda açıklanan nedenlerden ötürü istisnai durumlar görülebilmektedir. Sadece $t_r \rightarrow \infty$ iken η artarken çok küçük bir aralıkta ağ yaşam süresi de artmaktadır. Örneğin η , 4'ten 5'e artarken $N=10$ ve $N=100$ durumlarında $t_r \rightarrow \infty$ için ağ yaşam süresi de artmaktadır.
- η 'nın artmasıyla ağ yaşam süresi değerlerinde görülen standart sapmalar azalmaktadır. Diğer bir deyişle, η arttıkça iletim gücündeki ayırıklaştırmanın ağ yaşam süresine etkileri; düğümlerin topolojideki konumlarının ve düğümler arasındaki mesafenin ağ yaşam süresine etkilerine göre baskın hale gelmektedir.

Bir diğer husus, ayırık *HCB* enerji modelinde $\eta \rightarrow 0$ durumunda elde edilen modelin sürekli *HCB* enerji modeline eşdeğer olmasıdır. Dolayısıyla ayırık *HCB* enerji modeli, özel bir durumda sürekli *HCB* enerji modelini içerecek kadar esnek bir yapıya sahiptir.

5.2.2 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Pozisyonlama Hatalarının Analizi

Bu bölümde 0 ile 10 m arasındaki pozisyonlama hataları ele alınmış, Şekil 4.9'da verilen model sürekli ve ayrık HCB enerji modelleri için çözdürülmüştür. Bu modelde Bölüm 4.3.2'de verilen d_{ij}^c kullanılarak sürekli durumda ve farklı ayrıklaştırma seviyelerinde pozisyonlama hataları irdelenmiştir. Şekil 5.15'te verilen sonuçlar $R_{net}=50$ m ve $N=100$ için 2-boyutlu topolojide 1000 kez çalıştırılarak elde edilen ortalama değerleri göstermektedir. Her ağ yaşam süresi değeri, sürekli durumda ve ilgili pozisyonlama hatası değerinde elde edilen değer ile normalize edilmiştir. Şekilde görülen hata çubukları standart sapmaları göstermektedir.



Şekil 5.15: Farklı ayrıklaştırma seviyeleri için pozisyonlama hatasının (e_{max}) bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50$ m, $N = 100$).

Pozisyonlama hataları ile ilgili inceleme sonucu aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Pozisyonlama hatası e_{max} arttıkça, her durumda ağ yaşam süresi azalmaktadır. En belirgin düşüş iletim enerjisinin sürekli ayarlanabildiği durumda gözlenmektedir.
- İletim enerjisindeki ayrıklaştırma seviyesi arttıkça ağ yaşam süresinde gözlenen düşüş azalmaktadır. Örneğin $e_{max} = 0$ m olduğu durumda, $\eta = \rho$,

$\eta = 10\rho$ ve $\eta = 100\rho$ için ağ yaşam süreleri sırasıyla, sürekli durumda elde edilen ağ yaşam süresinin %88, %34 ve %3'ü şeklinde gerçekleşmektedir.

- İletim enerjisinin hassas ayarlanabildiği durumda elde edilen avantaj, pozisyon hesaplanmasındaki doğruluk oranının düşmesi ile azalmaktadır. Örneğin $e_{max} = 10$ m olduğu durumda $\eta = \rho$, $\eta = 10\rho$ ve $\eta = 100\rho$ için elde edilen ağ yaşam süresi sırasıyla sürekli durumda elde edilen sürenin %97, %69 ve %18'i şeklinde gerçekleşmektedir.
- Pozisyonlamadaki hataları telafi etmek için iletim gücü arttırıldıkça ayırıklaştırmadan kaynaklanan enerjideki kayıp azalmaktadır. Başka bir deyişle, pozisyonlama hatalarının artmasıyla görülen etkiler, Şekil 5.14'e ait ilk değerlendirmede düğüm yoğunluğunun artmasıyla görülen etkilere benzemektedir. Buna rağmen yüksek pozisyonlama hataları görüldüğü durumlarda bile iletim gücü ne kadar hassas ayarlanabilirse ağ yaşam süresi o oranda artmaktadır. İletim enerjisinin en hassas ayarlanabildiği sürekli durumda en iyi ağ yaşam süresi elde edilmektedir.
- Genel olarak pozisyonlama hataları arttıkça ağ yaşam süresinde gözlenen standart sapmalarda artış görülmektedir.

5.2.3 Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Olasılıksal Radyo Yayınının Analizi

Bu bölümde, kablosuz algılayıcı ağlarda radyo düzensizliklerinin ağ yaşam süresine etkilerini incelemek üzere Bölüm 4.3.3'te verilen olasılıksal yol kaybı modeli kullanılmıştır. Farklı PRR değerlerinin etkilerini incelemek için çalışmanın başında paketi alıcıya iletmek üzere bir hedef PRR (χ_{trg}) değeri seçilmiş, enerjinin sürekli ayarlanabildiği durum için ağ yaşam süresi hesaplanmıştır. Ancak ayırık $HCB-LNS$ enerji modelinde hedeflenen PRR değerine ulaşmak için kullanılması gereken iletim enerjisi, ayırıklaştırmadan kaynaklı birebir kullanılmadığı için en yakın güç seviyesinde kullanılan iletim enerjisine karşılık gelen PRR değeri (gerçekleşen PRR) hesaplanarak sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin sürekli durumda eğer $E_{tx}^{C-HCB-LNS}(d_{ij}) = \rho + 1.3\eta$ şeklinde gerçekleşiyorsa ayırık durumda $E_{tx}^{D-HCB-LNS}(d_{ij}) = \rho + 2\eta$ olarak kullanılabilir. Bu nedenle, ayırık HCB-LNS modelinde her bağlantıdaki gerçek PRR değeri değişmektedir. Başka bir ifadeyle, sürekli HCB-LNS modelinde tüm bağlantılar için $\chi_{ij} = \chi_{trg}$ iken, ayırık

HCB-LNS modelinde $\chi_{ij} \geq \chi_{trg}$ şeklinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla ayrık enerji modelinde sonuçları elde etmek üzere iki aşamalı bir yöntem kullanılmıştır.

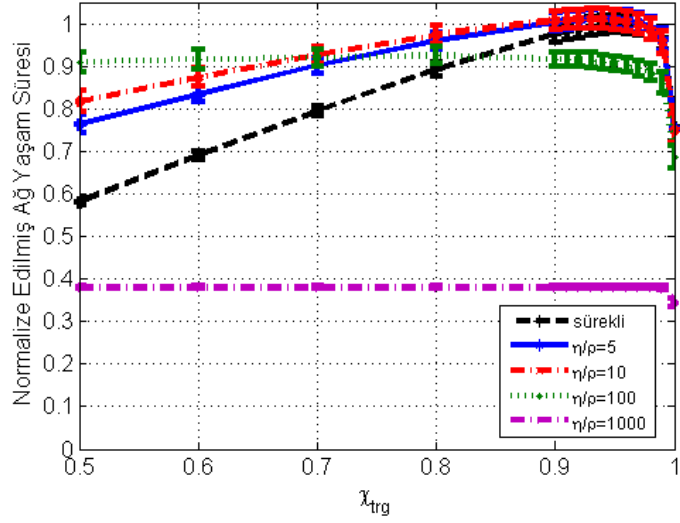
İlk aşamada ağ genelinde paketin alıcıya ulaşması için gerekli bir hedef PRR (χ_{trg}) değeri seçilmiştir. Ardından (4.42) no'lu denklem yardımıyla ağdaki her düğüm çifti için, aralarındaki bağlantının yol kaybı hesaplanmıştır. Daha sonra (4.44) no'lu denklem kullanılarak hedeflenen PRR değerini sağlayan sinyalin gürültüye oranı hesap edilmiştir. Böylece (4.45) no'lu denklemde, daha önce ilgili düğüm çifti için bulunan yol kaybı ve sinyalin gürültüye oranı yerine konularak hedeflenen PRR değeri için kullanılması gereken iletim gücü ($P_t(d_{ij}), dB$) bulunmuştur. Ardından (4.46) no'lu denklem yardımıyla iletim gücü Watt'a çevrilmiştir. Son olarak bulunan değer (4.48) no'lu denklemde yerine konularak iletim için gerekli en uygun ayrık iletim enerjisi hesaplanmıştır. Bu değer daha önce bahsi geçtiği üzere sürekli durumda kullanılması gereken enerjiye en iyi durumda eşit veya daha fazla olmaktadır.

İkinci aşamada ise ilgili düğümler için ilk aşamada hesaplanan iletim enerjisi ($E_{tx}^{D-HCB-LNS}(d_{ij})$) kullanıldığında gerçekleşen PRR değeri (χ_{ij}) bulunarak kullanılan modelde yerine konulmuş ve buna ilişkin sonuçlar değerlendirilmiştir. Gerçek PRR değerini elde etmek için ilk aşamada bulunan $E_{tx}^{D-HCB-LNS}(d_{ij})$ değerinden (4.48) no'lu denklem vasıtasıyla iletim gücü $P_t(d_{ij}), W$ elde edilmiştir. Bu değer (4.46) no'lu denklem kullanılarak dB'e çevrilmiştir. Bulunan değer (4.45) no'lu denklemde yerine konularak elde edilen SNR değeri hesaplanmıştır. SNR değeri kullanılarak (4.44) no'lu denklem ile gerçekleşen PRR değeri bulunmuştur.

Bu doğrultuda, farklı ayırıklaştırma seviyelerinde olasılığa bağlı paket iletiminin ağ yaşam süresi üzerindeki etkileri $N=100$ ve $R_{net}=50$ m için incelenmiş ve hedeflenen PRR değerinin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Normalizasyon işlemi tüm değerlerin en yüksek ağ yaşam süresine bölünmesi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlara ilişkin değerlendirmeler şu şekildedir:

- Sürekli HCB-LNS modelinde ağ yaşam süresinin en yüksek olduğu değer $\chi_{trg} = 0.94$ durumunda elde edilmektedir.
- $\chi_{trg} < 0.94$ olduğu durumlarda sürekli HCB-LNS modeli, ayrık HCB-LNS

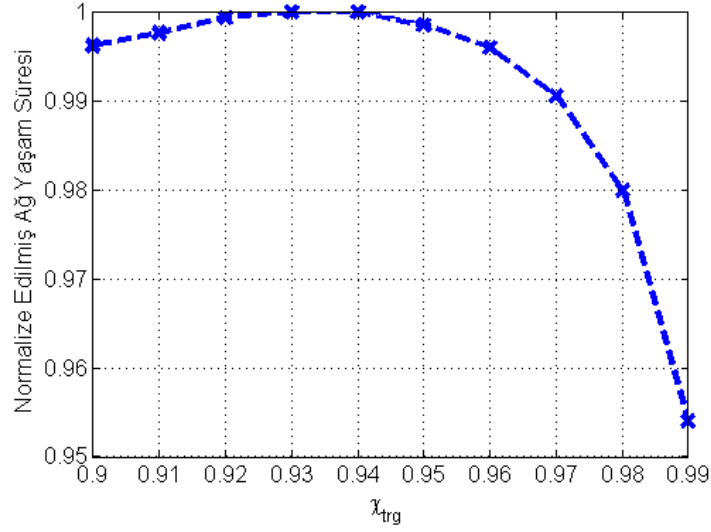


Şekil 5.16: Farklı ayırıklaştırma seviyeleri için hedef PRR değerinin (χ_{trg}) bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m$, $N = 100$).

modelinde $\eta = 5\rho$ ve $\eta = 10\rho$ kullanıldığı duruma kıyasla daha kısa ağ yaşam süresine sahiptir. Bunun nedeni, ayırık HCB-LNS modelinde iletim enerjisinin sürekli ölçekte ayarlanamaması neticesinde gerekenden daha fazla kullanılması sonucunda gerçekleşen PRR (χ_{ij}) değerinin, hedeflenen PRR (χ_{trg}) değerinden daha verimli olmasıdır. Başka bir deyişle enerjinin ayırık değerlerde ayarlanabilmesinden kaynaklı fazla enerji kullanımı çözümü daha optimal bir bölgeye taşımaktadır.

- Nispeten daha büyük ayırıklaştırma seviyelerinde ($\eta = 1000\rho$) elde edilen ağ yaşam süresi, sürekli duruma kıyasla her zaman daha düşüktür. Bu değerlerde iletim enerjisindeki ayırık kullanım χ_{trg} 'nin ağ yaşam süresi üzerindeki etkilerini bastırmaktadır. Bu durum Şekil 5.18'de daha detaylı incelenmektedir.
- En yüksek ağ yaşam süresinin elde edildiği χ_{trg} değerine ulaşıncaya kadar genelde ağ yaşam süresi artmakta, bu değer aşıldıktan bir miktar sonra dramatik bir şekilde azalmaktadır.
- Farklı χ_{trg} değerleri için standart sapmalarda herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.

Ağ yaşam süresi açısından optimal durumun sürekli ve ayırık HCB-LNS modelleri için χ_{trg} 'nin 0.9 ile 1.0 aralığında aldığı değerlerde olması bu aralığın ayrıca



Şekil 5.17: Sürekli durumda veya ayırık HCB-LNS modelinde herhangi bir η değerinde elde edilen en yüksek ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m$, $N = 100$).

incelenmesini gerektirmiştir. Yapılan incelemede χ_{trg} 'nin her değerinde sürekli durumda veya ayırık durumdaki herhangi bir η değerinde elde edilen en yüksek ağ yaşam süreleri Şekil 5.17'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.2: Sürekli veya ayırık HCB-LNS enerji modelinde her χ_{trg} için en yüksek ağ yaşam süresinin elde edildiği enerji seviyeleri.

χ_{trg}	Kullanılan Enerji Seviyesi
0.90	$\eta = 9\rho$
0.91	$\eta = 9\rho$
0.92	$\eta = 10\rho$
0.93	$\eta = 7\rho$
0.94	$\eta = 10\rho$
0.95	$\eta = 3\rho$
0.96	$\eta = 3\rho$
0.97	$\eta = 5\rho$
0.98	$\eta = 3\rho$
0.99	Sürekli

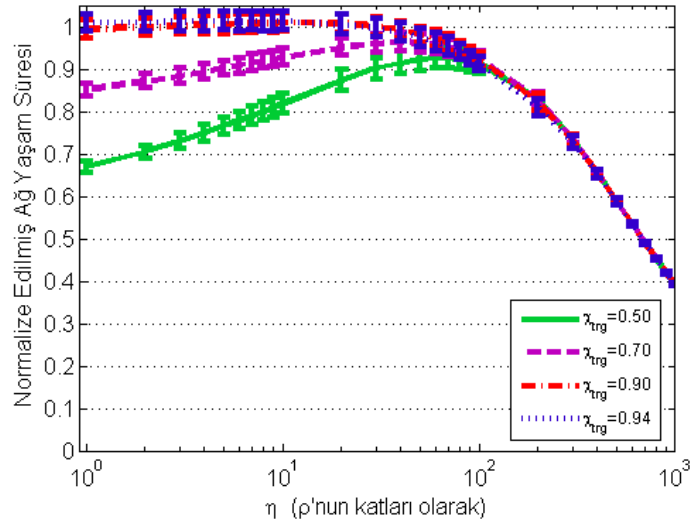
Alınan sonuçlara ilişkin çıkarımlar aşağıdaki gibi olmuştur:

- Farklı χ_{trg} değerleri için en yüksek ağ yaşam süresi farklı enerji kullanımlarında elde edilmiştir. Örneğin, $\chi_{trg} = 0.9$ için en yüksek ağ yaşam süresi $\eta = 9\rho$, $\chi_{trg} = 0.95$ için $\eta = 3\rho$ ve $\chi_{trg} = 0.99$ için sürekli enerji modeli kullanılması durumunda elde edilmiştir. Ayrıntılı detaylar Tablo 5.2'de

verilmiştir. Buradan da görüleceği ve Şekil 5.16'ya ait değerlendirmelerde bahsedildiği gibi ayrık HCB-LNS enerji enerjisi kullanılan bazı durumlarda alışılmışın aksine elde edilen ağ yaşam süresi sürekli duruma göre daha yüksek olmaktadır.

- Global olarak, incelenen değerler arasında en yüksek ağ yaşam süresi $\chi_{trg} = 0.93$ ve $\eta = 7\rho$ durumunda elde edilmektedir.
- PRR'nin artmasıyla paketlerin iletimini garantilemek için gereken yeniden gönderme sayıları düşmekte, bu sayede ayrık enerji kullanıldığı durumda daha iyi ağ yaşam süreleri elde edilebilmektedir.

Bu kez farklı χ_{trg} değerleri için ağ yaşam süresinin ayrıklaştırma oranına (η/ρ) göre değişimini incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.18'de paylaşılmıştır. Tüm değerler $\chi_{trg}=0.94$ için elde edilen ağ yaşam süresine göre normalize edilerek verilmiştir.



Şekil 5.18: Farklı χ_{trg} değerleri için en küçük kullanılabilir enerji seviyesinin (η) bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m$, $N = 100$).

Sonuçlara ait değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Şekil 5.16'da yer alan değerlendirmelerde de bahsi geçen ayrık enerji modelinin ağ yaşam süresine sağladığı avantajlar belli bir seviyeye kadar görülmekte, en küçük kullanılabilir enerji değeri yeterince büyüdüğünde ağ yaşam süresi her durumda azalmaktadır.

- Optimum χ_{trg} değerinde (0.94), kullanılabilir en küçük enerji seviyesinin çok büyük olmadığı ($\eta < 20\rho$) durumlarda ağ yaşam süresinde önemli bir değişiklik görülmemektedir. Daha küçük χ_{trg} değerlerinde belli bir ayrıklaştırma seviyesine kadar ($\eta = 60\rho$) ağ yaşam süresi artmakta bu noktadan sonra azalmaya başlamaktadır.
- Enerjinin daha geniş aralıklarla ayarlanabildiği yani nispeten daha büyük η değerlerinde ağ yaşam süresine ait standart sapmada azalma görülmektedir.

5.2.4 KAA'larda İletim Gücü Atama Stratejilerinin Analizi

Bu bölümde Bölüm 4.3.4'te tanımlanan DP ve KTDP modelleri çözdürülerek farklı güç atama stratejilerinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İki farklı çalışmada [21, 22] yapılan deneysel ölçümler kullanılarak yol kaybının göz önüne alındığı ve alınmadığı durumlar iki alt başlıkta analiz edilmiştir.

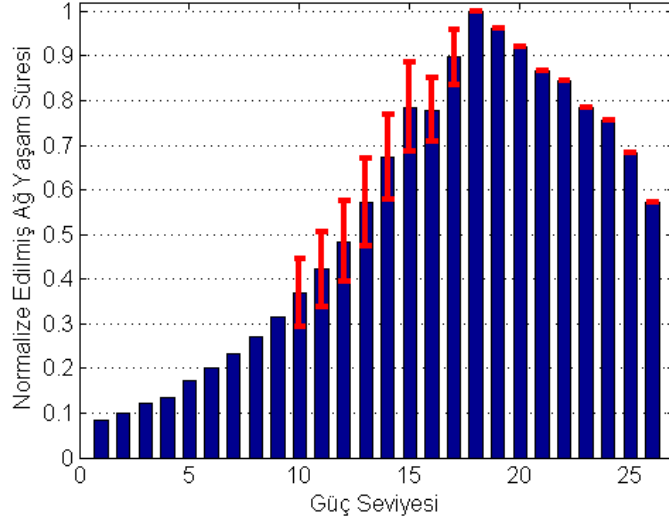
5.2.4.1 Yol Kaybının Göz Önüne Alınmadığı Durum

Bu kısım Vales-Alonso ve arkadaşlarının [21]'de elde ettikleri ve Tablo 4.1'de verilen güç seviyeleri, iletim mesafeleri ve iletim enerjileri kullanılarak daha önce tanımlanan PNM-SL, PLM-ML, PNM-ML ve PSM-ML modellerini incelemek üzere 2-boyutlu topolojide yapılan araştırmaları içermektedir. Burada paketlerin alıcıya ulaşma olasılıkları 0 veya 1 ile ifade edilmiş, yol kayıpları dikkate alınmamıştır.

Daha önce anlatıldığı üzere, PNM-SL modelinde çalışma öncesinde ağ genelinde kullanılmak üzere ortak bir güç seviyesi seçilmekte ve seçilen değer çalışma süresi boyunca değişmemektedir. İlk olarak PNM-SL modelinde hangi güç seviyesi seçildiğinde optimum sonuç alındığını görmek için 26 güç seviyesi ile elde edilebilen en yüksek ağ yaşam süresi ayrı ayrı bulunmuş ve sonuçlar Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Tüm sonuçlar bulunan en yüksek ağ yaşam süresine göre normalize edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda verilmiştir:

- En yüksek ağ yaşam süresi 18. güç seviyesinde elde edilmektedir.



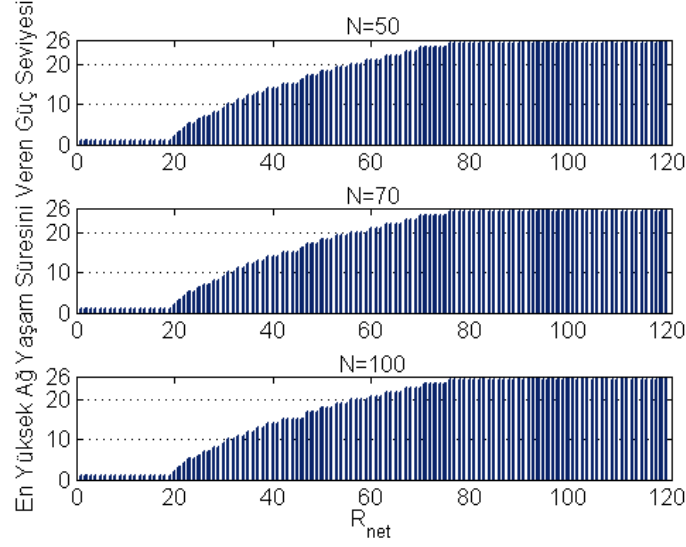
Şekil 5.19: PNM-SL modelinde kullanılan güç seviyesinin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

- En düşük güç seviyesi (1) kullanıldığında en düşük ağ yaşam süresi elde edilmekte, bu değer optimum ağ yaşam süresinin sadece %8'ine karşılık gelmektedir.
- En uzun mesafeye gönderim yapabilen güç seviyesi (26) seçildiğinde ise ağ yaşam süresi optimum ağ yaşam süresinin %57'sine karşılık gelmektedir.
- Ağ yaşam süresi güç seviyesinin artmasıyla birlikte optimum güç seviyesine kadar artmakta, bu değerden sonra düşmektedir. Bu değerden sonra düşmesinin sebebi daha düşük güç seviyelerinde daha az enerji harcanarak görev tamamlanabilecekken optimal olmayan güç seviyesinde daha fazla enerji harcanmasıdır.

Daha sonra PNM-SL modelinde ağın yayılım yüzeyi ve düğüm sayısı değiştiğinde hangi güç seviyelerinin optimum çözümü verdiği incelenmiştir. Bu amaçla 26 güç seviyesi için R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak üç farklı düğüm sayısında hangi güç seviyesinde en yüksek ağ yaşam süresinin elde edildiği bulunmuş ve sonuçlar Şekil 5.20'de gösterilmiştir.

Buna göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Ağdaki düğüm sayısı sabit tutulduğunda, en yüksek ağ yaşam süresini veren güç seviyesi R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak önemli ölçüde değişmektedir.

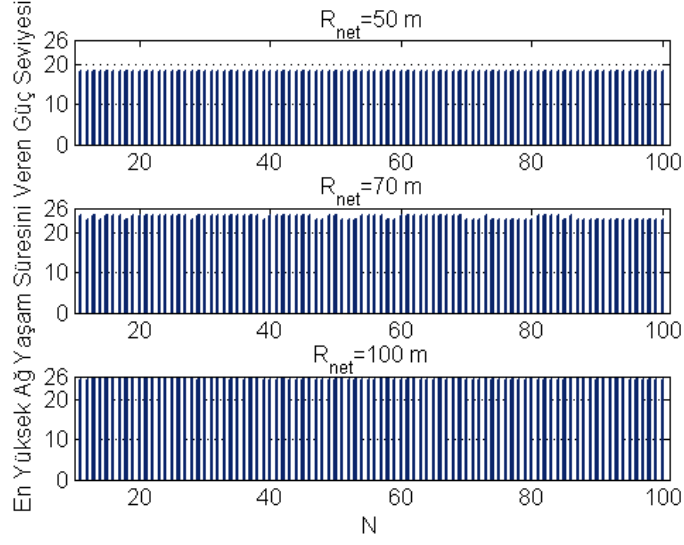


Şekil 5.20: PNM-SL modelinde farklı düğüm sayıları için R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.

Genel eğilim, ağın yayılım yüzeyi arttıkça daha yüksek güç seviyesini seçmek şeklindedir.

- Düğüm sayısının değişmesi güç seviyesi seçimini etkilememekte, tüm düğüm sayıları için benzer örüntü izlenmektedir.
- Ağın yayılım yüzeyi yeteri kadar genişlediğinde optimum ağ yaşam süresi için en yüksek güç seviyesi kullanılmaktadır. Bunun nedeni ağın seyrekleşmesi, başka bir deyişle düğümler arasındaki ortalama mesafenin artmasıdır.
- İdeal çözümler için geçerli olmak üzere, en az bir düğüm için diğer düğümlere olan en kısa mesafe R_{net} kadar olmaktadır. Optimal olmayan çözümlerde bu mesafe daha da artabilmektedir. En az bir düğüm için diğer düğümlere minimum R_{net} kadar mesafe olması, genelde en az bu mesafeye gönderim yapabilen en düşük güç seviyesi tercih edilmesine neden olmaktadır. Örneğin, $R_{net}=26$ m için bu mesafeye gönderim yapabilen en düşük güç seviyesi olan 7. seviye, $R_{net}=40$ m için 14. seviye ve $R_{net}=53$ m için 19. seviye kullanılmaktadır.

Düğüm sayısı değişiminin etkilerini daha net görebilmek üzere 26 güç seviyesi için hangi güç seviyelerinin en yüksek ağ yaşam süresini verdiği incelenmiş, bu kez düğüm sayısının (N) bir fonksiyonu olarak üç farklı R_{net} değeri için optimum çözümü veren güç seviyeleri Şekil 5.21'de verilmiştir.



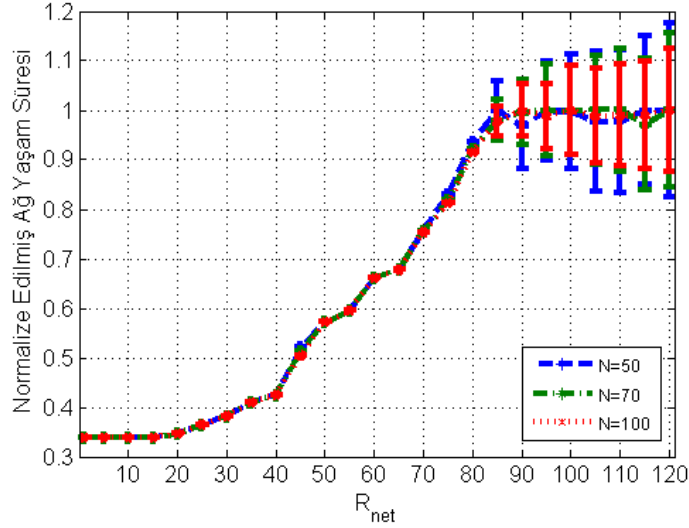
Şekil 5.21: PNM-SL modelinde farklı R_{net} değerleri için düğüm sayısının bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.

Sonuçlara ilişkin yorumlar aşağıda sıralanmıştır:

- Ağın yayılım yüzeyi sabit kalırken düğüm sayısının değişmesi, güç seviyesi seçiminde önemli bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bu durum düğüm sayısının belli bir değeri ($N=10$) geçmesinden sonra yani yeteri ağda yeteri kadar düğüm olduğunda gözlenmektedir.
- Şekil 5.20'deki sonuçlara paralel olarak R_{net} arttıkça optimum ağ yaşam süresi elde etmek için kullanılması gereken güç seviyesi artmaktadır.

Ardından "PNM-SL modelinde kullanılacak güç seviyesini seçmenin pratik bir yolu var mıdır?" sorusuna bir cevap bulabilmek için en yüksek güç seviyesinde gönderim yapıldığında ağ yaşam süresinin nasıl etkilendiği daha detaylı incelenmiştir. Şekil 5.19'da en uzun mesafeye gönderim yapılabilen güç seviyesi yani 26. güç seviyesi kullanıldığında optimum duruma kıyasla ağ yaşam süresinde %43 düşüş olduğu belirtilmiştir. Ancak sadece bir düğüm sayısı ve ağ yayılım yüzeyi yarıçapı ($N=50$, $R_{net}=50$ m) değeri karakteristiği belirlemek için yeterli değildir. Dolayısıyla en yüksek güç seviyesi kullanıldığında ağ yaşam süresindeki değişiklik daha geniş bir bölgede farklı düğüm sayıları ve R_{net} değerleri için incelenmiştir. Üç farklı düğüm sayısı için R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak elde edilen ağ yaşam süreleri Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Buradaki tüm ağ yaşam süreleri, ilgili R_{net} değerinde elde edilen optimum ağ yaşam süresi ile normalize edilmiştir. Örneğin $R_{net}=25$

m için belli bir düğüm sayısında bulunan ağ yaşam süresi Şekil 5.20'de $R_{net}=25$ m için ilgili düğüm sayısında bulunan optimum ağ yaşam süresi ile, $R_{net}=70$ m için bulunan ağ yaşam süresi Şekil 5.20'de $R_{net}=70$ m için ilgili düğüm sayısında bulunan optimum ağ yaşam süresi ile normalize edilmiştir.



Şekil 5.22: PNM-SL modelinde farklı düğüm sayılarında R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri.

Sonuçlara ait değerlendirmeler şu şekildedir:

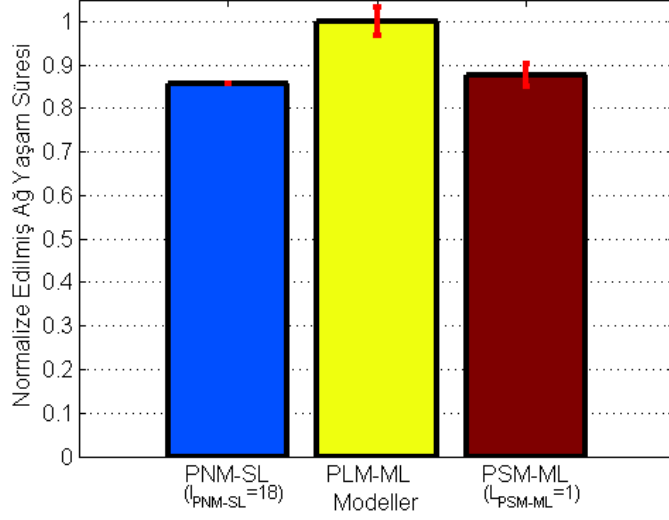
- Ağın yayılım yüzeyinin yarıçapı, maksimum güç seviyesinin kullanımını belirlemede önemli bir etkiye sahiptir. Daha küçük yarıçap değerlerinde en yüksek güç seviyesini kullanmak kötü sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni daha düşük seviyelerde iletim gerçekleşebilecek olmasına rağmen en yüksek güç tüketimi vasıtasıyla iletim yapılmasıdır.
- Belli bir yarıçap değerinden ($R_{net}=82$ m) itibaren en yüksek güç seviyesi ile elde edilen ağ yaşam süresi, her koşulda optimum ağ yaşam süresinin %4 yakınında yer almaktadır. Bunun nedeni de yarıçap arttıkça düğümlerin ortalamada birbirinden uzaklaşmasıdır.
- Düğüm sayısı yeteri kadar yüksek olduğunda ($N=10$) en yüksek güç seviyesinin kullanımını belirlemede ağ yaşam süresi açısından önemli bir etkiye sahip değildir.
- Dolayısıyla, yeteri kadar büyük düğüm sayısı ve yarıçap değerlerinde ağ

yaşam süresi değerinden çok önemsiz bir miktar feragat edilerek standart olarak en yüksek güç seviyesi kullanılabilir.

Hemen ardından tek bir güç seviyesi kullanılabilir olduğu durumda, daha önce tanımlanan üç farklı modeli ağ yaşam süreleri açısından birbiriyle karşılaştırmak üzere bir inceleme yapılmıştır. PNM-SL modeli ile herhangi bir güç seviyesinde elde edilen optimum ağ yaşam süresi kullanılmıştır. Bu değer Şekil 5.19'da verildiği üzere $l_{PNM-SL}=18$ olduğu durumda elde edilmektedir. PSM-ML modelinde ise tek bir güç seviyesi kullanılabilir olduğu durumda yani $L_{PSM-ML}=1$ için elde edilen ağ yaşam süresi bulunmuştur. Bu durum aslen her düğümün 26 seviye içerisinde kendisine özel bir güç seviyesi seçtiği durumu ifade etmektedir. Örneğin ağdaki bir düğüm diğer düğümlere paket gönderirken 7. güç seviyesini kullanırken, başka bir düğüm diğer tüm düğümlere gönderim yaparken 15. güç seviyesini kullanmakta ve seçilen bu değerler çalışma süresi boyunca değişmemektedir. Yani herhangi bir düğüm farklı iki düğüme gönderim yaparken farklı güç seviyesi kullanamamakta, ancak düğüm bazında seçilen güç seviyesi her düğüm için birbirinden farklı olabilmektedir. PLM-ML modelinde ise bağlantılar arasında tek bir kullanılabilir güç seviyesi olması tanım gereği modeli etkilememektedir. Yani bir düğüm başka bir düğüme iletim yaparken bir güç seviyesinde, üçüncü bir düğüme iletim yaparken başka bir güç seviyesinde transferi gerçekleştirebilmektedir. Örneğin A düğümü B düğüme iletim yaparken 11., C düğüme iletim yaparken 19., D düğüme iletim yaparken 26. güç seviyesini seçebilmektedir. Sadece aynı düğüme gönderirken farklı zamanlarda farklı güç seviyesi kullanamamaktadır. Bu da optimum durum için sağlanması gereken bir şarttır. Bu doğrultuda $l_{PNM-SL}=18$ için PNM-SL, $L_{PSM-ML}=1$ için PSM-ML ve PLM-ML modelleri çözdürülmüş ve elde edilen ağ yaşam süreleri, bulunan en yüksek ağ yaşam süresi ile normalize edilerek sonuçlar Şekil 5.23'te verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan değerlendirmeler aşağıda yer almaktadır:

- Beklenildiği gibi en yüksek ağ yaşam süresi iletim gücünün en hassas ayarlandığı PLM-ML modeli ile elde edilmektedir.
- Düğüm bazında güç seviyesi seçilebilen PSM-ML modeli ile elde edilen ağ yaşam süresi, ağ genelinde güç seviyesi seçilen duruma kıyasla %2 daha iyi



Şekil 5.23: Güç atama stratejilerinin ağ yaşam süresi açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

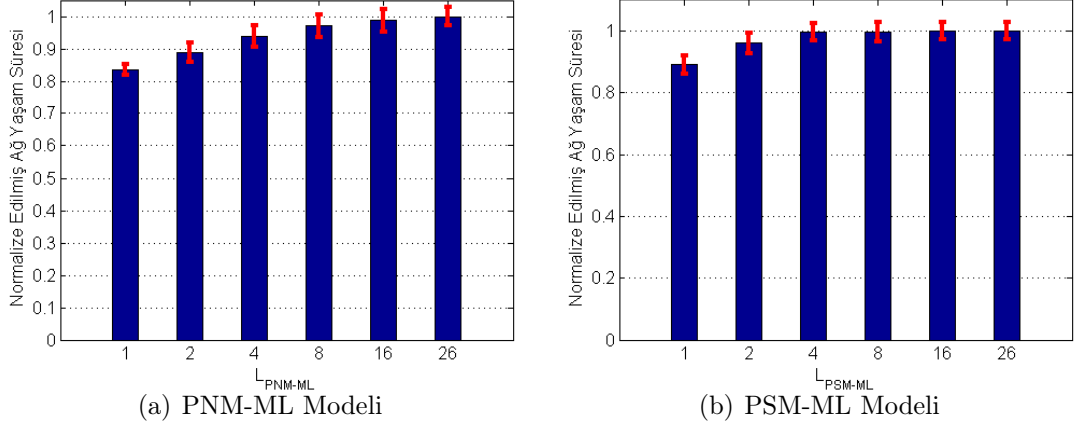
sonuç vermektedir. Başka bir deyişle PSM-ML modeli, PNM-SL modelinden elde edilebilen ağ yaşam süresi açısından %2 daha verimlidir.

- PLM-ML modeli ile elde edilen ağ yaşam süresi, PSM-ML modelinde elde edilenden %14 daha fazladır.

Karşılaştırmanın ardından PNM-ML ve PSM-ML modellerinde mevcut güç seviyeleri içerisinde daha az sayıda güç seviyesi kullanarak, başka bir deyişle güç seviyesi kümesinin bir alt kümesinden faydalanarak optimum ağ yaşam süresinin elde edilip edilemeyeceği konusu incelenmiştir. Bunun için Bölüm 4.3.4'te tanımlanan KTDP modelleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda yapılan analizlerin sonucu olarak Şekil 5.24'te L_{PNM-ML} ve L_{PSM-ML} 'in bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri gösterilmiştir. Burada L_{PNM-ML} ve L_{PSM-ML} , sırasıyla PNM-ML ve PSM-ML modelindeki kullanılabilir güç seviyesi sayısının üst limitini göstermektedir. Kullanılabilir güç seviyesi sayıları 1, 2, 4, 8, 16 ve 26 olacak şekilde ağ yaşam süreleri bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Değerlerin daha sağlıklı karşılaştırılabilmesi açısından elde edilen normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ve standart sapmalar ayrıca Tablo 5.3'te verilmiştir.

Sonuçlarla ilgili aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- PNM-ML modelinde optimum ağ yaşam süresini elde etmek için mevcut



Şekil 5.24: Kullanılabilen güç seviyesi sayısının bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süresi ($R_{net} = 50$ m, $N = 50$).

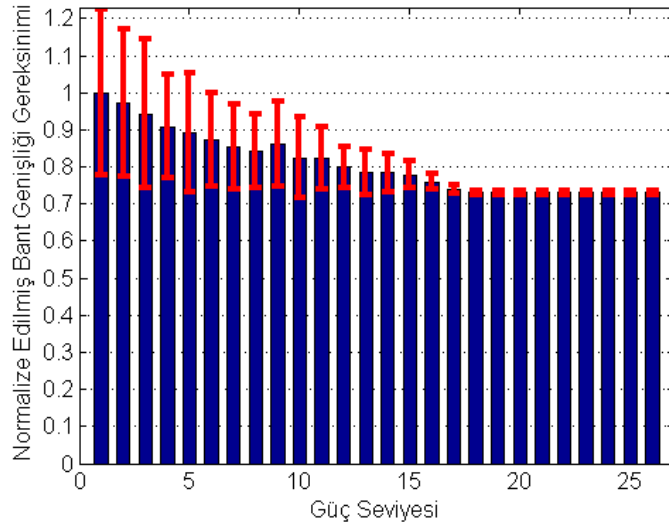
güç seviyelerinin tamamını kullanmak gerekmektedir. Kullanılabilecek güç seviyesi sayısı düşürüldüğünde ağ yaşam süresinde az da olsa azalma görülmektedir. Tablo 5.3'te görüldüğü üzere $L_{PNM-ML} = 8$ ve $L_{PNM-ML} = 16$ için normalize edilmiş ağ yaşam süreleri sırasıyla 0.97 ve 0.99'dur. Dolayısıyla ağ yaşam süresindeki bu düşüş miktarı ihmal edildiğinde güç seviyelerinin daraltılmış bir alt kümesi ($L_{PNM-ML} \geq 8$) ile optimuma oldukça yakın bir çözüm elde edilmektedir. Sadece 1 güç seviyesi kullanılabilir olduğunda elde edilen çözüm optimum çözümün %84'üne karşılık gelmektedir.

- PSM-ML modelinde, güç seviyelerinin sadece 4 tanesinin kullanılabildiği durumda 26 adet güç seviyesi kullanıldığında elde edilen kadar iyi çözüm elde edilmektedir. Tek bir güç seviyesi kullanılabildiği durumda ağ yaşam süresinde %11 azalma görülmektedir.

Tablo 5.3: L_{PNM-ML} ve L_{PSM-ML} için normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($N = 50$, $R_{net}=50$ m.)

L_{PNM-ML}/L_{PSM-ML}	<i>PNM-ML</i>	<i>PSM-ML</i>
1	0.84 ± 0.08	0.89 ± 0.10
2	0.89 ± 0.10	0.96 ± 0.11
4	0.94 ± 0.09	1.00 ± 0.14
8	0.97 ± 0.10	1.00 ± 0.10
16	0.99 ± 0.11	1.00 ± 0.09
26	1.00 ± 0.09	1.00 ± 0.09

Buraya kadar yapılan analizlerde farklı güç stratejileri analiz edilirken yeterli bant genişliği olduğu düşünölmüş ve yapılan analizlerde bant genişliği kısıtları dikkate alınmamıştır. Bu aşamada Bölüm 4.3.4.1’de bahsedilen yöntem ile önce PNM-SL modelinde her güç seviyesinin ihtiyaç duyduğu bant genişliği analiz edilmiştir. 26 güç seviyesi için elde edilen sonuçlar Şekil 5.25’te gösterilmiştir. Tüm sonuçlar elde edilen en yüksek bant genişliği ile normalize edilmiştir.



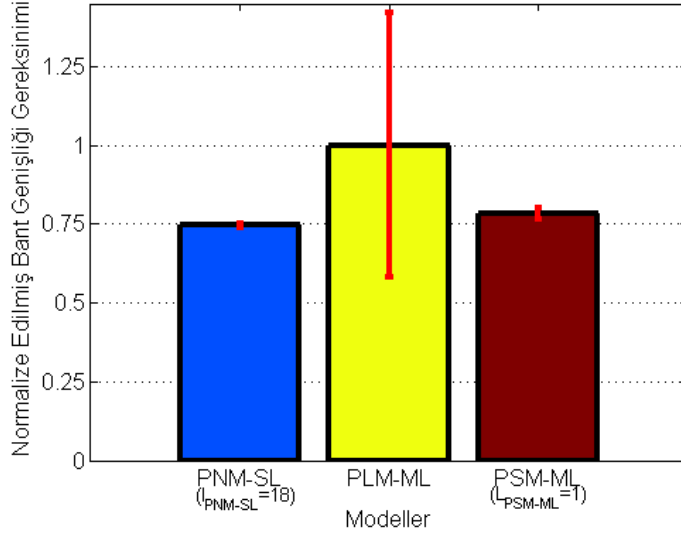
Şekil 5.25: PNM-SL modelinde her güç seviyesinin minimum bant genişliği gereksinimi ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

Bulunan sonuçlara dair değerlendirmeler aşağıda yer almaktadır:

- Tüm güç seviyeleri içinde en fazla bant genişliği gereksinimi 1. güç seviyesinde, en düşük bant genişliği ihtiyacı ise 26. güç seviyesinde gerçekleşmektedir. En fazla bant genişliği gerektiren 1. güç seviyesi aynı zamanda en düşük ağ yaşam süresinin elde edildiği seviyedir (Şekil 5.19).
- Genel olarak kullanılan güç seviyesi arttıkça bant genişliği ihtiyacı azalmaktadır. Belli bir güç seviyesinden itibaren bant genişliği ihtiyacı değişmemektedir.
- En yüksek bant genişliği ihtiyacı ile en düşük bant genişliği ihtiyacı arasında yaklaşık %30 fark bulunmaktadır.

Daha sonra incelenen PNM-SL, PLM-ML ve PSM-ML modellerinin optimum ağ yaşam süresini elde etmek için ihtiyaç duydukları bant genişliği gereksinimleri

analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 5.26'da gösterilmiştir. PNM-SL modelinde optimum ağ yaşam süresi 18. güç seviyesinde elde edildiği için $l_{PNM-SL}=18$ durumundaki bant genişliği ihtiyacı, PSM-ML modelinde de $L_{PSM-ML}=1$ durumundaki bant genişliği ihtiyacı göz önüne alınmıştır. Tüm bant genişliği değerleri bulunan en yüksek bant genişliği ile normalize edilmiştir.



Şekil 5.26: Güç atama stratejilerinin bant genişliği gereksinimleri açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

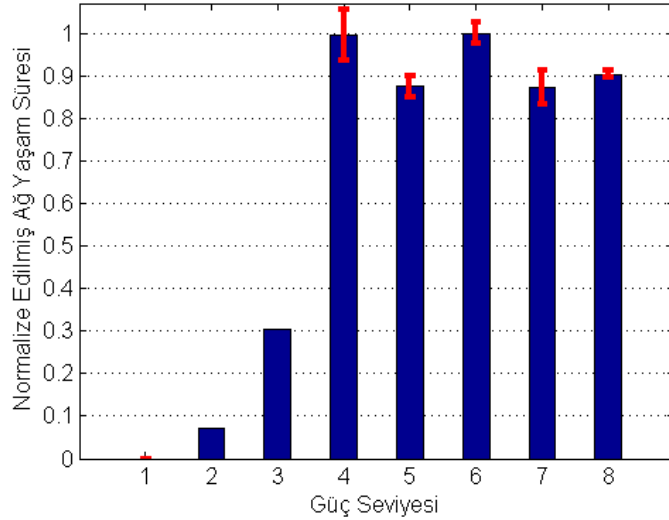
Sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- En fazla bant genişliği gereksinimi PLM-ML modelinde görülmektedir.
- PNM-SL modeli, PSM-ML modeline göre %4 daha az bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır.
- PLM-ML modeli, PNM-SL modeline kıyasla %25 daha fazla bant genişliği gerektirmektedir.
- En iyi ağ yaşam süresinin elde edildiği model (PLM-ML), aynı zamanda en fazla bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır. Benzer şekilde en düşük ağ yaşam süresini veren model (PNM-SL) de en az miktarda bant genişliği gerektirmektedir. Bunun sebep olarak ağ yaşam süresini arttırmak ile bant genişliği ihtiyacını azaltmanın birbiriyle yarışan iki amaç olması gösterilebilir.
- Modelin belli sayıda çalıştırılması sonucu oluşan standart sapma en fazla PLM-ML modelinde görülmektedir.

5.2.4.2 Yol Kaybının Göz Önüne Alındığı Durum

Bu kısımda Mallinson ve diğerlerinin [22]'de elde ettikleri ve Tablo 4.2'de verilen güç seviyeleri, iletim mesafeleri ve iletim enerjilerinin yanında PRR değerleri de kullanılarak daha önce tanımlanan PNM-SL-PL, PLM-ML-PL, PNM-ML-PL ve PSM-ML-PL modellerini incelemek üzere 2-boyutlu topolojide araştırmalar yapılmıştır. Böylece yol kayıpları dikkate alınarak güç atama stratejileri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu kez 26 güç seviyesi yerine CC2420 yongasında belirlenmiş 8 güç seviyesi kullanılmıştır. Bu seviyelerin 26 seviyeli güç kontrolü yapılabilen kümede hangi seviyelere karşılık geldiği Bölüm 4.3.4.2'de verilmiştir.

İlk olarak Bölüm 5.2.4.1'de olduğu gibi PNM-SL-PL modelinde en yüksek ağ yaşam süresinin hangi güç seviyesinde elde edildiğini görmek için 8 güç seviyesine ait en yüksek ağ yaşam süreleri ayrı ayrı bulunmuş ve sonuçlar Şekil 5.27'de gösterilmiştir. Tüm sonuçlar bulunan en yüksek ağ yaşam süresine göre normalize edilmiştir.



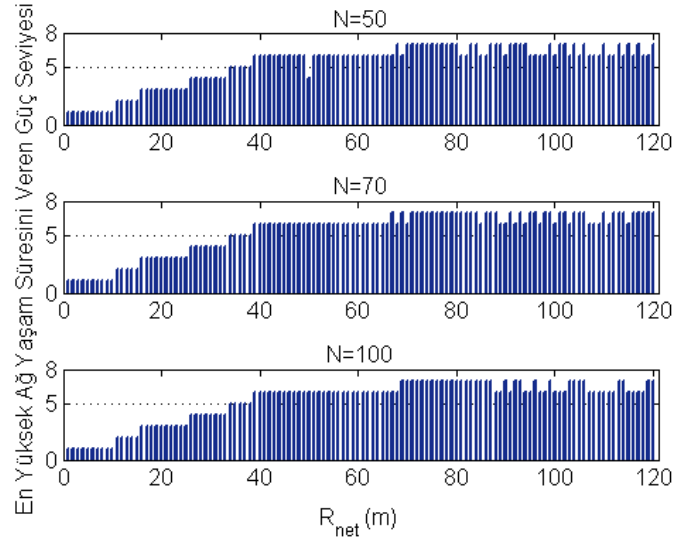
Şekil 5.27: Yol kayıplı PNM-SL modelinde kullanılan güç seviyesinin bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

Bulunan sonuçlarla ilgili yorumlar aşağıdaki gibidir:

- Optimum ağ yaşam süresi 6. güç seviyesinde elde edilmektedir. Bu güç seviyesi PNM-SL modelinde kullanılan 18. güç seviyesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla hem PNM-SL, hem de PNM-SL-PL modellerinde optimum ağ yaşam süresi ne en küçük, ne de en büyük güç seviyesi ile elde edilmektedir.

- En yüksek güç seviyesini kullanmak enerji kaybına neden olmakta ve ağ yaşam süresinde %11'lik bir düşüğe neden olmaktadır. Bunun nedeni baz istasyonunun tüm düğümlere en fazla 50 m uzaklıkta olması ve daha düşük güç seviyeleri kullanılarak iletim sağlanabilmesidir. Sonuç olarak PNM-SL ve PNM-SL-PL modelleri için optimum çözüm ara güç seviyeleri kullanıldığında elde edilmektedir.
- En düşük güç seviyesini kullanmak en kısa ağ yaşam süresini vermektedir. Bu güç seviyesi sadece 10 m uzaklığa iletim yapabildiği için çoğu durumda bir çözüm üretilememekte, çünkü en az bir düğümün diğer tüm düğümler ile arasında 10 m'den fazla mesafe bulunmaktadır.

PNM-SL-PL modelinde bu kez, ağın yayıldığı yüzey alanı ve düğüm sayıları değiştiğinde optimum çözümün hangi güç seviyelerinde elde edildiği incelenmiştir. Bu doğrultuda üç farklı düğüm sayısında ağın yayılım yüzeyinin bir fonksiyonu olarak 8 güç seviyesi için ağ yaşam süreleri ayrı ayrı bulunmuş ve hangi güç seviyesinin optimum çözümü verdiği Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28: PNM-SL-PL modelinde farklı düğüm sayıları için R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.

Sonuçlar değerlendirildiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

- PNM-SL-PL modelinde ağdaki düğüm sayısı sabit tutulduğunda, en yüksek ağ yaşam süresini veren güç seviyesi R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak kademeli

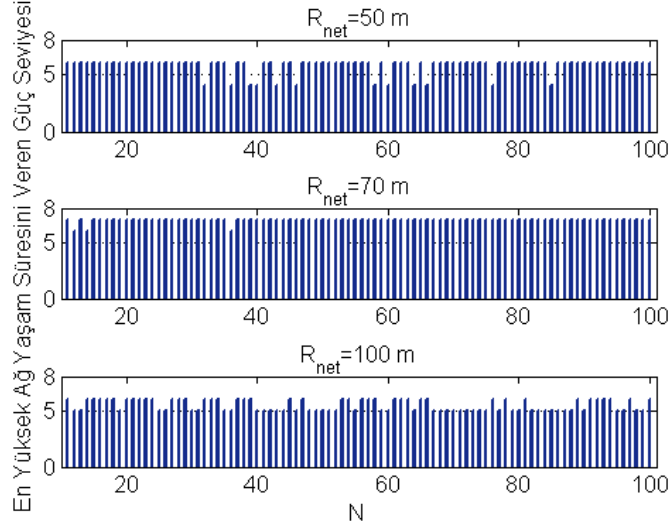
olarak değişmektedir. Ağın yayılım yüzeyi arttıkça kademeli olarak seçilen güç seviyesi de artmaktadır. PNM-SL modelinde daha fazla güç seviyesi kullanılarak daha hassas güç kontrolü yapıldığı için artış daha düzenli olmakta, PNM-SL-PL modelinde ise kullanılan güç seviyesi belli kırılımlarda artmaktadır.

- Düğüm sayısının seçilen güç seviyesi üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir. Tüm düğüm sayıları için benzer örüntü izlenmektedir.
- Ağın yayılım yüzeyi yeteri kadar genişlediğinde optimum ağ yaşam süresi için en uzun mesafeye gönderim yapabilen 6. ve 7. güç seviyeleri tercih edilmektedir. Bunun sebebi [22]'de yapılan ölçümlerde 6., 7. ve 8. güç seviyelerinin hepsinin en fazla 65 m mesafeye iletim yapabilmeleri, ancak ölçülen PRR değerlerinin farklı olmasıdır. 8. güç seviyesinin hiç tercih edilmemesinin sebebi, 65 m mesafeye gönderim yaparken 6. güç seviyesi ile aynı PRR değerine sahip olması, ancak aynı zamanda %16 daha fazla enerji harcamasıdır. 7. güç seviyesi 65 m mesafede en iyi PRR değerini sağlamakta (0.7), 6. güç seviyesine göre %11 daha fazla enerji harcamaktadır. Bu nedenle bazı durumlarda 6., bazı durumlarda 7. güç seviyesi optimum ağ yaşam süresini vermektedir.

Düğüm sayısındaki değişimin etkilerini daha net görebilmek üzere, 8 güç seviyesi için ayrı ayrı en yüksek ağ yaşam süresini veren güç seviyeleri bulunmuş ve bu kez düğüm sayısının (N) bir fonksiyonu olarak üç farklı R_{net} değeri için ideal çözümü veren güç seviyeleri Şekil 5.29'da verilmiştir.

Alınan sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıdaki gibi olmuştur:

- Ağın yayılım yüzeyi sabit kalırken düğüm sayısının değişmesi, güç seviyesi seçiminde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır. Bazı özel durumlar sebebiyle, seçilen güç seviyesinde bir takım ufak değişikliklere rastlanmıştır. Örneğin $R_{net}=50$ m için genelde 6. güç seviyesini seçmek ideal çözümü verirken, 4. güç seviyesinin PRR ve enerji tüketimi açısından daha avantajlı olduğu bazı bölgelerde (örneğin $N=32, 36, 39, 40, 43, 58, 60$ olduğu durumlarda) düğümler arasındaki ortalama mesafelerin ağırlıklı olarak bu bölgede olması sebebiyle seçilmesi daha iyi sonuçlar vermektedir.
- Benzer şekilde R_{net} 'in etkileri incelendiğinde ağın yayılım yüzeyi yeteri kadar genişlediğinde yine bazı özel durumlar görülmektedir. Örneğin $R_{net}=50$



Şekil 5.29: PNM-SL-PL modelinde farklı R_{net} değerleri için düğüm sayısının bir fonksiyonu olarak en yüksek ağ yaşam süresi elde edilen güç seviyeleri.

m ve $R_{net}=70$ m için Şekil 5.28’de bahsedilen sebeplerden ötürü beklenildiği gibi genelde 6. ve 7. güç seviyeleri optimum çözümü sağlarken, $R_{net}=100$ m için düğüm sayısının bazı değerlerinde düğümlerin arasındaki ortalama mesafelerin ağırlıklı olarak 35 m civarında yoğunlaşması neticesinde bu bölgeye gönderimde avantajlı olan 5. güç seviyesi en iyi ağ yaşam süresini vermektedir.

Buradaki sonuçlardan anlaşılacağı üzere yol kaybı güç seviyesi seçiminde oldukça önemli rol oynamaktadır. Yol kaybı olmadığı durumda izlenen yöntemin aksine, yol kaybı olduğu durumda her zaman alıcıya olan mesafeye gönderim yapabilen en düşük güç seviyesini seçmek optimum çözümü vermemektedir. Bazı durumlarda olasılıksal iletimin etkisiyle ilgili mesafeye birden fazla güç seviyesi iletim yapabildiği halde en küçük güç seviyesi yerine daha büyük bir güç seviyesi kullanmak PRR’yi arttırdığı için daha iyi çözüm vermektedir. Daha iyi anlaşılabilmesi için referans alınan çalışmadaki mesafeler 5 m aralıklarla ölçümleri verdiği için yine 5 m aralıklarla hangi güç seviyesinin kullanılmasının daha uygun olduğu hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5.4’te verilmiştir. Bu hesaplamada ilgili mesafeye ait PRR değeri alınmış, bu değere bağlı olarak paketin tekrar gönderilme sayısı (λ_{ij}) hesaplanmış, bu sayı ile tüketilen enerji değeri çarpılarak yol kaybı göz önüne alındığında harcanması gereken gerçek enerji miktarları bulunmuştur. Bu doğrultuda ilgili mesafeye en az enerji tüketerek gönderim yapabilen güç seviyesi

belirlenmiştir. Örneğin 35 m mesafedeki bir düğüme iletim için en verimli seçim 5. güç seviyesi olmakta, bu mesafede 5. güç seviyesi ile 0.9 PRR değeri elde edilmektedir. Bu nedenle yol kaybı göz önüne alındığında kullanılması gereken enerji değeri 1.11 (1/0.9) ile çarpılarak 1.198 μJ /bit bulunmaktadır. Aslında 5. güç seviyesinde PRR "1" olduğu durumda harcanan enerji 1.078 μJ /bit olarak gerçekleşmektedir.

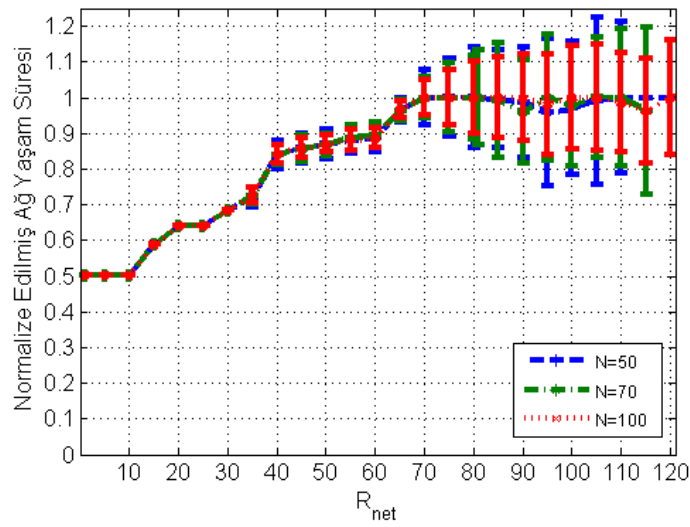
Tablo 5.4: Mica-PL enerji modelinde d_{ij} (m) mesafelerine gönderimde en verimli güç seviyeleri, PRR (χ_{ij}^M) değerleri ve paketlerin tekrar gönderilmesi halinde iletim enerjileri $\lambda_{ij} E_{tx}^{D-HCB}(d_{ij})$ (μJ /bit).

d_{ij}	Opt. Güç Seviyesi	χ_{ij}^M	$\lambda_{ij} E_{tx}^{D-HCB}(d_{ij})$
5 m.	1	1.0	0.672
10 m.	1	1.0	0.672
15 m.	2	1.0	0.724
20 m.	3	1.0	0.789
25 m.	3	1.0	0.789
30 m.	4	1.0	0.844
35 m.	5	0.9	1.198
40 m.	6	1.0	1.135
45 m.	4	1.0	0.844
50 m.	4	0.8	1.055
55 m.	6	1.0	1.135
60 m.	6	1.0	1.135
65 m.	7	0.7	1.763

Tabloda dikkat çeken başka bir husus, iletim mesafesinin artmasıyla genel olarak iletim enerjisinin de artmasıdır. Ancak $d_{ij}=40$ m ve $d_{ij}=45$ m için iletim enerjileri düşmektedir. Bunun nedeni 35-40 m civarında ölçüm yapılan arazide bazı engebelerin bulunması ve bu durumun veriyi düzensiz hale getirmesidir. Yani $d_{ij}=35$ m için 4. güç seviyesinde, $d_{ij}=40$ m için 4. ve 5. güç seviyelerinde elde edilen PRR değerlerinin düşük çıkması nedeniyle sırasıyla 5. ve 6. güç seviyesi seçilmektedir. Bu seçim kullanılan iletim enerjisinin de yüksek olması ile sonuçlanmaktadır.

Daha sonra PNM-SL-PL modelinde kullanılacak en uygun güç seviyesini seçme konusunda pratik bir çözüm aramak üzere en uzun mesafeye gönderim yapabilen en verimli güç seviyesinde (7. seviye) gönderim yapıldığında ağ yaşam süresinin nasıl etkilendiği daha detaylı incelenmiştir. Şekil 5.27'ye göre 7. güç seviyesi kullanıldığında optimum duruma kıyasla ağ yaşam süresinde %13 düşüş görülmektedir. Ancak karakteristiği belirlemek için sadece bir düğüm sayısı ve ağ yayılım

yüzeyi yarıçapı ($N=50$, $R_{net}=50$ m) değeri yeterli değildir. Genelleme yapabilmek amacıyla 7. güç seviyesi kullanıldığında ağ yaşam süresindeki değişiklik daha geniş bir bölgede analiz edilmiştir. Üç farklı düğüm sayısı için R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak elde edilen ağ yaşam süreleri Şekil 5.30'da verilmektedir. Tüm ağ yaşam süresi değerleri, kendisine ait R_{net} değerinde elde edilen optimum ağ yaşam süresi ile normalize edilmiştir. Örneğin $N=70$ ve $R_{net}=40$ m için bulunan ağ yaşam süresi Şekil 5.28'de $N=70$ ve $R_{net}=40$ m için bulunan optimum ağ yaşam süresi ile normalize edilmiştir.



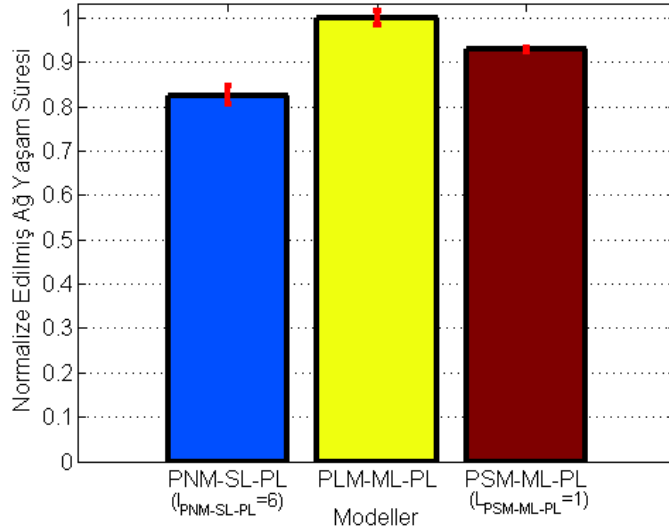
Şekil 5.30: PNM-SL-PL modelinde farklı düğüm sayılarında R_{net} 'in bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süreleri.

Sonuçlara göre yapılan değerlendirmeler aşağıdaki gibi olmuştur:

- Maksimum mesafeye gönderim yapabilen en verimli güç seviyesini (7. seviye) kullanma kararı önemli ölçüde ağın yayılım yüzeyinin yarıçapına bağlıdır. Daha yoğun ağlarda en yüksek güç seviyesini kullanmak kötü sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni daha az enerji harcanarak iletim yapılabilecek olmasına rağmen yüksek güç tüketimi seçilmesidir.
- Belli bir yarıçap değerinden ($R_{net}=65$ m) itibaren 7. güç seviyesi ile elde edilen ağ yaşam süresi, her koşulda optimum ağ yaşam süresinin %5 komşuluğunda yer almaktadır. Bunun nedeni düğümler arası ortalama mesafenin artmasıdır.
- Sonuç olarak, ağ yaşam süresi değerindeki sembolik düşüş göz ardı edilebilirdiğinde, yeteri kadar büyük düğüm sayısı ve yarıçap değerlerinde maksimum

mesafeye gönderim yapabilen en verimli güç seviyesini seçmek optimum sonucu vermektedir. Bu durum yol kaybı olmadığında alınan sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

Daha sonra PNM-SL-PL, PLM-ML-PL ve PSM-ML-PL modellerini ağ yaşam süreleri açısından birbiriyle karşılaştırmak üzere gerekli inceleme yapılmıştır. PNM-SL-PL modelinde optimum güç seviyesinde elde edilen ağ yaşam süresi kullanılmıştır. Şekil 5.27'ye göre optimum ağ yaşam süresi $l_{PNM-SL-PL}=6$ olduğu durumda elde edilmektedir. PSM-ML-PL modelinde her düğümün 8 seviye içerisinde kendisine özel bir güç seviyesi seçtiği durum ($L_{PSM-ML-PL}=1$) ele alınmıştır. Yani herhangi bir düğüm farklı düğümlere gönderim yaparken daima aynı güç seviyesini kullanmakta, ancak düğüm bazında seçilen güç seviyesi her düğüm için birbirinden farklı olabilmektedir. PLM-ML-PL modelinde ise düğümler farklı bağlantılar için farklı güç seviyeleri kullanabilmektedir. Dolayısıyla $l_{PNM-SL-PL}=6$ için PNM-SL-PL, $L_{PSM-ML-PL}=1$ için PSM-ML-PL ve PLM-ML-PL modelleri çözdürülmüş ve elde edilen ağ yaşam süreleri, bulunan en yüksek ağ yaşam süresi ile normalize edilerek sonuçlar Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



Şekil 5.31: Güç atama stratejilerinin ağ yaşam süresi açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

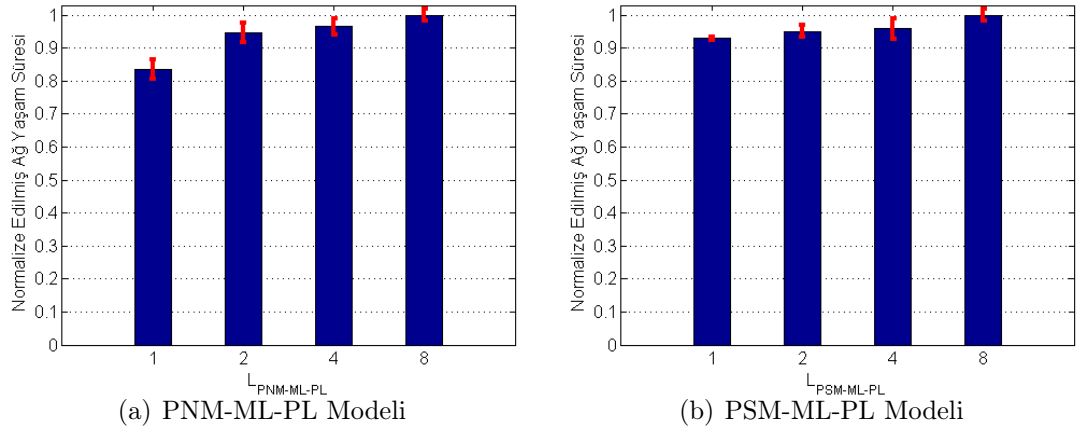
Alınan sonuçlar yorumlanarak yapılan değerlendirmeler aşağıdaki olmuştur:

- İletim gücünün en hassas ayarlandığı PLM-ML-PL modeli, beklenildiği gibi

en yüksek ağ yaşam süresini vermektedir.

- Düğüm bazında güç seviyesi seçilebilen PSM-ML-PL modeli ile elde edilen ağ yaşam süresi, ağ genelinde güç seviyesi seçilen duruma kıyasla %10 daha verimlidir. Diğer deyişle PSM-ML-PL modeli ile elde edilen ağ yaşam süresi, PNM-SL-PL modelinde elde edilene göre %10 daha yüksektir.
- PLM-ML-PL modeli ile elde edilen ağ yaşam süresi, PNM-SL-PL modelinde elde edilenden %18 daha fazladır. Bu sonuçlar yol kaybı göz önüne alınmadığı durumda elde edilenler ile paralellik göstermekte, yol kaybının göz önüne alınması sonuçları etkilememektedir.

Ağ yaşam süresinin karşılaştırılmasının ardından Bölüm 4.3.4'te tanımlanan KTDP modelleri vasıtasıyla mevcut güç seviyelerinin bir alt kümesi kullanılarak optimum sonuç elde edilebilir mi sorusuna cevap aranmıştır. Kullanılabilecek güç seviyesi sayıları 1, 2, 4 ve 8 olacak şekilde modeller çözdürülmüş, bulunan normalize edilmiş ağ yaşam süreleri Şekil 5.32'de $L_{PNM-ML-PL}$ ve $L_{PSM-ML-PL}$ 'in bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Şekildeki değerlerin daha sağlıklı karşılaştırılabilmesi açısından elde edilen normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ve standart sapmalar ayrıca Tablo 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.32: Yol kayıplı modellerde kullanılabilen güç seviyesi sayısının bir fonksiyonu olarak normalize edilmiş ağ yaşam süresi ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

Sonuçlarla ilgili aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Yol kayıplı PNM-ML-PL modelinde, yol kayıpsız duruma benzer şekilde optimum ağ yaşam süresini elde etmek için mevcut güç seviyelerinin

tamamını kullanmak gerekmektedir. Daha az güç seviyesi kullanılabilir olduğunda elde edilen ağ yaşam süresinde azalma görülmektedir. Tablo 5.5'te görüldüğü üzere $L_{PNM-ML-PL} = 2$ ve $L_{PSM-ML-PL} = 4$ için normalize edilmiş ağ yaşam süreleri sırasıyla 0.95 ve 0.97'dir.

- Yol kayıplı PSM-ML-PL modelinde, yol kayıpsız durumun aksine optimum ağ yaşam süresine ulaşmak için güç seviyelerinin hepsinin kullanılması gerekmektedir. $L_{PSM-ML-PL} = 2$ ve $L_{PSM-ML-PL} = 4$ olduğu durumda normalize ağ yaşam süresi 0.95 ve 0.96 olarak gerçekleşmektedir.
- Her iki modelde de ağ yaşam süresindeki bu düşüş miktarı (yaklaşık %5) ihmal edildiğinde güç seviyelerinin daraltılmış bir alt kümesi ($L_{PNM-ML-PL} \geq 2$ ve $L_{PSM-ML-PL} \geq 2$) ile optimuma oldukça yakın bir çözüm elde edilmektedir.

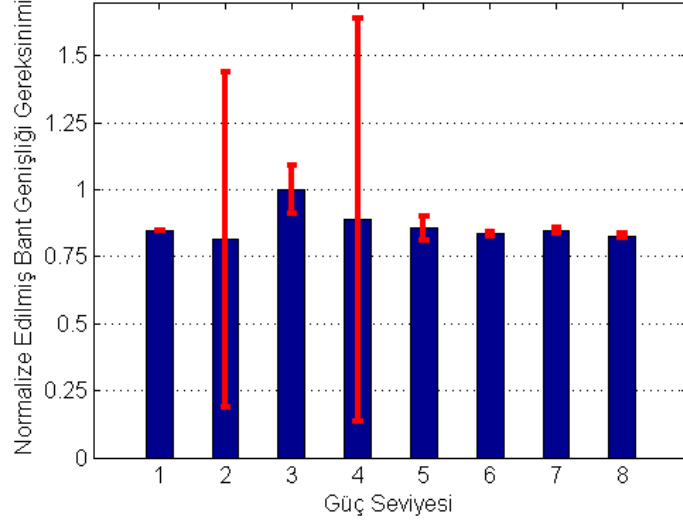
Tablo 5.5: $L_{PNM-ML-PL}$ ve $L_{PSM-ML-PL}$ için normalize edilmiş ağ yaşam süreleri ($N = 50$, $R_{net}=50$ m.)

$L_{PNM-ML-PL}/L_{PSM-ML-PL}$	$PNM-ML-PL$	$PSM-ML-PL$
1	0.84 ± 0.11	0.93 ± 0.03
2	0.95 ± 0.07	0.95 ± 0.06
4	0.97 ± 0.08	0.96 ± 0.08
8	1.00 ± 0.06	1.00 ± 0.06

Buraya kadar yapılan incelemeler, bant genişliği kısıtlarını dikkate almamış, yeterli bant genişliği olduğu düşünülerek yol kayıplı güç atama stratejileri farklı yönlerden irdelenmiştir. Bu kısıtları dikkate alarak optimum çözüm için gerekli bant genişliğini analiz etmek üzere önce PNM-SL-PL modelinde tüm güç seviyeleri için model çözdürülmüş, elde edilen sonuçlar Şekil 5.33'te verilmiştir. Tüm değerler elde edilen en yüksek bant genişliği ile normalize edilmiştir.

Bulunan sonuçlara dair değerlendirmeler aşağıda yer almaktadır:

- PNM-SL-PL modelinde tüm güç seviyeleri içinde en fazla bant genişliği gereksinimi 3. güç seviyesinde gerçekleşmektedir. Bu güç seviyesi kullanıldığında optimum çözümün %30'u kadar ağ yaşam süresi elde edilmektedir.
- PNM-SL modelinde olduğu gibi güç seviyesi arttıkça bant genişliği ihtiyacının azalması durumu burada geçerli olmamaktadır.



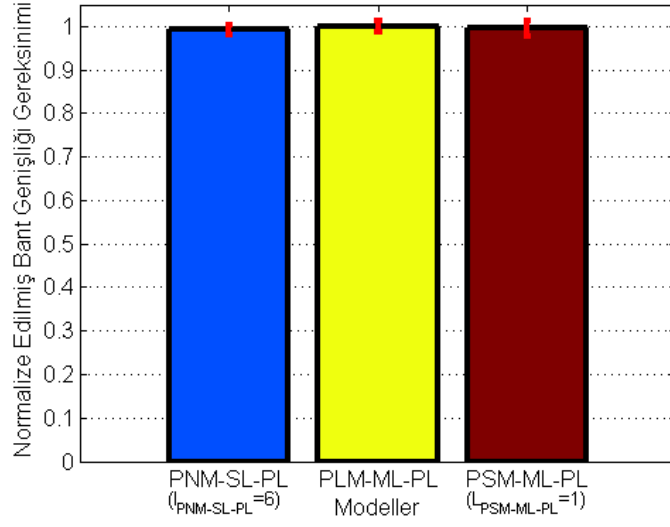
Şekil 5.33: PNM-SL-PL modelinde her güç seviyesinin minimum bant genişliği gereksinimi ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

- Optimum ağ yaşam süresini veren 6. güç seviyesi en az bant genişliği gerektiren seviyelerden birisidir.
- En yüksek bant genişliği ihtiyacı ile en düşük bant genişliği ihtiyacı arasında yaklaşık %20 fark bulunmaktadır.

Son olarak yol kayıplı modelde adı geçen güç atama stratejilerinin bant genişliği ihtiyaçları analiz edilmiştir. Bu aşamaya kadar yeterli olduğu düşünülen bant genişliğinin optimum ağ yaşam süresini veren en küçük değeri her model için ayrı ayrı hesaplanmış, bulunan sonuçlar Şekil 5.34'te gösterilmiştir. PNM-SL-PL modelinde optimum ağ yaşam süresinin elde edildiği 6. güç seviyesi için $l_{PNM-SL-PL}=18$ durumundaki bant genişliği ihtiyacı, PSM-ML-PL modelinde de $L_{PSM-ML-PL}=1$ durumundaki bant genişliği ihtiyacı dikkate alınmıştır. Bulunan değerler, en yüksek bant genişliği ile normalize edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan değerlendirmeler aşağıda yer almaktadır:

- Tüm bant genişliği ihtiyaçları birbirine çok yakın olmakla birlikte, en fazla bant genişliği gereksinimi PLM-ML-PL modelinde görülmektedir.
- PNM-SL-PL modeli, PSM-ML-PL modeline göre %0.3 (binde üç) daha az bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 5.34: Yol kayıplı güç atama stratejilerinin bant genişliği gereksinimleri açısından birbiriyle karşılaştırılması ($R_{net} = 50 m$, $N = 50$).

- Ağ yaşam süresini arttırmak ile bant genişliği ihtiyacını azaltmak arasında görülen ödünleşme nedeniyle en iyi ağ yaşam süresinin elde edildiği model (PLM-ML-PL), aynı zamanda en fazla bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır. Benzer şekilde en düşük ağ yaşam süresini veren model (PNM-SL-PL) de en az miktarda bant genişliği gerektirmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kablosuz algılayıcı ağlarda bant genişliği kısıtlarının, ayrık iletim gücünün ve farklı güç atama stratejilerinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu esnada bant genişliği gereksinimini etkileyen faktörler, pozisyonlama hatalarının ve olasılıksal iletim modelinin sonuçlar üzerindeki tesirleri ayrıca ele alınmıştır. Daha önceki çalışmalarda yer alan algoritma tabanlı analiz ve deneysel ölçümlerden farklı olarak bu çalışmada gerek doğrusal programlama, gerekse karma tamsayı doğrusal programlama modelleri tasarlanarak çok geniş bir yelpazede, bir çok parametre yardımıyla numerik analizler yapılabilmektedir.

Bu çalışmanın motivasyonu Bölüm 1.3'te verilen sorular ile sağlandığı için elde edilen sonuçlar bu sorulara verilen cevaplar şeklinde aşağıda sıralanmıştır:

1. Kablosuz algılayıcı ağlarda bant genişliğinin sınırlı olması ağ yaşam süresinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Sınırsız durumun aksine, belli bir bant genişliğinin (alt limit) altındaki değerlerde en az bir düğümün verisi baz istasyonuna iletilemediği için herhangi bir çözüm üretilememektedir. Benzer şekilde belli bir bant genişliği değeri (üst limit) aşıldıktan sonra, bant genişliğinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkisi kaybolmaktadır. Dolayısıyla bant genişliğinin sadece alt ve üst limit olarak ifade edilen bu aralıktaki değerleri için, sınırsız olduğu duruma kıyasla ağ yaşam süresinde bir miktar düşüş görülmektedir. Yine bu aralıkta bant genişliğinin artması ile ağ yaşam süresi de artmaktadır. İki düğüm haberleştiği esnada iletim mesafesinde yer alan başka bir düğüm üzerinde meydana gelen girişim, bant genişliği gereksinimini arttırmakta, başka bir deyişle sabit bir bant genişliği ile elde edilebilen ağ yaşam süresini azaltmaktadır.
2. Belirlenen herhangi bir düğüm sayısı ve veri üretim oranı değerlerinde

bant genişliğinin sınırsız olduğu durumda elde edilebilen optimum ağ yaşam süresini sınırlı durumda yakalayabilmek için iki aşamalı bir yöntem izlenmektedir. Bant genişliği sınırsız kabul edilerek en yüksek ağ yaşam süresi bulunduğundan sonra aynı ağ parametreleri kullanılarak bant genişliği kısıtları altında bu değerin elde edilebildiği en düşük bant genişliği miktarı hesaplanmakta ve bulunan değer ağdaki global gereksinimi ifade etmektedir.

3. Buldukları konum itibarıyla baz istasyonuna daha yakın olan düğümler daha fazla bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır. Bunun sebebi, bu düğümlerin kendi verileriyle birlikte uzakta yer alan düğümlerin verilerini de baz istasyonuna iletmeleridir. Kullanılabilen kanal bant genişliği miktarı azaldıkça bu değeri kullanan düğüm sayısı artmaktadır.
4. Mica düğümlerinde desteklenebilen en yüksek veri üretim oranı, mevcut bant genişliği ve enerji miktarı ile sınırlıdır. Bant genişliği ve enerji tüketimi de iletim menzili (t_r), düğümler arası mesafe (d_{ij}), yol kaybı katsayısı (α), ağın yayılım yüzeyinin yarıçapı (R_{net}), düğüm sayısı (N) ve girişim faktörüne (γ) bağlı olduğu için bahsi geçen tüm parametreler veri üretim oranının belirlenmesinde rol oynamaktadır.
5. Kablosuz algılayıcı ağlarda bant genişliği ihtiyacı ile diğer ağ parametreleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Ağdaki düğüm sayısının, girişim faktörünün, düğümler arası mesafenin, veri üretim oranının, ağın yayılım yüzeyinin ve yol kaybı katsayısının artmasıyla bant genişliği ihtiyacı artmakta, ağ yaşam süresi azalmaktadır. Ancak iletim menzili arttıkça ağ yaşam süresi artarken, aynı zamanda bant genişliği gereksinimi diğerlerinin aksine sınırlı bir biçimde artmaktadır.
6. Kablosuz algılayıcı ağlarda belli parametreler altında, bant genişliği sınırlanması olmadan elde edilebilen optimum enerji sarfiyatı hesaplandıktan sonra aynı enerjiyi kullanarak görevi tamamlayan minimum bant genişliği hesap edilebilmektedir. Böylece en az hangi bant genişliği sağlandığında optimum çözüm elde edilebilir sorusunun cevabı bulunabilmektedir. Bulunan bant genişliği değerinde kullanılacak en yüksek veri üretim oranı ise düğüm sayısı ile orantılı olarak belirlenebilmektedir. Her düğümün eşit veri ürettiği ve tüm düğümlerin baz istasyonuna doğrudan iletim yaptığı durumda, belirlenen bant genişliği değeri düğüm sayısına bölünerek desteklenebilen veri üretim oranı hesaplanmaktadır.

7. Genel olarak bakıldığında ayırık iletim gücü kontrolü yapılan her durumda, iletim gücünün sürekli ayarlanabildiği duruma kıyasla ağ yaşam süresinde düşüş gözlenmektedir. İletim enerjisinin ayarlanabildiği aralıklar ne kadar büyürse ağ yaşam süresinde o denli bir azalma gözlenmektedir. Özellikle ayarlanabilir en küçük enerji seviyesinin yeterince büyük değerleri (örneğin vericinin verimliliğinden 100 kattan fazla büyük olduğu durumlar $\eta > 100\rho$) için iletim gücünün ayırık değerlerde ayarlanabilmesi ağ yaşam süresini bariz şekilde değiştirmektedir. Buna rağmen gözlemlenen karakteristik, uygulanan yol kaybı modeline büyük ölçüde bağlıdır. Log-normal gölgeleme modeli kullanıldığında daha küçük düşüşler gözlenmektedir. Zira yol kayıpları göz önüne alındığında ayırık enerji seviyeleri kullanmaktan kaynaklı fazla enerji tüketimi, bir anlamda paket alma oranını (PRR) arttırdığı için daha az sayıda paket yeniden gönderilmekte, bu sayede enerji anlamında daha az ek yük meydana gelmektedir. Bu durum, hedef PRR değeri optimum değerden daha küçük seçildiği zaman daha belirgin görülmektedir. Böyle bir durumda, ayarlanabilen en küçük enerji miktarının belli bir değerine ulaşana kadar ayırık güç kontrolü sürekli güç kontrolünden daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca pozisyonlama hatalarını tolere etmek için iletim gücünün arttırılması, güç kontrolündeki ayırıklaştırma seviyesinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkisini daha önemsiz hale getirmektedir.
8. Kablosuz algılayıcı ağlarda optimum ağ yaşam süresini elde etmek için bazı durumlarda donanım tarafından sağlanan tüm güç seviyelerini kullanmak gerekmektedir. Ancak ağ yaşam süresindeki %5 civarındaki düşüşün ihmal edilebildiği hallerde güç seviyeleri içerisinde seçilen bir alt küme ile optimum çözüme ulaşılabilmektedir.
9. İletim gücünün bağlantı bazında ayarlanabildiği durumlarda, ağ yaşam süresinde düğüm bazında güç seviyesi seçilebilen duruma kıyasla daha yüksek değerler elde edilebilmektedir. Alınan sonuçlarda ağ yaşam süresinde %10 civarında iyileşme görülmüştür.
10. Düğüm bazında iletim gücü ayarlanabilen kablosuz algılayıcı ağlarda, ağ genelinde güç seviyesi seçilen duruma göre ağ yaşam süresinde artış görülmektedir. Artış miktarı Mica enerji modelinde oldukça düşük (%2) kalırken, yol kayıplı Mica enerji modelinde daha yüksek (%10) şekilde tezahür etmektedir.
11. Yeterince büyük bir alana yayılmış ($R_{net} \geq 80$ m) kablosuz algılayıcı ağlarda

ağ genelinde güç seviyesi seçerken en uzun mesafeye gönderim yapabilen güç seviyesi kullanıldığında elde edilen ağ yaşam süresi optimum çözümün her zaman %8 yakınında bulunmaktadır. Bunun nedeni, yeterince geniş ağlarda düğümler arasındaki mesafenin artması ile daha yüksek güç seviyelerinin kullanılmasının teşvik edilmesidir.

12. Bant genişliği ihtiyacı açısından bakıldığında, en yüksek ağ yaşam süresini veren modelin (bağlantı bazında güç seviyesi seçilebilen) aynı zamanda en fazla bant genişliğine gerek duyduğu görülmektedir. Benzer şekilde en düşük ağ yaşam süresini veren model (ağ genelinde güç seviyesi seçilen) en az bant genişliği gereksinimine sahiptir. Aynı zamanda ağ genelinde tek bir güç seviyesi seçilen durumda daha yüksek güç seviyeleri genelde nispeten daha düşük bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır. En yüksek güç seviyesinde gerekli olan bant genişliğinin kullanılması halinde daha düşük güç seviyelerinde ağ yaşam süresinde azalma görülmektedir. Başka bir ifade ile veri üretim oranının belli değerlerinde, bant genişliğinin düşük güç seviyeleri için yeterli olmadığı bölgeler bulunmakta, bu da optimum olmayan bir çözüme neden olmaktadır.

Çalışma genelinde yapılan analizler sonrasında elde edilen sonuçlar ışığında hem üretim kriterlerinin belirlenmesi açısından hem de uygulamada pratik anlamda faydalı olması ve bu konuda çalışan araştırmacılara yol göstermesi açısından aşağıda bazı öneriler sunulmuştur:

1. Pratikte kullanıldıkları uygulamanın ihtiyaçlarına göre düğüm sayısı, veri üretim oranı ve ağın yayılım yüzeyi gibi çeşitli ağ ve sistem parametreleri belirlendikten sonra optimum çözüm için gerekli uygulamaya özel bant genişliği gereksinimi hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla uygulamaya en uygun donanıma sahip algılayıcı düğümlerin seçilmesi için kriterlerin belirlenerek bant genişliği hesabı yapılmalıdır.
2. Girişim hem ağ yaşam süresini düşürmekte, hem de bant genişliği gereksinimini arttırmaktadır. Girişime sebep olan temel faktörler ise ağın dağılımı ve ortamın yol kaybıdır. Girişimi azaltmak için girişime duyarlı algoritma ve yönlendirme teknikleri konusunda çalışmalar yapılmalı, çoklu radyo kanalı kullanılabildiği durumda komşu düğümlerin farklı kanallar kullanması sağlanmalıdır.

3. Farklı bant genişliği desteği sağlayabilen birden fazla algılayıcı donanımın bulunduğu hallerde, baz istasyonuna daha yakın düğümler daha fazla bant genişliğini destekleyen düğümlerden seçilmelidir. Ancak bu durumda bu düğüm donanımlarının daha fazla enerjiye sahip olması gerektiği unutulmamalıdır.
4. Algılayıcı düğümlerde iletim gücü gerçek hayattaki donanımlarda sadece ayırık değerlerde ayarlanabilmektedir. Ayarlanabilir en düşük enerji seviyesi ne kadar küçük olursa enerji tüketimindeki kayıp o derece az olmaktadır. Dolayısıyla üretim kriterlerinden biri ayarlanabilir enerji miktarını olabildiğince düşürmek olmalı, bu konuda yeni teknolojiler üzerinde çalışılmalıdır.
5. Yol kaybının ağ yaşam süresine etkileri tamamen düğümlerin bulunduğu coğrafik ortam, zaman dilimi ve sıcaklık gibi çevresel etkenlere bağlıdır. Ayırık iletim gücü kullanıldığında gereğinden daha fazla enerji kullanılması paketlerin alıcıya ulaşma oranını artırmaktadır. Dolayısıyla enerji tüketiminde kayıp olarak görünen enerji miktarları paket alma oranı açısından avantaja dönüşmektedir. Hedeflenen paket alma oranı değeri optimumdan daha küçük seçildiği durumlarda ayırık güç kontrolü sürekli güç kontrolünden daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Dolayısıyla bu avantajı kullanabilmek üzere bulunan ortamdaki çevresel faktörlere en uygun enerji tüketim örüntüsüne sahip algılayıcı donanım belirlenmelidir.
6. Birden fazla güç atama stratejisinin mümkün olduğu durumda, kullanılacak güç seviyesinin seçim sırası düğümler arasındaki bağlantı bazında, düğüm bazında ve ağ genelinde şeklinde olmalıdır. Ancak en iyi ağ yaşam süresini veren bağlantı bazında güç ataması yapmak aynı zamanda en fazla bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır. Aynı zamanda her bağlantı için bu kararı vermek ekstra işlem gücü gerektirmektedir. Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak en uygun güç seviyesi ataması yapan yöntem seçilmelidir.
7. Ağ genelinde tek bir güç seviyesi seçilebilen güç atama modeli kullanıldığı durumda, ağ yaşam süresinde yaklaşık %8'lik bir azalma tolere edilebildiği hallerde pratikte en uzun mesafeye gönderim yapan güç seviyesi seçilmelidir. Aksi halde kullanılacak seviyenin bulunması da işlem gücü gerektirdiği için ağ yaşam süresi tolere edilebilir.

Kaynakça

- [1] Z. Cheng, M. Perillo, and W. Heinzelman, “General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 7, pp. 484–497, 2008.
- [2] S. Ergen and P. Varaiya, “On multi-hop routing for energy efficiency,” *IEEE Communications Letters*, vol. 9, pp. 880–881, 2005.
- [3] H. Takagi and L. Kleinrock, “Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 32, no. 3, pp. 246–257, 1984.
- [4] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, “Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment,” in *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 2, pp. 404–413, IEEE, 2000.
- [5] V. Rodoplu and T. H. Meng, “Minimum energy mobile wireless networks,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 17, no. 8, pp. 1333–1344, 1999.
- [6] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle, “An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks,” in *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, vol. 3, pp. 1713–1723, IEEE, 2003.
- [7] C. Lu, B. M. Blum, T. F. Abdelzaher, J. A. Stankovic, and T. He, “Rap: A real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks,” in *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2002. Proceedings. Eighth IEEE*, pp. 55–66, IEEE, 2002.

- [8] E. Shih, S.-H. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, and A. Chandrakasan, "Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks," in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 272–287, ACM, 2001.
- [9] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher, "Speed: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks," in *Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, pp. 46–55, IEEE, 2003.
- [10] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," in *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, pp. 1567–1576, IEEE, 2002.
- [11] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks," in *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 181–190, ACM, 1998.
- [12] J.-H. Chang and L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks," in *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 1, pp. 22–31, IEEE, 2000.
- [13] C. Efthymiou, S. Nikolettseas, and J. Rolim, "Energy balanced data propagation in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 12, no. 6, pp. 691–707, 2006.
- [14] M. Cheng, X. Gong, and L. Cai, "Joint routing and link rate allocation under bandwidth and energy constraints in sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 8, pp. 3770–3779, 2009.
- [15] M. Cheng, X. Gong, L. Cai, and X. Jia, "Cross-layer throughput optimization with power control in sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 3300–3308, 2011.
- [16] V. Kawadia and P. R. Kumar, "Principles and protocols for power control in ad hoc networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, pp. 76–88, 2005.

- [17] M. Bhardwaj and A. Chandrakasan, “Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments,” in *Proc. INFOCOM*, vol. 3, pp. 1587–1596, 2002.
- [18] G. Zussman and A. Segall, “Energy efficient routing in ad hoc disaster recovery networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 4, pp. 405–421, 2003.
- [19] Y. T. Hou, Y. Shi, H. D. Sherali, and S. F. Midkiff, “Prolonging sensor network lifetime with energy provisioning and relay node placement,” in *SECON*, vol. 5, pp. 295–304, 2005.
- [20] J. H. Chang and L. Tassiulas, “Maximum lifetime routing in wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 12, pp. 609–619, 2004.
- [21] J. Vales-Alonso, E. Egea-Lopez, A. Martinez-Sala, P. Pavon-Marino, M. V. Bueno-Delgado, and J. Garcia-Haro, “Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks,” *Computer Networks*, vol. 51, pp. 1483–1498, 2007.
- [22] M. Mallinson, P. Drane, and S. Hussain, “Discrete radio power level consumption model in wireless sensor networks,” in *Proc. MASS*, pp. 1–6, 2007.
- [23] B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani, “Clock synchronization for wireless sensor networks: A survey,” *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, vol. 3, pp. 281–323, 2005.
- [24] M. Rahimi, R. Baer, O. Iroezi, J. Garcia, J. Warrior, D. Estrin, and M. Srivastava, “Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks,” in *Proc. SenSys*, pp. 192–204, 2005.
- [25] K. Bicakci, H. Gultekin, and B. Tavli, “The impact of one-time energy costs on network lifetime in wireless sensor networks,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 13, no. 12, pp. 905–907, 2009.
- [26] G. Anastasi, M. Conti, M. D. Francesco, and A. Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks: A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 537–568, 2009.
- [27] K. Akkaya and M. Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, pp. 325–349, 2005.

- [28] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 1, pp. 660–670, 2002.
- [29] T. Abdelzaher, B. Blum, Q. Cao, Y. Chen, D. Evans, J. George, S. George, L. Gu, T. He, S. Krishnamurthy, *et al.*, “Envirotrack: Towards an environmental computing paradigm for distributed sensor networks,” in *Distributed Computing Systems, 2004. Proceedings. 24th International Conference on*, pp. 582–589, IEEE, 2004.
- [30] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, “MAC protocols for wireless sensor networks: a survey,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, pp. 115 – 121, 2006.
- [31] I. Khemapech, A. Miller, and I. Duncan, “A survey of transmission power control in wireless sensor networks,” in *Proc. PGNet*, pp. 15–20, 2007.
- [32] B. H. Calhoun, D. C. Daly, N. Verma, D. F. Finchelstein, D. D. Wentzloff, A. Wang, S.-H. Cho, and A. P. Chandrakasan, “Design considerations for ultra-low energy wireless microsensor nodes,” *Computers, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 6, pp. 727–740, 2005.
- [33] I. Stojmenovic and X. Lin, “Power-aware localized routing in wireless networks,” *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 11, pp. 1122–1133, 2001.
- [34] A. D. Wood and J. A. Stankovic, “Denial of service in sensor networks,” *Computer*, vol. 35, no. 10, pp. 54–62, 2002.
- [35] A. Perrig, J. Stankovic, and D. Wagner, “Security in wireless sensor networks,” *Communications of the ACM*, vol. 47, no. 6, pp. 53–57, 2004.
- [36] H. Chan and A. Perrig, “Security and privacy in sensor networks,” *Computer*, vol. 36, no. 10, pp. 103–105, 2003.
- [37] M. Guerrero-Zapata, R. Zilan, J. M. Barceló-Ordinas, K. Bicakci, and B. Tavli, “The future of security in wireless multimedia sensor networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 77–91, 2010.
- [38] C. Gamage, K. Bicakci, B. Crispo, and A. S. Tanenbaum, “Security for the mythical air-dropped sensor network,” in *Computers and Communications*,

2006. *ISCC'06. Proceedings. 11th IEEE Symposium on*, pp. 41–47, IEEE, 2006.
- [39] K. Bicakci, I. E. Bagci, and B. Tavli, “Lifetime bounds of wireless sensor networks preserving perfect sink unobservability,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 15, no. 2, pp. 205–207, 2011.
- [40] K. Jain, J. Padhye, V. N. Padmanabhan, and L. Qiu, “Impact of interference on multi-hop wireless network performance,” in *Proc. ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp. 66–80, 2003.
- [41] J. Li, C. Blake, D. S. De Couto, H. I. Lee, and R. Morris, “Capacity of ad hoc wireless networks,” in *Proc. ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp. 61–69, 2001.
- [42] W. Liu, K. Lu, J. Wang, L. Huang, and D. Wu, “On the throughput capacity of wireless sensor networks with mobile relays,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, pp. 1801–1809, 2012.
- [43] J. Tang, G. Xue, C. Chandler, and W. Zhang, “Link scheduling with power control for throughput enhancement in multihop wireless networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, pp. 733–742, 2006.
- [44] B. Hull, K. Jamieson, and H. Balakrishnan, “Bandwidth management in wireless sensor networks,” in *Proc. ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 306–307, 2003.
- [45] S. Rangwala, R. Gummadi, R. Govindan, and K. Psounis, “Interference-aware fair rate control in wireless sensor networks,” *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, vol. 36, pp. 63–74, 2006.
- [46] N. Kumar, M. Kumar, and R. B. Patel, “Optimized bandwidth utilization for real time applications in wireless sensor networks,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 1, pp. 92–97, 2010.
- [47] M. Saxena, P. Gupta, and B. N. Jain, “Experimental analysis of rssi-based location estimation in wireless sensor networks,” in *Proc. COMSWARE*, pp. 503–510, 2008.

- [48] J.-R. Jiang, C.-M. Lin, and Y.-J. Hsu, "Localization with rotatable directional antennas for wireless sensor networks," in *Proc. ICPPW*, pp. 542–548, 2010.
- [49] P. K. Sahoo and I.-S. Hwang, "Collaborative localization algorithms for wireless sensor networks with reduced localization error," *Sensors*, vol. 11, pp. 9989–10009, 2011.
- [50] B. Kusy, A. Ledeczi, M. Maroti, and L. Meertens, "Node density independent localization," in *Proc. IPSN*, pp. 441–448, 2006.
- [51] L. Doherty, L. El Ghaoui, *et al.*, "Convex position estimation in wireless sensor networks," in *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, pp. 1655–1663, IEEE, 2001.
- [52] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero III, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 22, no. 4, pp. 54–69, 2005.
- [53] R. L. Moses and R. Patterson, "Self-calibration of sensor networks," in *AeroSense 2002*, pp. 108–119, International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [54] A. T. Ihler, J. W. Fisher III, R. L. Moses, and A. S. Willsky, "Nonparametric belief propagation for self-localization of sensor networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 23, no. 4, pp. 809–819, 2005.
- [55] U. B. Desai, B. Jain, and S. Merchant, "Wireless sensor networks: Technology roadmap," Tech. Rep. Yeni Delhi, Hindistan Bilgi ve İletişim Bakanlığı, 2007.
- [56] J. A. Stankovic, "Research challenges for wireless sensor networks," *SIGBED Rev.*, vol. 1, no. 2, pp. 9–12, 2004.
- [57] Q. Wang and W. Yang, "Energy consumption model for power management in wireless sensor networks," in *Proc. SECON*, pp. 142–151, 2007.
- [58] A. Konstantinidis, K. Yang, and Q. Zhang, "An evolutionary algorithm to a multi-objective deployment and power assignment problem in wireless sensor networks," in *Proc. GLOBECOM*, pp. 1–6, 2008.

- [59] R. Moraes, C. Ribeiro, and C. Duhamel, “Optimal solutions for fault-tolerant topology control in wireless ad hoc networks,” *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 8, pp. 5970–5981, 2009.
- [60] G. Kalpana and T. Bhuvaneshwari, “Distributed power control for energy efficiency in wireless sensor network,” *European Journal of Scientific Research*, vol. 48, pp. 273–280, 2010.
- [61] M. Kubisch, H. Karl, A. Wolisz, L. Zhong, and J. Rabaey, “Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks,” in *Proc. WCNC*, vol. 1, pp. 558–563, 2003.
- [62] O. Chipara, Z. He, G. Xing, Q. Chen, X. Wang, C. Lu, J. Stankovic, and T. Abdelzaher, “Real-time power-aware routing in sensor networks,” in *Quality of Service, 2006. IWQoS 2006. 14th IEEE International Workshop on*, pp. 83–92, 2006.
- [63] D. LaI, A. Manjeshwar, F. Herrmann, E. Uysal-Biyikoglu, and A. Keshavarzian, “Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks,” in *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM’03. IEEE*, vol. 1, pp. 446–452, IEEE, 2003.
- [64] H. Ren, M. Meng, and C. Cheung, “Experimental evaluation of on-body transmission characteristics for wireless biosensors,” in *Integration Technology, 2007. ICIT’07. IEEE International Conference on*, pp. 745–750, IEEE, 2007.
- [65] J. C. Lim and K. D. Wong, “Exploring possibilities for rss-adaptive power control in mica2-based wireless sensor networks,” in *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV’06. 9th International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2006.
- [66] M. Doddavenkatappa, M. C. Chan, and B. Leong, “Improving link quality by exploiting channel diversity in wireless sensor networks,” in *Real-Time Systems Symposium (RTSS), 2011 IEEE 32nd*, pp. 159–169, IEEE, 2011.
- [67] N. Baccour, A. Koubaa, L. Mottola, M. A. Zuniga, H. Youssef, C. A. Boano, and M. Alves, “Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey,” *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 8, no. 4, p. 34, 2012.

- [68] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli, and P. Levis, “Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 419–420, ACM, 2006.
- [69] M. Zuniga and B. Krishnamachari, “Analyzing the transitional region in low power wireless links,” in *Proc. SECON*, pp. 517–526, 2004.
- [70] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy, and J. A. Stankovic, “Impact of radio irregularity on wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, pp. 125–138, ACM, 2004.
- [71] J. Zhao and R. Govindan, “Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 1–13, ACM, 2003.
- [72] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy, and J. A. Stankovic, “Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 2, no. 2, pp. 221–262, 2006.
- [73] Y. Chen and A. Terzis, “On the implications of the log-normal path loss model: an efficient method to deploy and move sensor motes,” in *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 26–39, ACM, 2011.
- [74] S. Lin, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, T. He, and J. A. Stankovic, “ATPC: Adaptive transmission power control for wireless sensor networks,” in *Proc. SenSys*, pp. 223–236, 2006.
- [75] F. Sun and M. Shayman, “Lifetime maximizing adaptive traffic distribution and power control in wireless sensor networks,” Tech. Rep. TR2006-12, University of Maryland, ECE Dept., 2006.
- [76] U. S. D. of the Navy, “Sound surveillance system.” http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_25/sosus.htm. Erişim : 14.07.2013.
- [77] C.-Y. Chong and S. Kumar, “Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, 2003.

- [78] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, “Next century challenges: scalable coordination in sensor networks,” in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '99, pp. 263–270, 1999.
- [79] X. Inc., “Mica2 motes.” <http://bullseye.xbow.com:81/Products/productdetails.aspx?sid=174>. Erişim : 24.06.2012.
- [80] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393 – 422, 2002.
- [81] I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, “Wireless sensor and actor networks: research challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 4, pp. 351 – 367, 2004.
- [82] J. W. Chinneck, “Practical optimization: a gentle introduction.” <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html>. Erişim : 26.11.2011.
- [83] GAMS, “GAMS homepage.” <http://www.gams.com>. Erişim : 25.08.2011.
- [84] G. Solvers, “GAMS solvers.” <http://www.gams.com/solvers/>. Erişim : 26.08.2011.
- [85] S. J. Wright, “GAMS: A user’s guide.” <http://pages.cs.wisc.edu/swright/635/docs/GAMSUsersGuide.pdf>. Erişim : 10.09.2011.
- [86] MathWorks, “MathWorks matlab.” <https://www.mathworks.com/products/matlab>. Erişim : 21.12.2011.
- [87] Vikipedi, “MATLAB.” <http://tr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>. Erişim : 03.01.2012.
- [88] Wikipedia, “Log-normal dağılım.” http://tr.wikipedia.org/wiki/Log-normal_da%C4%9F%C4%B1%C4%B1m. Erişim : 11.10.2012.
- [89] T. Instruments, “Ti cc2420 datasheet.” <http://www.ti.com/product/cc2420>. Erişim : 07.04.2012.

EKLER

A. Örnek GAMS Kodu

\$title Kablosuz algılayıcı ağlarda 1-boyutlu topolojide bant genişliği analizi için örnek zaman modeli kodu. Bu model çalışma öncesi verilen bant genişliği değeri ("bw" sabiti) çerçevesinde başlangıç enerjisi ("energy" sabiti) kullanılarak elde edilebilecek en yüksek ağ yaşam süresini bulmaktadır.

* "Set" tanımı endeks olarak kullanılacak kümeleri tanımlamak için kullanılır

* Aşağıdaki tanımla 50 elemanlı bir kume oluşturulmuştur

* i='n0','n1''n2''n3''n4' ... 'n50'

Set i nodes /n0*n50/;

* Herhangi bir Kümeye farklı bir isim vermek için Alias ifadesi kullanılır

* Burada i,j,k ve l kümelerinin içerisinde aynı elemanlar bulunur.

Alias (i,j);

Alias (i,k);

Alias (i,l);

* "Scalar" bloğu sabitleri ve for dongusu v.b. için kullanılacak ifadeleri tutmak için kullanılır

Scalar

EAmplitude Vericinin verimliliği /100e-6/

EElec Elektronik devrede harcanan enerji /50e-3/

Er_x bir bit almak için harcanan enerji

energy başlangıç enerjisi /1e6/

s data veri üretim hızı /1/

dist düğümler arası mesafe /20/

index indeks

bw bant genişliği /100/;

* "Parameters" bloğu program çalışırken oluşturulacak olan verileri tutmak için kullanılır,

Parameters

y(i) i düğümünün y-koordinatı

x(i) i düğümünün x-koordinatı

d(i,j) i ve j düğümü arasındaki mesafe

E_{tx}(i,j) i düğümünden j düğümüne bir bit iletmek için harcanan enerji

* "Variables" bloğu başlangıçta bilinmeyen ve model tarafından çalışma sırasında uygun değerler atanarak optimum sonuca ulaşılmaya çalışılan değişkenleri içerir. "Positive variables" negatif olmayan değişkenleri ifade eder.

Variables

lifetime ağ yaşam süresi;

Positive Variables

f(i,j) i düğümü ile j düğümü arasındaki veri akışı

I_{kl}(i,k,l) k düğümü l düğümüne iletim yaparken i düğümünde meydana gelen girişimden kaynaklı veri akışı

"Equations" bloğu modelin hangi denklemleri kullanacağını tanımlamak için kullanılır. Burada bant genişliği analizi için oluşturulan zaman modeli oluşturulmuştur.

Equations

noFlow(i,j) no flow

flowBalance(i) veri akışlarının korunumu

energyConstraint(i) enerji kısıtı

interferenceConstraint(i,k,l) girişim kısıtı

bandwidthConstraint(i) bant genişliği kısıtı;

* Denklemlerin matematiksel tanımları

noFlow(i,j) $\$(ord(i)=ord(j) \text{ or } ord(i)=1).. f(i,j)=e= 0;$

flowBalance(i) $\$(ord(i)>1).. -sum(j,f(i,j)) + sum(j,f(j,i)) + s*lifetime=e= 0;$

energyConstraint(i) $\$(ord(i)>1).. energy=g= Erx*(sum(j\$(ord(j) > 1) , f(j,i))) + sum(j,(Etx(i,j) * f(i,j)));$

interferenceConstraint(i,k,l) $\$(ord(i)>1).. Ikl(i,k,l)=e= f(k,l)\$((d(k,l)*1.7 >= d(k,i)) and (ord(i) <> ord(k)) and (ord(i) <> ord(l)) and (ord(k) <> ord(l)));$

bandwidthConstraint(i) $\$(ord(i)>1).. bw * lifetime=g= sum(j\$(ord(j) > 1),f(j,i)) + sum(j,f(i,j)) + sum(k\$(ord(k)>1),sum(l,Ikl(i,k,l)));$

Model maximumLifetime /

noFlow

flowBalance

energyConstraint

interferenceConstraint

bandwidthConstraint/;

file Sonuc /c:\Sonuc.txt/;

file Coordinate /c:\Koordinat.txt/;

* Düğümlerin koordinatlarının oluşturulması

for (index=1 to card(i),

x(i)\$ (ord(i)=index)=(index-1)*dist;

y(i)=0;);

* Düğümler arası uzaklıkların belirlenmesi

d(i,j) = sqrt(sqrt(x(i)-x(j))+sqrt(y(i)-y(j)));

* İki düğüm arasında bir bit datanın gönderilmesi sonucu harcanacak enerjinin belirlenmesi

Et_{x(i,j)}\$(ord(i) <> ord(j) and ord(i) <> 0) = EElec + EAmp*sqrt(sqrt(d(i,j)));

* İki düğüm arasında bir bit datanın alınması sonucu harcanacak enerjinin belirlenmesi

Er_x = EElec;

* Model alışması için seçilen opsiyonların tanımlanması

maximumLifetime.optfile = 1;

\$onecho > cplex.opt

threads 2

workmem 2048

\$offecho

* Modelin alıştırılması ve karar değişkeninin maksimize edilmesi

Solve maximumLifetime using lp maximizing lifetime;

* Kümedeki elemanlar kendi küme tanımlayıcısı ve .tl soneki ile ifade edilir. Her düğümün koordinatlarının koordinat.txt dosyasına yazdırılması

put Coordinate;

```
loop(i,  
put i.tl:4:0 x(i):12:0 y(i):12:0/;  
);  
* Bir değişkenin değerini yazdırmak için (.l) kullanılır  
* Sonucun "Sonuc.txt" dosyasına yazdırılması  
put Sonuc;  
put bw ' ' ;  
put lifetime.l:12:4 /;  
loop(i,  
loop(j,  
put$(f.l(i,j)>0) i.tl:4:0 j.tl:4:0 f.l(i,j):12:3 /;  
);  
);
```

B. Örnek MATLAB Grafik Çizdirme Kodu

% Bant genişliğine karşı 4 farklı düğüm sayısında ağ yaşam süresini çizdiren kod parçası. Sonuçların bulunduğu sonuc.xlsx dosyasından değerleri okuyup iki boyutta çizdirir.

lw1=2; % çizgi kalınlığını ayarlar

fnt1=12; % font büyüklüğünü belirler

% Aşağıdaki blok sonuçları okuyup ilgili değişkenlere atama yapar

```
B1=xlsread('c:  
sonuc.xlsx','25 node','B2:B303');
```

```
T1=xlsread('c:  
sonuc.xlsx','25 node','d2:d303');
```

```
B2=xlsread('c:  
sonuc.xlsx','50 node','B2:B303');
```

```
T2=xlsread('c:  
sonuc.xlsx','50 node','d2:d303');
```

```
B3=xlsread('c:  
sonuc.xlsx','75 node','B2:B303');
```

```
T3=xlsread('c:  
sonuc.xlsx','75 node','d2:d303');
```

```

B4=xlsread('c:
sonuc.xlsx','100 node','B2:B303');

T4=xlsread('c:
sonuc.xlsx','100 node','d2:d303');

% Verilen büyüklükte bir grafik oluşturur.

figure2 = figure('PaperSize',[10.98 19.68]);

% Şekli oluşturulan eksene bağlar, ekrana enine ve dikine ızgaralar ekler

axes2 = axes('Parent',figure2,'YGrid','on','XGrid','on',...
'Position',[0.120049751243781 0.137624309392266 0.775 0.815],...
'FontSize',12);

%Sonuçların aktarıldığı değişkenler ile istenilen grafik eğrisi çizdirilir.

h2=plot(B1,T1,'-r+',B2,T2,':b*',B3,T3,'-gx',B4,T4,'-k.');
```

% Aşağıdaki blok egrideki her set için çizgi türü, kalınlığı, işaretçi türü ve büyüklüğünü ayarlar. İsimlerin atamasını yapar.

```

set(h2(1),'Marker','+', 'LineWidth',1,'LineStyle','-', 'Color',[1 0 0], 'DisplayName',
'N=25');

set(h2(2),'Marker','*', 'MarkerSize',8, 'LineWidth',1, 'LineStyle',':', 'Color',[0 0 1], 'Disp-
layName','N=50');
```

```

set(h2(3),'Marker','x', 'MarkerSize',8, 'LineWidth',1, 'LineStyle','-.', 'Color',[0 1 0], 'Disp-
layName','N=75');
```

```

set(h2(4),'Marker','.', 'MarkerSize',25, 'LineWidth',1, 'LineStyle','-', 'Color',[0 0 0], 'Disp-
layName','N=100');
```

```

set(h2,'LineWidth',lw1);

% x-ekseninin etiketini belirler.

xlabel('Bant Genisligi (bps)', 'FontSize',fnt1);
```

```
% y-ekseninin etiketini belirler.  
  
ylabel('Normalize Edilmis Ag Yasam Süresi','FontSize',fnt1);  
  
% y-ekseninde gösterilecek örnek aralığını belirtir.  
  
ylim([0 1.01]);  
  
set(gca,'FontSize',fnt1);  
  
set(axes2,'YGrid','on','XGrid','on');  
  
legend1 = legend(axes2,'show');  
  
set(legend1,...  
  
'Position' ,...  
  
[0.715871403953014 0.728014623864106 0.155096011816839 0.165717900063251],...  
  
'FontSize',10);
```


ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Soyadı, Adı : ÇOTUK, Hüseyin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 23.06.1980 İstanbul
Medeni hali : Evli
Telefon : 312 298 9326
Faks : 312 298 9393
e-mail : hcotuk@etu.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2013
Y. Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2008
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi	2002

İLGİ ALANLARI

Bulut Bilişim	Ağ Teknolojileri	Bilgi Güvenliği
Paralel Programlama	Gömülü Sistemler	Optimizasyon
Sanallaştırma	HPC	Yeşil BT Altyapıları

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2012-	TÜBİTAK ULAKBİM	Başuzman Araştırmacı
2006-2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Bilişim Teknolojileri Müdürü
2004-2006	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Ağ ve Sistem Yöneticisi
2003-2004	Terra Elektronik Ltd. Şti.	Yazılım Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce (Çok iyi)
Almanca (Az)

ALINAN ÖDÜLLER

Süleyman Demirel Üniversitesi	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölüm Birinciliği
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Yüksek Şeref Öğrencisi Fen Bilimleri Enstitüsü Birinciliği (2008) (4.0/4.0)

SERTİFİKALAR

Yıl	Sertifika	Yer
2013	OpenStack Summit 2013	Portland, Oregon, USA
2009	Enterasys Wireless AP & Controller Administrator	Ankara
2009	Enterasys B & C Series Switching and Routing	Ankara
2009	Enterasys X Series Backbone Switching	Ankara
2008	NetApp Storage Administrator	İstanbul
2006	Solaris Security Administrator	Ankara
2006	Solaris Network Administrator	Ankara
2006	Solaris System Administrator	Ankara
2005	Allied Telesyn Int. Certified System Engineer	Ankara
2004	Cisco Router	Ankara
2004	Cisco Network Essentials	Ankara

ÇALIŞMA ALANLARI

Sistem Yönetimi	Linux (Debian, Ubuntu, Red Hat, CentOS, Fedora) Solaris, FreeBSD Windows Server 2003, 2008 ve 2012
Temel Sistem Servisleri	E-posta (Postfix, Zimbra) Web Server (Apache, Nginx, PHP, MemCache) DNS, DHCP, FTP (ISC Bind, ISC DHCP, ProFTP) Uygulama Sunucuları (Tomcat, JBoss, Glassfish) Radius, LDAP (Free Radius, OpenLDAP) Proxy, İçerik Filtreleme (Squid, Dansguardian) Yazılım Geliştirme (Maven, SVN, GIT, ANT, JIRA)
İlişkisel Veritabanları	Oracle, MySQL, PostgreSQL, MsSQL

Bulut Bilişim	OpenStack, CloudStack, OpenNebula IaaS, PaaS ve SaaS teknolojileri
Dağıtık Hesaplama Sistemleri	Yüksek başarımli ve küme hesaplama Hadoop, Cassandra CPU ve GPU tabanlı sistemler Paralel programlama (MPI, OpenMP)
Dağıtık Dosya Sistemleri	Lustre, Ceph, GlusterFS, Microsoft DFS
Orkestrasyon Araçları	Puppet, Chef, Juju, Cfengine, Vagrant, Fuel
Bare Metal Provizyonlama	Cobbler, Kickstart, MaaS, Viper
Sanallaştırma	KVM, libvirt, Xen, VMWare, Hyper-V, Proxmox
Transmisyon Altyapısı	Infiniband, 40G/10G/Gigabit Ethernet
İnternet Erişimi	ATM, Metro Ethernet, Frame Relay, ADSL
LAN & WAN	Omurga ve kenar anahtar Router ve routing teknolojileri L2-L7 Anahtar Güvenlik araçları (Firewall, IDS/IPS, VPN)
Ağ Sanallaştırma	OpenVswitch, Quantum
Ağ İzleme Araçları	MRTG, Cacti, Nagios, Ganglia
Uzaktan Eğitim	Open Meeting, Moodle, Adobe Connect
Depolama Teknolojileri	SAN, NAS, Object Storage Swift, NFS, iSCSI, SRP, IPoIB
Nesne Tabanlı Programlama	Java, PHP, Python, Delphi, C, Javascript
Donanım Bilgisi	Sun, IBM, Fujitsu, HP, Dell, Huawei Sunucular Cisco, Juniper, Enterasys, Huawei ağ cihazları Mellenox infiniband core cihazları Veri depolama (NetApp, Oracle, Dell, HP) Juniper Saldırı Tespit ve Önleme cihazları

HOBİLER

Otomobiller, akıllı telefonlar, android işletim sistemi, elektrikli araç tasarımı

YAYINLAR

H. Cotuk, B. Tavli, K. Bicakci, M.B. Akgun, "The Impact of Bandwidth Constraints on the Energy Consumption of Wireless Sensor Networks", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Istanbul, 2014 (Kabul edildi, Aralık 2013)

H. Cotuk, O. Bektas, B. Caliskan, "Operating Cloud: NREN's Case", Terena Networking Conference, Dublin, 2014 (Gönderildi, Kasım 2013)

H. Cotuk, K. Bicakci, B. Tavli, E. Uzun, "The Impact of Transmission Power Control Strategies on Lifetime of Wireless Sensor Networks", IEEE Transactions on Computers, (Kabul edildi, Temmuz 2013).

H. Cotuk, A. Omercioglu, N. Erginoz, "IEEE 802.1x, Radius and Dynamic VLAN Assignment", inet-tr'06, Türkiye'de Internet Konferansı, Ankara, 2006.