

**MOBİL KABLOSUZ VE TASARSIZ SENSÖR
AĞLARDA İLETİŞİM ENERJİ MALİYETİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Yük. Müh. Zeydin PALA

Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa TÜRK (FÜ)

İkinci Danışman: Doç. Dr. Kemal BIÇAKÇI (TOBB ETÜ)

EKİM-2012

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOBİL KABLOSUZ VE TASARSIZ SENSÖR AĞLARDA İLETİŞİM ENERJİ
MALİYETİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Zeydin PALA

(091113204)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Eylül 2012

Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Ekim 2012

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa TÜRK (FÜ)
İkinci Danışman : Doç. Dr. Kemal BIÇAKÇI (TOBB ETÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nihat İNANÇ (MŞÜ)
Doç. Dr. Engin AVCI (FÜ)
Doç. Dr. İbrahim TÜRKÖĞLU (FÜ)
Yrd. Doç. Dr. Ayhan AKBAL (FÜ)

Ekim-2012

ÖNSÖZ

Kablosuz sensör ağları gerek endüstrinin ve gerekse akademik çevrelerin dikkatini çekmeyi başaran bir alan haline gelmiştir. Söz konusu alanda çalışmamı sağlayan, çalıştığım alanda literatüre önemli katkılar sağlayan ve danışmanım olmayı içtenlikle kabul eden TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Kemal Bıçakçı'ya çok teşekkür ederim.

Birinci danışmanım olarak elinden gelen yardımı esirgemeyen ve çalıştığım konu itibari ile ikinci danışmanla çalışmama önayak olan Doç. Dr. Mustafa Türk'e çok teşekkür ederim.

Kablosuz sensör ağları konusunda literatüre önemli katkılar sağlayan, modellemenin birçok aşamasında yer alan ve birçok noktanın açıklığa kavuşturulmasını sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği öğretim üyesi Doç. Dr. Bülent Tavlı'ya çok teşekkür ederim.

YYÜ matematik bölümünde başladığım doktora programını bıraktırıp kendi alanım olan Elektrik-Elektronik mühendisliğinde doktora yapmama imkân sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aynı zamanda yüksek lisans danışmanlığımı yapmış olan Hocam, Muş Alparslan Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Nihat İNANÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Zeydin PALA
ELAZIĞ-2012

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İlgili Çalışmalar ve Çalışmanın Önemi.....	4
1.2. Tezin Organizasyonu	8
2. GENEL ÇERÇEVE.....	9
2.1. Kablosuz Sensör Ağlarının Mimarisi.....	9
2.1.1. Topoloji Yönetimi	10
2.1.2. Protokol Yığını	12
2.1.3. Kablosuz Sensör Aygıt Mimarisi	14
2.1.4. Kablosuz Sensör Ağların Uygulama Alanları	16
2.1.4.1. Kablosuz Sensör Uygulamalarının Ana Fonksiyonları.....	16
2.1.4.2. Askeri Uygulamalar.....	17
2.1.4.3. VigilNet	18
2.1.4.4. Çevresel Uygulamalar.....	18
2.1.4.5. Great Duck Island	18
2.1.4.6. Corie	19
2.1.4.7. ZebraNet	19
2.1.4.8. Volkan Gözlemeleme	20
2.1.4.9. Erken Sel Algılama.....	20
2.1.4.10. Sağlık Uygulamaları	21
2.1.4.11. Ev Uygulamaları	21
2.1.4.12. Endüstri Uygulamaları.....	22
2.2. Hareketlilik Modelleri.....	22
2.2.1. RWMM (Random Walk Mobility Model)	22
2.2.2. Random Waypoint Mobility Model	23
2.3. Lineer Programlama	24
2.3.1. Problem Tanımlama	24
2.3.2. Model Oluşturma.....	25
2.3.3. Model Çözme	25
2.3.4. Modele Ait Çözüm Sonuçlarını Doğrulama.....	25
2.3.5. Model Uygulama.....	25
2.3.6. Lineer Programlama Modellerinin Matematiksel Gösterimi.....	26
2.3.7. Amaç Fonksiyonu.....	26
2.3.8. Dğümler Arasındaki Veri Akışının Lineer Programlama ile Dengelenmesi	26

3. SİSTEM MODELİNİ KURMA VE OPTİMİZASYON PROBLEMİNİ ÇÖZME	31
3.1. Sistemin Matematiksel Modeli	31
3.2. Optimizasyon Problemini Çözme	35
3.3. Sistemin Hareketlilik Modeli	35
3.4. Düğümlerin Alan Dışına Çıkışlarının Engellenmesi	38
3.5. Hareketlilik Esnasında Düğümlerin Yer Değiştirme Biçimi	40
3.6. Kaynak – Hedef Arasında Veri İletim Biçimi	43
3.7. Statik Durumun L_1 Anında Veri Akış Biçimi	44
3.8. Statik Durumun L_2 Anında Veri Akış Biçimi	45
3.9. Statik Durumun L_4 Anındaki Veri Akış Biçimi	45
3.10. Hareketlilik Durumunun L_1 Anındaki Veri Akış Biçimi	47
3.11. Sensör Düğümleri Arasındaki Mesafeler	47
3.12. İki Düğüm Arasında Bir Bitin Gönderilmesi İçin Harcanan Enerji Hesabı	49
4. ANALİZ SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ ve DEĞERLENDİRİLMESİ.....	51
4.1. Analizler İçin Kullanılan Modelin Genel Kuralları	51
4.2. Analiz Sonuçlarının Bulunması ve Test Edilmesi	52
4.3. Analiz Sonuçlarının Sayısal Olarak Elde Edilmesi	56
4.4. Normalize Değerlerin Elde Edilmesi	57
4.5. An Sayısına Bağlı Olarak Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi	58
4.6. Düğüm Sayısına Bağlı Olarak Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi	60
4.7. Sensör Alanı Büyüklüğüne Bağlı Olarak Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi	62
4.8. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	64
5. ÇOKLU KAYNAK - HEDEF ARASINDA VERİ İLETİMİ	67
5.1. Çoklu S-D Arasında Veri Akış Modeli	67
5.2. Aynı Anda ikili Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi	69
5.3. Aynı Anda Dörtlü Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi	72
5.4. Aynı Anda Sekizli Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi	74
5.5. Aynı Anda Onikili Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi	78
5.6. Çoklu Hedef-Kaynak Arasında Veri İletimi için Harcanan Enerji Değerleri	79
5.7. Çoklu Kaynak-Hedef İçin Elde Edilen Analiz Grafiklerinin Yorumlanması	81
5.8. Sabit Kaynak-Hedef Arasında Veri İletimi	81
5.9. Sabit Kaynak-Hedef Arasında Veri İletimi için Harcanan Enerji Değerleri	84
5.10. Sabit Kaynak-Hedef İçin Elde Edilen Analiz Grafiklerinin Yorumlanması	86
5.11. Yük Dengeleme ve Taşınan Veri İlişkisi	86
5.12. Kaynak-Hedef Arasındaki Mesafeler	88
5.13. Ağırlıklı Mesafe Ortalaması	89
5.14. En Fazla Enerji Harcayan Düğümün Ağırlıklı Mesafe Ortalaması ile İlişkisi	93
6. SONUÇLAR.....	95
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	104

ÖZET

Kablosuz sensör ağları; fiziksel dünyadan sayısal dünyaya dağıtık algılama çözümleri ile geniş bilgi sağlayan, sinyal işleme ve kablosuz iletişim yeteneğine sahip birçok sensör düğümünden meydana gelirler. Kablosuz sensör ağlarının önemli sınıflarından bir tanesi, başlangıçta konumları bilinmeyen, rastgele ve tasarsız yerleştirme olarak karakterize edilen kablosuz tasarsız ağlardır.

Bu çalışmada, mobil kablosuz sensör ağlarında hareketliliğin enerji tüketim karakteristikleri üzerindeki etkisi araştırıldı. Öncelikle sistem modeli tanımlandı, kabuller açıkça ifade edildi, optimizasyon problemi formüle edildi ve kablosuz mobil sensör ağlarında kurulan lineer programlama çatısı altında; ortaklaşa veri yönlendirme, hareketlilik ve enerji tüketimi birleştirildi. Tasarım alanı geliştirilen lineer programlama çerçevesi ile çözümlenerek araştırıldı.

Lineer programlama, lineer eşitlikler veya lineer eşitsizlikler olarak ifade edilen kısıtlamaların bir sonlu kümesini karşılamak için gerekli olan değişkenler ile lineer bir fonksiyonu maksimize veya minimize etme problemini çözen bir tekniktir. Kablosuz ağlar bağlamında, lineer programlama yaklaşımı daha önce birçok çalışmada kablosuz ağların benzersiz özelliklerini modellemek için ve kablosuz ağlara özgü problemlere en uygun çözümleri belirlemek için uygulanmıştır.

Çalışmanın temel anahtarı hareketlilik ile enerji dengelemedir. Daha kesin bir ifadeyle, çalışmadaki araştırma problemi, kablosuz sensör ağlarda hareketliliğin enerji dengeleme üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bildiğimiz kadarıyla, bu problem genel ya da formel yollarla şu ana kadar açıkça çalışılmamıştır.

Lineer programlama kullanılarak geliştirilen yeni problem formülasyonu ile kablosuz sensör ağlarında hareketliliğin “ne zaman ve nasıl enerji dengelemeye yardımcı olduğu” hususundaki önemli bir sorunun cevabı araştırıldı.

Bu çalışmada önerdiğimiz lineer programlama-temelli çerçeve, optimum yönlendirme kararları ile ideal koşullarda hareketliliğin enerji dengeleme üzerindeki etkisini değerlendirir, ölçer ve özel bir protokol ile gelen yükten bizi soyutlar.

Ulaşılan sonuçlar, hareketlilik seviyesinin mobil düğümlerin enerji tüketimleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Gerçekten de, optimal koşullarda hareketlilik mobil kablosuz ağların enerji verimliliğini artırabilir. Ancak, aşırı hareketlilik ağın enerji verimliliğini düşürebilir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Tasarsız Sensör Ağlar, Hareketlilik, Enerji Maliyeti, Enerji Dengeleme, Enerji Verimliliği, LP (Lineer Programlama), Ağ Ömrü

SUMMARY

Modeling and Analysing the Energy Cost of Communication in Wireless Adhoc Sensor Networks

Wireless Sensor Networks (WSNs) are composed of a lot of sensor nodes, capable of signal processing and wireless communication that provide extensive information from the physical world to the digital world through distributed sensing solutions. One important class of wireless sensor networks is wireless ad hoc sensor networks, that characterized by an ad hoc or random deployment sensor method, where the sensor location is not known in previously.

In this study, we investigated the effects of mobility on the energy dissipation characteristics of mobile wireless sensor networks. Firstly we define our system model, clarify the assumptions, formulate the optimization problem, and constructed a Linear programming framework that jointly captures data routing, mobility, and energy dissipation in mobile wireless sensor networks. The design space is explored by solving the developed linear programming framework.

Linear programming is a technique to solve the problem of maximizing or minimizing a linear function whose variables are required to satisfy a finite set of constraints that are expressed either as linear equalities or linear inequalities. In the context of wireless networks, linear programming approach has previously been applied in many studies to model the unique characteristics of wireless networks and to determine the optimal solutions to problems that are specific to wireless networks

Leveraging energy balancing by mobility is the key insight of our work. In more precise terms, the research problem in our study is the investigation of the effects of mobility on energy balancing in wireless sensor networks. Up to our best knowledge, this problem was not studied explicitly in a general and formal way. By developing a novel problem formulation using linear programming, we seek an answer to the important question of whether and when mobility helps energy balancing in wireless sensor networks. The linear programming-based framework we propose in this work evaluates and quantifies the impact of mobility on energy balancing in ideal conditions with optimal routing decisions and abstracts us away from the overhead brought by a specific protocol.

Our results show that the level of mobility have significant effects on the energy dissipation trends of mobile nodes. Indeed, under optimal conditions mobility can improve the energy efficiency of mobile wireless networks. However, extreme mobility can degrade the energy efficiency of the network.

Key Words: Wireless Adhoc Sensor Networks, Mobility, Energy Cost, Energy Balancing, Energy Efficiency, Linear programming (LP), Network Lifetime

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Sensör alanındaki sensör düğümlerinden kullanıcıya doğru veri akışı 9
Şekil 2.2	Topoloji yönetim teknikleri 10
Şekil 2.3	Sensör ağı protokol yığını 13
Şekil 2.4	Kablosuz sensör aygıt mimarisi 15
Şekil 2.5	Sensör düğümleri 16
Şekil 2.6	Bumerang keskin nişancı algılama (solda) ve dağıtık algılama (sağda) sistemi 17
Şekil 2.7	Great Duck Island iki katmanlı ağ gözlemleme mimarisi 19
Şekil 2.8	ZebraNet sensör boyunluk 20
Şekil 2.9	Sel algılama sistemi sensör ağı mimarisi 21
Şekil 2.10	Bir hareketli düğümün 2-D RWMM tabanlı olarak gerçekleştirdiği seyahat modeli 23
Şekil 2.11	Bir hareketli düğümün 2-D Random Waypoint Mobility Model tabanlı olarak gerçekleştirdiği seyahat modeli 24
Şekil 2.12	Sensörlerden baz istasyonuna atlamasız veri akış biçimi 27
Şekil 2.13	Sensörlerden baz istasyonuna en yakın sensör üzerinden veri akış biçimi 27
Şekil 2.14	Sensörlerden baz istasyonuna çok atlamalı veri akış biçimi 28
Şekil 2.15	Üç sensörden oluşan lineer topoloji 28
Şekil 2.16	Denklem çözüm grafiği 30
Şekil 3.1	Sistemin matematiksel modeli 33
Şekil 3.2	Sanal koordinat sistemi ve düğümlerin yerleşim alanı 37
Şekil 3.3	400 m x 400 m alan içerisine rastgele yerleştirilen 100 adet düğümün görüntüsü 38
Şekil 3.4	Sensörlerin hareketlilik esnasında dışarı yerine içeriye yönelik hareketleri 40
Şekil 3.5	Bir sensörün hareketlilik esnasındaki hareket yönleri 41
Şekil 3.6	$R_{max}=10$ için bir sensörün L_1 - L_{20} anları arasında yer değiştirme biçimi 42
Şekil 3.7	$R_{max}=100$ için bir sensörün L_1 - L_{20} anları arasında yer değiştirme biçimi 43
Şekil 3.8	S_{55} - D_{53} düğümleri arasında veri akış şeması 44
Şekil 3.9	S_{11} - D_{48} düğümleri arasında veri akış şeması 45
Şekil 3.10	S_{86} - D_{33} düğümleri arasında veri akış şeması 46
Şekil 3.11	S_{86} - D_{33} düğümleri arasında veri akış şeması 46
Şekil 3.12	S_{63} - D_{94} düğümleri arasında veri akış şeması 47
Şekil 3.13	İki düğüm arasındaki uzaklığın analitik düzlemde gösterimi 48
Şekil 4.1	Düğümlerin alandaki yerleşimleri, aralarındaki mesafeler ve gönderilen veri miktarları 54
Şekil 4.2	Düğümlerin koordinat bilgileri kullanılarak aralarındaki mesafelerin hesaplanması 54
Şekil 4.3	$N_L=10$, $N_L=20$ ve $N_L=40$ için elde edilen normalize değerlere ait sonuçlar 59
Şekil 4.4	$N_L=10$, $N_L=20$ ve $N_L=40$ için elde edilen enerji değerlerine ait sonuçlar 59
Şekil 4.5	$A_v=400$ m x 400 m, $N_L=40$ sabit değerleri ve $N_v=25$, $N_v=50$ ve $N_v=100$ için elde edilen normalize enerji değerlerine ait sonuçların grafiksel gösterimi 61

Şekil 4.6	$A_v=400$ m x 400 m, $N_L=40$ sabit değerleri ve $N_v=25$, $N_v=50$ ve $N_v=100$ için elde edilen normal enerji değerlerine ait sonuçların grafiksel gösterimi	61
Şekil 4.7	$N_v=100$, $N_L=40$ ve farklı alan büyüklükleri için elde edilen yük dengeleme grafikleri	63
Şekil 4.8	$N_v=100$, $N_L=40$ ve farklı alan büyüklükleri için elde edilen normal enerji grafikleri	63
Şekil 4.9	$R_{max}=150$, $N_v=100$, $N_L=40$ parametrelerine karşılık düğümlerin konumları	66
Şekil 5.1	Çoklu kaynak-hedef arasında veri iletimini gerçekleştiren problemin matematiksel modeli	68
Şekil 5.2	$R_{max}=10$, $N_v=50$, $N_L=1$ için S^1_{34} ile D^1_{17} arasında veri iletim biçimi	71
Şekil 5.3	$R_{max}=10$, $N_v=50$, $N_L=1$, K_2 için S^2_2 ile D^2_{45} arasında veri iletim biçimi	71
Şekil 5.4	$R_{max}=10$, $N_v=50$, $N_L=1$, K_1 , K_2 ve için $S^1_{34} - D^1_{17}$ ile $S^2_2 - D^2_{45}$ arasında veri iletim biçimi ...	72
Şekil 5.5	$R_{max}=10$, $N_v=50$, L_6 , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 için $S^1_{36}-D^1_{11}$, $S^2_{31}-D^2_4$, $S^3_{36}-D^3_{45}$ ve $S^4_{11}-D^4_{39}$ arasında veri iletim biçimi	74
Şekil 5.6	$R_{max}=130$, $N_v=50$, L_1 , K_1 için $S^1_4-D^1_{31}$ düğümleri arasında veri iletim biçimi	75
Şekil 5.7	$R_{max}=130$, $N_v=50$, $L=1$, $K=2, K=3, K=4$, $A_v=400$ x 400 m için $S^2_{30}-D^2_{34}$, $S^3_{41}-D^3_{46}$ ve $S^4_{29}-D^4_{10}$ düğümleri arasında veri iletim biçimi	76
Şekil 5.8	$R_{max}=130$, $N_v=50$, L_1 , K_5 için $S^5_{45}-D^5_{46}$ düğümleri arasında veri iletim biçimi	76
Şekil 5.9	$R_{max}=130$, $N_v=50$, L_1 , K_6 , K_7 için $S^6_{45}-D^6_{34}$, $S^7_{23}-D^7_{21}$ düğümleri arasında veri iletim biçimi ..	77
Şekil 5.10	$R_{max}=130$, $N_v=50$, L_1 , K_8 için $S^8_{11}-D^8_{25}$ düğümleri arasında veri iletim biçimi	78
Şekil 5.11	$N_v=50$, $N_L=10$ için normalize enerji değerleri	80
Şekil 5.12	$N_v=50$, $N_L=10$ için normal enerji değerleri	80
Şekil 5.13	$N_v=50$, $N_L=1$, K_1 , $A_v=400$ m x 400 m için $S^1_1-D^1_5$ arasında veri iletimi	82
Şekil 5.14	$N_v=50$, $N_L=1$, K_2 , $A_v=400$ m x 400 m için $S^2_2-D^2_6$ arasında veri iletimi	82
Şekil 5.15	$N_v=50$, $N_L=1$, K_3 , $A_v=400$ m x 400 m için $S^3_3-D^3_7$ arasında veri iletimi	83
Şekil 5.16	$N_v=50$, $N_L=1$, K_4 , $A_v=400$ m x 400 m için $S^4_4-D^4_8$ arasında veri iletimi	83
Şekil 5.17	$N_v=50$, $N_K=4$, $N_L=1$, $N_L=4$, $N_L=16$, $A_v=400$ m x 400 m için normalize enerji değerleri ...	85
Şekil 5.18	$N_v=50$, $N_K=4$, $N_L=1$, $N_L=4$, $N_L=16$, $A_v=400$ m x 400 m için normal enerji değerleri	85
Şekil 5.19	$N_v=50$, $N_L=100$, $A_v=400$ m x 400 m, $R_{max}=0$, $N_K=1$ için bit transfer grafiği	87
Şekil 5.20	$N_v=50$, $N_L=100$, $A_v=400$ m x 400 m, $R_{max}=80$, $N_K=1$ için bit transfer grafiği	88
Şekil 5.21	$N_L=5$ için kaynak-hedef çiftlerinin konumları ve aralarındaki mesafeler	89
Şekil 5.22	$R_{max}=0-150$ m, $N_v=50$, $A_v=400$ m x 400 m için normal enerji değerleri	91
Şekil 5.23	$R_{max}=0-150$ m, $N_v=50$, $A_v=400$ m x 400 m için normalize değerler	92
Şekil 5.24	$R_{max}=0-150$ m, $N_v=50$, $N_K=1$ ve $N_L=100$ için enerjiler-ağırlıklı mesafe ortalaması	92
Şekil 5.25	$R_{max}=0-150$ m, $N_v=50$, $A_v=400$ m x 400 m, $N_K=1$ ve $N_L=100$	93
Şekil 5.26	$N_v=50$, $N_L=100$, $N_K=1$, $R_{max}=0-150$ için enerji-ağırlıklı mesafe ortalaması	94
Şekil 5.27	Farklı alanlar üzerinde analiz edilen enerji-ağırlıklı mesafe ortalaması	94

TABLOLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 LP formülasyonu için terminoloji	33
Tablo 3.2 Kullandığımız modelin Random Walk Mobility Model ile karşılaştırılması	36
Tablo 3.3 L_1 - L_{20} anlarındaki hareketlilik değerleri ve L ile $L+1$ arasındaki mesafeler	42
Tablo 4.1 Simülasyon sonuçlarını test etmek için kullanılan parametreler	52
Tablo 4.2 Üç düğümün L_1 anında, alandaki yerleşim koordinat bilgileri	53
Tablo 4.3 Üç düğümün L_1 anındaki veri gönderim enerjisi ve mesafe bilgileri	53
Tablo 4.4 Düğümlerin aralarındaki mesafelere bağlı olarak harcanan enerjiler	55
Tablo 4.5 Simülasyon boyunca düğümlerin harcadıkları gönderim ve alım enerji toplamaları	55
Tablo 4.6 $N_L=10$, $N_v=100$ ve $R_{max}=0-150$ m için enerji (a) ve normalize edilen enerji (b) değerleri ...	57
Tablo 4.7 N_L an sayısına bağlı olarak değişen enerji değerleri için kullanılan parametreler	58
Tablo 4.8 Düğüm sayısına bağlı olarak değişen enerji değerleri için kullanılan parametreler	60
Tablo 4.9 Alan büyüklüğüne bağlı olarak değişen enerji değerleri için kullanılan parametreler	62
Tablo 5.1 $N_K=2$ için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri ve arasındaki mesafeler	70
Tablo 5.2 $N_K=4$ için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri	73
Tablo 5.3 $N_K=8$ için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri	74
Tablo 5.4 $N_K=12$ ve $R_{max}=10$ için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri	78
Tablo 5.5 Çoklu kaynak-hedef arasında veri iletimi için kullanılan model çalıştırma parametreleri..	79
Tablo 5.6 Sabit kaynak-hedef arasında veri iletimini sağlayan model çalıştırma parametreleri.....	84
Tablo 5.7 $R_{max}=0$, $N_v=50$, K_1 ve $N_L=5$ için kaynak-hedef çiftleri ve aralarındaki mesafeler	89
Tablo 5.8 $R_{max}=0-150$ m, $N_v=50$, $N_K=1$ ve $N_L=100$ için ağırlıklı mesafe ortalaması	90
Tablo 5.9 $R_{max}=0-150$ m, $N_v=50$, $N_K=1$ ve $N_L=100$ için normalize değerler	91

SEMBOLLER LİSTESİ

V	: Düğümler kümesi
N_V	: Düğüm sayısı
L	: Anlar kümesi
N_L	: An sayısı
K	: Akımlar kümesi
N_K	: Akım sayısı
S^k	: k akımının kaynak düğümü
D^k	: k akımının hedef düğümü
X^k	: k akımının kaynak ve hedef düğümleri dışındaki düğümler kümesi
R_{max}	: Anlık en fazla hareket yarıçapı
A_V	: Ađ alanı
ε	: Vericinin verimliliği
ρ	: Elektronik devrede tüketilen enerji
α	: Yol kayıp üsteli
Z^{kl}	: l anında k akım kaynağının ürettiği veri miktarı
e_i	: Düğüm-i'nin toplam enerjisi
P_{rx}	: Bir bit alırken tüketilen enerji miktarı
$P_{tx,ij}$	: Düğüm-i'den düğüm-j'ye bir bit veri gönderme enerjisi
d_{ij}	: Düğüm-i ile düğüm-j arasındaki mesafe
μJ	: Mikro Joule
m	: Metre
m^2	: Metrekare
S	: Kaynak düğüm (Source)
D	: Hedef düğüm (Destination)
Π	: Pi sayısı

KISALTMALAR

1D	: Tek boyutlu
2D	: İki boyutlu
3D	: Üç boyutlu
d-D	: d boyutlu
Ad Hoc	: Tasarsız
GAMS	: General Algebraic Modeling System
RWMM	: Random Walk Mobility Model
KSA	: Kablosuz Sensör Ağları
KSAA	: Kablosuz Sensör Algılayıcı Ağları
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
WMSN	: Wireless Multimedia Sensor Networks
WSSN	: Wireless Security Sensor Networks
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency
Bİ	: Baz istasyonu
LINDO	: Linear Interactive and Discrete Optimizer
GINO	: General Integer and Non-Linear Optimizer
LP	: Linear Programming
NLP	: Nonlinear Programming
MINLP	: Mixed Integer Nonlinear Programming
MIP	: Mixed Integer Programming
QCP	: Quadratic Constraint Programming
DNLP	: Nonlinear Programming With Discontinuous Derivatives
RMIP	: Relaxed Mixed Integer Programming
MIQCP	: Mixed Integer Quadratic Constraint Programming
RMIQCP	: Relaxed Mixed Integer Quadratic Constraint Programming
RMINLP	: Relaxed Mixed Integer Nonlinear Programming
MCP	: Mixed Complementarity Problems
MPEC	: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints
CNS	: Constrained Nonlinear Systems
P2P	: Peer to Peer
RF	: Radio Frequency
PDA	: Personal Digital Assistant
PHY	: Physical Layer
QoS	: Quality of Service
RAM	: Random Access Memory
ROM	: Read-Only Memory
OSI	: Open Systems Interconnection

MAC	: Medium Access Control
CSMA-CA	: Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance
nesC	: Network Embedded System C
ADC	: Analog to Digital Converter
DAC	: Digital to Analog Converter
TinyOS	: Tiny Operating System
ISA	: Instrument Society of America
RFID	: Radio Frequency Identification
GPS	: Global Positioning System
Corie	: Columbia River Ecosystem
PAN	: Personal Area Network
OSL	: Optimization Software Library
Mbps	: Mega bits per second
Kbps	: Kilo bits per second
KB	: Kilobyte
RISC	: Reduced instruction set computing
MHz	: Megahertz
GHz	: Gigahertz
mW	: Milliwatt
FSK	: Frequency-shift keying
mA	: Milliamper
NE	: Normalized Energy
NWD	: Normalized Weighted Distance

1. GİRİŞ

Mikroelektronik teknolojisindeki ilerlemeler; ucuz, minyatür ve düşük güç tüketen algılama cihazların üretilmesine imkân sağladı [1, 2, 4]. Son yıllardaki ilerlemeler ışığında kablosuz iletişim pazarı benzeri görülmemiş bir büyüme elde etti. Bununla birlikte kablosuz teknolojinin kullanım alanı genişleyerek, yeryüzünün hemen hemen her konumuna erişebilme yeteneğine ulaştı. Kablosuz Sensör Ağları (KSA) kendi alanında olgunlaştıkça, yeni tasarım kavramları, deneysel ve teorik bulgular ve kablosuz sensör uygulamaları hızla ortaya çıkmaya devam etti [3].

Hergün dünyadaki milyonlarca insan bilgi alışverişi için çağrı cihazları, cep telefonları, dizüstü bilgisayarları, kişisel dijital asistanları (PDA) ve diğer kablosuz iletişim ürünlerinin çeşitli türlerini kullanmaktadır. Uzun vadede kablolu ağlara bağlı kalmaksızın, insanlar düşündükleri her yerde küresel bazda istedikleri bilgi paylaşımını kablosuz olarak yapabileceklerdir [2]. Kablosuz iletişim, mobil ve hızlı ağ topolojisi değişebilir düğümler arasında bilgi iletmek için kullanılır [5].

Hem hızlı bir gelişme trendi, hem de yoğun kullanılan tasarsız ağ yapısı, kullanıcılarının herhangi bir altyapı olmadan eşdeş (peer-to-peer) biçimde bilgi paylaşımlarını gerçekleştirdikleri tasarsız bir yapıdır. Tasarsız ağlardaki düğümler dinamik olarak geçici bir ağ topolojisi üzerinden ağ bağlantısı oluştururlar. Cihazlar herhangi bir iletişim altyapısı olmadan kendi aralarında iletişim kurabilirler. Tasarsız ağlarını oluşturan mobil düğümler kendi kendine organize olabilirler, kendinden yapılandırılmış ve kendinden kumandalı, altyapısız aynı zamanda otonomdurlar [6].

Kablosuz tasarsız sensör ağları bant genişliği, gecikme, güç vb. gibi kısıtlamalar ile karakterize edilirler [7, 8].

Kablosuz tasarsız sensör ağı bir coğrafi alana yayılmış bir dizi sensörden oluşur. Her bir sensör kablosuz iletişim, sinyal işleme ve ağ oluşturmak için akıllı hareket etme kabiliyetine sahiptir. Bu tür özelliklerinden dolayı son zamanlarda kablosuz sensör ağları, ticari sektör ve araştırmacıların büyük ilgisini çekmeyi başarmıştır [1, 2].

Özellikle kablosuz tasarsız ağların acil durumlardaki pratik kullanımları farklı alanlar için yeni uygulamaların doğmasına neden olmuştur. Tasarsız ağlar veriyi toplayarak, işleyerek, çözümleyerek ve yayarak yerine getirirler. Böylece tasarsız ağlar, daha zeki ortamların oluşmasında önemli katkılar sağlarlar [1].

Bir mobil tasarsız ağ, kablosuz mobil düğümlerden meydana gelen bir sistemi temsil eder. Bu sistemde düğümler özgürce ve dinamik olarak kendi kendilerine düzenli ve geçici bir yapıda organize olabilirler. Böylece herhangi bir iletişim mimarisi olmadan cihazlar ve insanlar haberleşirler [8].

Hareketlilik tasarsız ağların önemli özelliklerindendir. Hareketlilik sayesinde ağ topolojisi sürekli değişir.

Kablosuz tasarsız ağlardaki yönlendirme protokolü sayesinde cihazların birbirlerini nasıl bulacakları ve ne şekilde paket gönderecekleri imkânı ortaya çıkar. Ağ ortamındaki düğümler, ağa dâhil olmadan önce ağın topolojisi hakkında herhangi bir bilgiye sahip değildirler. Ağ üyeleri, ağa dâhil olduktan sonra birbirlerini keşfederler. Buradaki temel mantık, bir düğümün kendisini ilan etmesi ve diğer komşu düğümleri aynı prensiple bulmasıdır. Keşif işlemi esnasında zaman ilerledikçe her bir düğüm diğer bir düğüme nasıl ve hangi yollardan erişebileceğini bilir. Onun hakkında daha fazla bilgiye sahip olur. Ağ ortamındaki mobil düğümler özgürce hareket ederek diğer düğümler ile kolaylıkla haberleşebilirler [1].

Literatürde kablosuz sensör ağlarının daha fazla kısıtlı enerjiye sahip ve ölçeklenebilir tasarsız ağlar oldukları ifade edilmektedir [1, 5, 8,76].

Kablosuz sensör ağları dağıtık algılama çözümleri vasıtasıyla fiziksel dünyayı gözlemlerler, verileri algılarlar, işlerler, gözlemlenen verilere dayalı olarak karar verirler ve karar neticesinde gerekeni yaparlar [9].

Bu açıdan KSA'ların çalışma biçimi, verileri fiziksel dünyadan alıp siber dünyaya aktarması tek taraflı veri teslimine dayanır. Daha gelişmiş olan sensörler (aktörler) ve robotlar vasıtasıyla veri alış verişi iki yönlü olarak gerçekleşebilmektedir. Fiziksel dünyadan algılanan veriler mevcut ortam üzerine etkileri olacak biçimde kullanılabilir [9-11].

KSA'lar savaş alanı gözetim cihazlarının tümleşik bir parçası, nükleer, biyolojik, kimyasal atak algılaması, ev otomasyonu ve çevre gözlemleme amaçlı olarak kullanılırlar [12].

KSA'ların önemli uygulama alanlarında birisi yangın algılamadır. Dağıtık sensörler yangının çıkış noktasını algılayabilir, şiddetini ölçebilir ve ateşi söndürmek için elde ettiği bilgiyi su serpme kaynağına iletebilir. Neticede yangın kontrolden çıkmadan, daha önceden alınan tedbirler ile yangın kontrol altına alınarak söndürülür [1].

Sensör düğümleri sınırlı enerjilerle çalışmaktadırlar. Enerjinin verimli kullanımı sensör ağı için hayati bir öneme sahiptir. Kablosuz algılayıcı ağlar enerji ihtiyaçlarını bataryalardan karşıladıkları için yüksek enerji verimliliği en önemli tasarım hedeflerinden biridir. Buna ilave olarak algılayıcı ağların, genellikle gözetleme amaçlı olarak kullanılması dolayısıyla insanlardan uzak konumlarda kullanımı, batarya değişimi ve tekrar şarj edilme gibi işlemleri çok zor ya da imkânsız kılmaktadır. Algılayıcı düğümlerin, ortama bırakıldıktan sonra olabildiğince uzun süre hizmet vermesi düğüm üzerindeki elemanların enerji tüketim değerlerine bağlı olduğu kadar, düğümler arasındaki yardımlaşmaya da bağlıdır [13-15].

Literatürde kablosuz sensör ağlardaki ağ ömrü, enerjisi biten ilk algılayıcı düğüm enerjisinin bitmesine kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır [16-17]. Bu noktadan sonra kapsama kaybolur ve algılanan olgunun ancak eksik bir kısmı gözlemlenebilir.

Sensör düğümleri sınırlı güç kaynakları taşırlar. Geleneksel ağlarda performansı artırmak için gecikme ve çıktı (throughput) gibi özellikler üzerinde çalışılırken KSA'larda bu öncelik güç korunması olarak karşımıza çıkmaktadır.

KSA'ların komuşlandırılması, KSA protokollerini geliştirmek için dikkate alınan diğer bir faktördür.

Bir sensör düğüm pozisyonu için önceden tasarlamaya yâda belirlemeye gerek yoktur. Sensörler ulaşılmaz arazilerde veya afet kurtarma operasyonlarında rastgele dağıtılırlar. Diğer yandan, bu rastgele dağıtım işlemi, iletişim protokolü yığını için kendi kendine organize olmasını sağlayacak protokollerin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Kısa iletişim mesafelerinden dolayı çok sayıdaki sensör düğümü yoğun olarak komuşlandırıldıklarından dolayı komşu düğümler birbirlerine çok yakın olabilir.

Kablosuz tasarsız sensör ağlarda birçok uygulama, algılayıcıların verilerini bir baz istasyonuna, belki diğer algılayıcılar üzerinden gönderildiği çoktan-teke bir trafik örüntüsüne ihtiyaç duyar. Veri paketleri kaynak düğümlerden hedef düğümlere iletilirken, aradaki birçok düğüm iletim işleminde görev alır. Arada görev alan her bir düğüm aldığı veriyi başka düğümlere gönderir [18]. Düğümler aldıkları yâda ürettikleri verileri direkt ya da atlamalı olarak merkeze iletebilirler.

Yapılan araştırmalar, kablosuz kanalların karakteristiklerinden dolayı kaynak ve hedef düğümler arasındaki çok atlamalı iletişimin, direkt iletişimden daha verimli olduğunu göstermiştir [19-21, 23].

Ağ ortamındaki düğümlerin pil enerjilerinin dengeli kullanılması son derece önemlidir. Bundan dolayı ağ ortamındaki düğüm enerjilerinin verimli kullanılması ancak yük dengeleme ile mümkün olabilmektedir [21].

Yük dengeleme; verilerin en ideal bir şekilde ağın yaşam süresi boyunca en uygun bir şekilde iletilmesidir. Kapasitesi sınırlı bir sistemde optimum yük dengeleme, tüm kullanıcıların aynı kapasiteyi talep ettiğini varsayarak, her baz istasyonu kullanıcısının aynı sayıda olmasının bir sonucudur [25].

Hareketlilik, mobil ve tasarsız ağlarda en önemli bir avantajdır. Öte yandan, güvenilir, yüksek performanslı iletişim sağlamak amacıyla üstesinden gelinmesi gereken en zor bir problemdir. Ağda yüksek hareketlilik ve dinamik topoloji değişiminden dolayı düğümler tarafından taşınan veri paketleri daha dengeli hale gelmektedir [2].

Hareketlilik modeli, mobil bir düğümün hareket modelini tanımlamak için tasarlanır. Bu modelde önemli olan iki parametreden biri hız, diğeri ise yöndür [26].

Bir tasarsız ağ modelinde algoritmaların iki özelliğı özellikle istenir. Birincisi, bir algoritma matematiksel olarak gerçekleştirilebilmeli ve algoritmanın analizi matematiksel olarak yapıldığında çalışıp çalışmayacağı hususunda bir fikir vermelidir. İkincisi bir algoritma dağıtılmış olmalı ve hiyerarşik olmamalıdır [27].

Bu çalışmada; kablosuz tasarsız ağlardaki hareketliliğe bağılı olarak düğümler arasındaki veri iletiminde değişen iletişim enerji değerlerinin yük dengeleme üzerindeki etkisini bir problem olarak kabul ettik ve problemi lineer programlama (LP) kuralları çerçevesinde matematiksel olarak modelledik. Hareketlilik ile yük dengeleme arasındaki ilişkinin LP ile çözüme kavuşturulmasını ve optimize edilen iletişim enerji değerleri ile ağ yükünün dengelenmesini dolayısıyla ağ ömrünün uzatılmasını amaçlıyoruz.

1.1. İlgili Çalışmalar ve Çalışmanın Önemi

Lineer programlama kullanılarak sensör düğümleri arasındaki iletişim ve yönlendirme esas alınarak ağın yaşam süresini artırma ve harcanan enerjiyi minimize etmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunlardan alanla ilgili olanlarını özet olarak sunmaya çalıştık:

Lineer programlama; ulaşım, üretim, planlama ve ağ akış problemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır [73]. LP kablosuz sensör ağlarının modelleme ve analizi gibi pek çok çalışmada kullanılan güçlü bir araçtır.

Ağ bağlantısını sürdürmek şartıyla iletim gücünün minimum düzeyde tutmak için bazı çalışmalar yapılmıştır [19, 20].

Bicakci ve Tavli [18], farklı işbirliği stratejilerinin performansını etraflıca değerlendirmek ve çoklu etki alanı kullanmanın yararını araştırmak için LP çatısı oluşturmuşlardır. KSA'larda çoklu-alan işbirliğinin ağ ömrünü önemli ölçüde artırdığını ve bu artışın, işbirliğinin olmadığı ağlara göre oldukça yüksek olduğunu göstermişlerdir.

Tavli vd. [17], yaptıkları çalışmada LP kullanarak, sıkıştırma esnasında veri azaltımının ağ yaşam süresi üzerindeki etkisini modellemek için yeni bir model sunmuşlardır.

Takagi ve Kleinrock [96], parazitleri en aza indirmek ve çıkışı en üst düzeye çıkarmak için iletim gücünün en iyi değeri üzerinde araştırma yaptılar.

Efthymiou vd. [21], birkaç data yolu üzerinde paketleri dağıtmanın enerji tüketimini nasıl dengelediği hususunu göstermişlerdir.

Zussman vd. [97], ağ ömrünü en iyi düzeye çıkarmak için en iyi yönlendirme yolu problemi için LP optimizasyonu kullanmışlardır.

KSA'larda sensörler için mekânsal fazlalık istismar edildiğinde sistem yaşam süresini değerlendirmek için MILP modeli kullanılmıştır [74]. Sistemin yaşam süresini maksimize etmek için sensörler alt gruplara ayrılmış ve her bir grup zamanın bir diliminde aktif olarak çalışmaya başlamaktadır. Sensörlerin bir kısmı aktif iken diğer kısmı pasif durumda kalmaktadır. Ağın yaşam süresini maksimize etmek için merkezi ve dağıtık yaklaşımlar sunulmuştur.

Chang ve Tassiulas [75], KSA'lardaki en yüksek yönlendirme yaşam süresini LP problemi olarak formüle etmişler. Biri sabit hızla, diğeri ise keyfi olmak üzere iki farklı bilgi üretim süreci kabul etmişler. Bir KSA' da aynı yol üzerinde gönderilen bilgi paketleri söz konusu yolda yer alan düğümlerin daha kısa sürede enerjilerini tükettiklerini göstermişlerdir. Ayrıca yaptıkları analizlerle toplam minimum yönlendirme enerjisinin ağ optimum iletim enerjisi için yeterli olmadığını ortaya koymuşlardır.

Ergen ve Varaiya [76], LP kullanarak KSA'lar için iki yönlendirme programının ağ ömrünü nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Önerdikleri şemalardan birinde her düğümün ağ ömrünü artırdığını göstermişlerdir. Onların ana sonucu, iletim amplifikatör ve devrede

harcanan enerji miktarına bağı olarak iletim menzili artırılmak suretiyle KSA'ların enerji tasarrufunda yardımcı olunabilir şeklindedir. Diğer bir deyişle, iletim enerjisinin devrede harcanan enerjiye oranı belirleyici bir faktördür.

Liu vd. [77], LP çatısı (framework) kullanarak sensör gözetim sistemlerinde maksimum ömür çizelgeleme problemi incelemiştir. Problem, bir alanı gözetlemek için konuşlandırılan sensörlerin ömürlerini maksimize etmek için tanımlanmıştır.

Cheng vd. [88], KSA'ların yaşam sürelerini değerlendirmek ve maksimize etmek için LP çatısına dayalı genel bir model önerdiler. Gözlemlerinde trafiğin çoktan-teke meydana geldiği durumlarda, baz istasyonuna daha yakın düğümlerin diğer düğümlere göre daha fazla enerji harcadığı ve dolayısıyla baz istasyonuna yakın bölgelerde sıcak noktaların oluştuğunu gösterdiler.

Cetin vd. [79], en yüksek yönlendirme yaşam süresi problemini araştırmışlardır. Lineer programlama kullanarak düğümlerin çalışma modlarını formüle etmişler ve lineer problemi çözmüşlerdir.

Tavli vd. [80], çalışmalarında daha karmaşık bir LP modeli kullanarak, akış dengeleme için birlikte çok seviyeli veri sıkıştırma etkisini incelemiştir.

İncebacak vd. [81], alanı belli bölgelere ayırmanın sensör ağlarının enerji gereksinimleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Bıçakçı vd. [84], LP kullanarak KSA'ların yaşam süresi farklı Proxy metodoloji limitlerine bağı olarak analiz etmişlerdir. Burada ağ ömrünü maksimize etmek için çoklu vekil sunuculardan (proxy) geçmesi gereken veri akışlarını ağaç yapısından ziyade direkt grafik olarak düzenlenebileceğini göstermişlerdir.

Bıçakçı vd. [85], MBLP kullanarak bir anlık enerjinin sistem yaşam süresi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bir anlık enerji işlemi için PKC (Public-key Cryptography) kullanılmıştır. PKC'nin optimal yönlendirme üzerindeki etkisini elektronik devrede harcanan enerjinin amplifier enerjisi oranına bağı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca PKC'nin maksimum ağ ömrüne ulaşılabilir etkisi ihmal edilebilir bir enerji olmadığı ve ağ büyüklüğü ile birlikte artmadığı ortaya konulmuştur.

Özçiloğlu vd. [86], yaptıkları çalışmada bir kablosuz algılayıcı ağın yaşam süresinin verilen gizlilik kısıtları altında LP ile maksimize edilme ve baz istasyonunun dinlenmeme konusunu incelemiştir.

Tavli vd. [15], yaptıkları çalışmada MBLP kullanarak sensörlerden giden ve gelen linklerin sınırlandırılmasının ağ ömrü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Link sayısının 1

ile sınırlandırılması halinde ağ ömründe %81, 3 ile sınırlandırılması halinde ise ağ ömründe sadece %1 oranında azalma olacağını ortaya koymuşlardır.

Bıçakçı vd. [89], yaptıkları çalışmada LP kullanarak, KSA'ların yaşam sınırlarının analiz ve karşılaştırmasını kaynağın gizlilik durumuna bağlı olarak yapmışlar ve iki farklı kaynak gizleme metodu sunmuşlardır.

Tavli vd. [90], çalışmalarında LP kullanarak, KSA'larda bağlamsal gizliliği geliştirmek için yeni bir metot önermişlerdir. Bu metodun KSN ömrü üzerindeki etkisini mesafeye bağlı olarak analiz etmişlerdir.

Guerrero-Zapata vd. [91], çalışmalarında WMSN (Wireless Multimedia Sensor Networks) ve WSSN (Wireless Security Sensor Networks) 'lerin mevcut çalışma alanını ele alarak kendi güvenlik yönleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Burada sadece mevcut durumla yetinilmemiş aynı zamanda gelecek vizyon üzerinde de önemli tespitler yapılmıştır.

Bıçakçı vd. [92] çalışmalarında LP kullanarak ağ ömrünü uzatmak için hesaplama ve iletişim ödünleşmelerini en efektif bir şekilde kullanarak, tasarımcılara rehberlik etmişlerdir. Sayısal imza algoritmaları kullanılarak mümkün olduğunca ağ ömründen az ödün verilerek işlemler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen LP modeli kullanılarak üç farklı sayısal imzanın ağ ömrü üzerindeki etkileri araştırılarak sonuçları ortaya konulmuştur. Neticede uygun algoritmanın seçilmesi durumunda ağ ömründe sadece %10 lük bir kayıp, uygun seçilmemesi durumunda ise %90 lık bir kayıp olacağını ortaya koymuşlardır.

Yapılan bir kısım çalışmalarda teorik olarak hareketliliğin yük dengeleme üzerindeki etkisi vurgulanmış ve ağ ömrünü uzattığı ifade edilmiştir [20, 33, 100, 101].

Hareketlilikten yararlanarak enerji dengeleme çalışmamızın anahtar düşüncesidir. Daha kesin bir ifadeyle çalışmamızdaki araştırma problemi kablosuz tasarsız sensör ağlarında hareketliliğin yük dengeleme, üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bildiğimiz kadarıyla şu ana kadar bu sorun etrafıca ve lineer programlama kullanılarak çalışılmamıştır.

Lineer programlama kullanarak yeni bir problem formülasyonu geliştirdiğimiz çalışmada önemli bir problemin cevabını araştırdık: Hareketlilik hangi durumlarda ve ne zaman yük dengelemeye yardımcı olur?

1.2. Tezin Organizasyonu

Bölüm 2’ de kablosuz sensör ağlarının mimarisi, çalışma biçimi, topoloji yönetimi, protokol yığını, uygulama alanları, kablosuz sensör aygıtlarının mimarisi ve Random Walk Mobility Model (RWMM) hakkında bilgiler verilmiştir.

Aynı bölümde Lineer programlama ile problem tanımlama, model oluşturma, model çözme, çözüm sonuçlarını doğrulama ve model gerçekleştirme hususlarında bilgiler verilmiştir. Bunun yanında lineer programlama modellerinin matematiksel gösterimi, amaç fonksiyonu ve düğümler arasında veri akışını gösteren örnek bir problemin çözümü verilmiştir.

Bölüm 3’te düğümler arasındaki enerji kullanımını dengeleyecek sistemin matematiksel modeli, model parametreleri, modelin GAMS ile çözümü, sistemin hareketlilik modeli, düğümlerin alana yerleştirilmesi ve kontrol edilmesi, düğümler arasındaki veri akışları, düğümler arasında mesafelerin hesaplanması ve iletişim için kullanılan enerji modeli verilmiştir.

Bölüm 4’te matematiksel modelin GAMS ile çözümü neticesinde elde edilen sayısal sonuçların elde edilmesi, analiz edilmesi, sistemin test edilmesi ve sonuçların tartışıldığı kısımlara yer verilmiştir.

Bölüm 5’te çoklu kaynak-hedef arasında veri iletimi için modelin revize edilmesi lineer problemin yeniden çözdürülmesi ve elde edilen sonuçların yorumlanması hususlarına yer verilmiştir. Bunun yanında yük dengeleme ile taşınan veri arasındaki ilişki, yük dengeleme ile düğümler arasındaki mesafe ilişkisi ve ağırlıklı mesafe ortalaması hususları açıklığa kavuşturulmuştur.

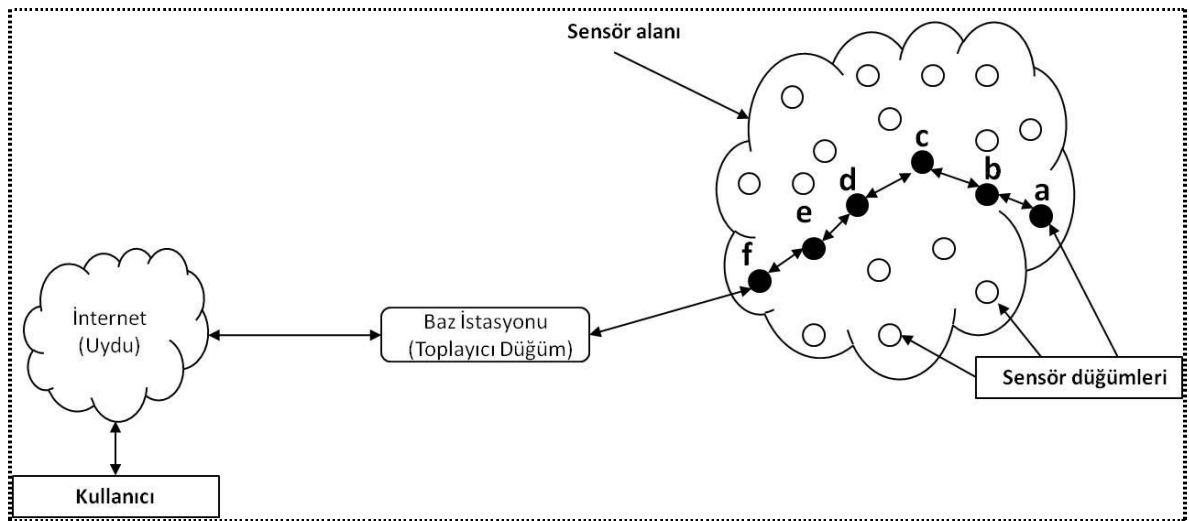
Bölüm 6’da bu tez çalışması neticesinde elde edilen sonuçlar ele alınmıştır.

2. GENEL ÇERÇEVE

2.1. Kablosuz Sensör Ağlarının Mimarisi

Sensör düğümleri genellikle Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi sensör alanına dağıtılırlar. Bölgenin durumuna göre bu dağıtım işlemi bir hava aracı ile aşağı atılmak suretiyle yapılır yâda farklı bir şekilde belirli konumlara yerleştirilerek gerçekleştirilir. Alanda yer alan her bir sensör düğümü veri toplama ve topladığı veriyi baz istasyonuna ve son kullanıcıya gönderme yeteneğine sahiptir. Sensör alanına hareketli nesne yâda nesneler girdiğinde; nesneyi algılayabilecek sensörler için algılama süreci başlamış demektir. Nesneyi algılayan her bir sensör, bu esnada bir algılama paketi oluşturur. Çok atlamalı ve altyapısı olmayan düğümler vasıtasıyla ve baz istasyonu üzerinden son kullanıcıya yönlendirilen veri Şekil 2.1’ de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi algılama işlemi **a** sensör düğümü tarafından yapılmakta ve üretilen veri paketi sırasıyla **a-b-c-d-e-f** sensör düğümleri üzerinden baz istasyonuna iletilmektedir. Veri toplayan baz istasyonu görev yöneticisi ile sırasıyla internet, uydu, farklı kablosuz bir yapı (wifi, wimax vs.) ya da direkt son kullanıcıyla haberleşir [28]. Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi arada çoklu baz istasyonu ya da çoklu son kullanıcı mimari de yer alabilir. Sensör düğümleri, algılamanın olmadığı diğer durumlarda herhangi bir paket oluşturmaz.

Kablosuz sensör ağlarda (KSA) sensör düğümleri veri üretme ve yönlendirme gibi iki farklı fonksiyona sahiptirler.



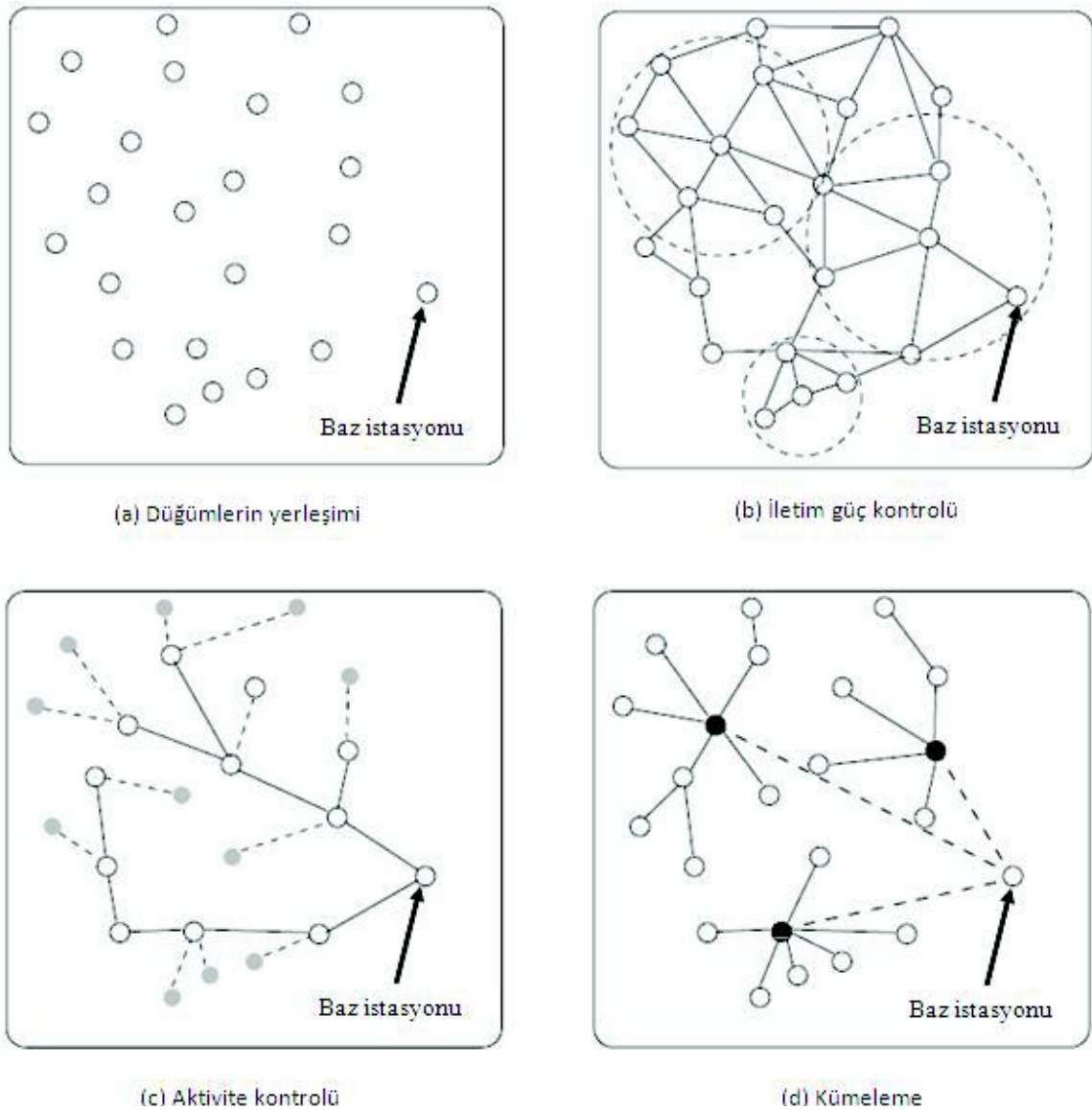
Şekil 2.1 Sensör alanındaki sensör düğümlerinden kullanıcıya doğru veri akışı

Kaynak fonksiyonu: Bir sensör düğümü algılama esnasında elde ettiği olay bilgilerini toplayıcı düğümüne iletmek için iletim özelliğini kullanır.

Yönlendirme fonksiyonu: Sensör düğümleri diğer düğümlerden aldıkları veri paketlerini çok atlamalı yol üzerinden toplayıcı düğümüne ulaştırmak için bir sonraki hedef düğümünü kullanır. Bu işlem arada görev yapma (relaying) olarak ifade edilmektedir.

2.1.1. Topoloji Yönetimi

Topoloji yönetimi kablosuz sensör ağlarında ağ yönetiminin önemli bir bileşenidir [22]. Bir ağın topolojisi graf teorisine göre iletişim için mevcut olan düğümlerin konumları ve bu düğümler arasındaki iletim bağlantısı olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.2 Topoloji yönetim teknikleri [1].

KSA'larda topoloji sadece düğümlerin konumlarını işaret etmez aynı zamanda düğümler arasındaki iletişim bağlantılarını da işaret eder. Bu nedenle topoloji KSA iletişim protokollerinin önemli bir parçasıdır.

Şekil 2.2' de dört ana topoloji yönetim tekniği gösterilmiştir. Bu teknikler kendi başlarına kullanılabildiği gibi bağlantılı olarak da kullanılabilirler.

Düğümleri yerleştirme-Dağıtma (Deployment): Topoloji yönetiminin ilk aşaması Şekil (2.2-a)' da gösterildiği gibi düğümlerin alana yerleştirilmesidir. Konuşlandırma teknikleri düğümlerin alandaki konumlarını belirler. Alanı kapsama ve bağlanabilirlik özellikleri ile bu aşama büyük önem arz etmektedir. Buna göre maksimum alan sensörler tarafından korunabilir. Benzer şekilde düğümlerin yerleşimi ve uygun bir şekilde dağıtımı kablosuz kanalların limitlerini de etkiler.

Güç kontrolü: Topoloji kısmen düğümler arasındaki bağlantılar olarak tanımlanır. Kablosuz ağlarda düğümler arasındaki bağlantılar, düğüm vericilerinin kapasitesine bağlıdır. Şekil (2.2-b)' de gösterildiği gibi düğümler arasındaki iletişim mesafesini vericinin güç kontrolü sağlamaktadır.

Buna göre; bir düğümün komşu sayısı veya çok atlamalı yönlendirme içinde atlama sayısı; enerji verimliliği, güvenilirlik ve gecikme için belirlenebilir.

Aktivite kontrolü: Bir KSA'da, algılayıcı düğümün vericisi enerji verimliliğini artırmak için belirli dönemlerde kapatılabilir. Bunun sonucu olarak belirli düğümlerin uyku modu esnasında ağ ile bağlantıları kesilir. Böylece sensörlerin aktivitelerine göre Şekil (2.2-c)' de gösterildiği gibi ağ topolojisi korunur. Buna göre bir yandan bağlantı sağlanır ve ağ kapasitesi korunurken diğer yandan gereksiz düğümler kapatılabilir.

Kümeleme: Ağ yapısı Şekil (2.2-d)' de gösterildiği gibi düz topoloji olarak yönetilebileceği gibi enerji verimliliği ve ölçeklenebilirliği artırmak için kümeleme olarak adlandırılan belirli gruplar halinde de yönetilebilir.

Bu durumda düğümler gruplar halinde kümelere yerleştirilirler. Her bir kümedeki etkin birer düğüm vasıtasıyla grup düğümlerinin verileri baz istasyonuna taşınır.

2.1.2. Protokol Yığını

Şekil 2.3'te verildiği gibi protokol yığını hem baz istasyonu (toplayıcı düğüm) hem de tüm sensörler tarafından kullanılmaktadır.

Protokol yığını, gücü ve yönlendirme bilincini birleştirir. Ağ oluşturma protokolleri ile verinin entegrasyonunu sağlar. Kablosuz ortam üzerinde iletişim gücünü verimli kullanır ve sensör düğümlerinin işbirliği yapmasına imkân sağlar. Protokol yığını;

- Fiziksel katman,
- Veri bağlantı katmanı,
- Ağ katmanı,
- Taşıma katmanı,
- Uygulama katmanından oluşur.

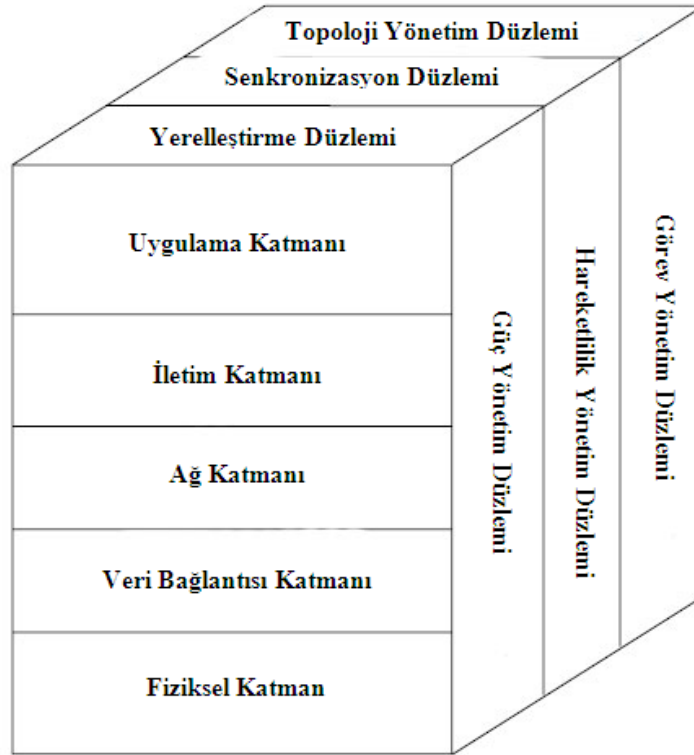
Bunun yanında;

- Senkronizasyon düzlemi,
- Yerelleştirme düzlemi,
- Topoloji yönetim düzlemi,
- Güç yönetim düzlemi,
- Hareketlilik yönetimi düzlemi,
- Görev yönetim düzlemi aynı yığında yer alır.

Protokol yığındaki katman ve düzlemleri açık ve öz olarak şöyle ifade edebiliriz:

- Fiziksel katman; basit ama sağlam, modülasyon, iletim ve alma teknikleri ihtiyaçlarını karşılar.
- Bağlantı katmanı, ortamın gürültülü ve düğümlerin mobil olarak hareket etme ihtimaline karşın, hata kontrol teknikleri ile güvenilir haberleşme sağlamak ve komşuların yayınları ile çarpışmayı en aza indirmek için MAC üzerinden kanal erişimi yönetmekle sorumludur. Algılama görevlerine bağlı olarak, uygulama yazılımı farklı oluşturulabilir ve uygulama katmanı üzerinde kullanılır.
- Ağ katmanı, taşıma katmanı tarafından sağlanan verileri yönlendirmekle görevlidir.
- Taşıma katmanı, sensör ağı uygulamalarının ihtiyaç duydukları veri akışını korumada yardımcı olur.
- Buna ek olarak; güç, mobilite ve görev yönetimi düzlemleri sensör düğümleri arasında güç, hareket ve görev dağılımını izler. Bu düzlemler, sensör düğümlerini

koordine ederek algılama işleminin kolay yapılmasını ve güç tüketiminin düşürmesini sağlarlar.



Şekil 2.3 Sensör ağı protokol yığını

- Güç yönetim düzlemi, bir sensör düğümün gücünü nasıl kullandığını yönetir. Örneğin, sensör düğümü komşularından bir mesaj aldıktan sonra, alıcısını kapatabilir. Bu işlem aynı mesajı mükerrer almasına engel olur. Ayrıca, bir sensör düğümünün güç seviyesi düşük olduğunda, bu durumunu komşularına yönlendirme işlemlerinde görev almayacağı şeklinde bildirir. Kalan enerjisini sadece veri algılama için kullanır.
- Mobilite yönetim düzlemi, sensör düğümlerini algılar ve hareketlerini kaydeder. Böylece bir sensör kendi komşularının örüntüsünü takip eder. Bir sensör komşularını tanıyarak, güç ve görev kullanımını dengeler.
- Görev yönetim düzlemi, bir bölgeye has algılama görevlerini ve zamanlamaları dengeler. Sensörlerin tamamı aynı anda aynı bölgede algılama görevi üstlenmez. Sonuç olarak, bazı sensör düğümleri güç düzeyine bağlı olarak, diğerlerinden daha fazla görevi gerçekleştirir.

Sensör düğümlerinin birlikte verimli güç tüketmeleri, ağ ortamında veri yönlendirmeleri ve sensör düğümleri arasında kaynak paylaşımı yapmak için yönetim düzlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar olmadan, her bir sensör düğümü sadece bireysel olarak çalışacaktır.

Tüm sensör ağı açısından bakıldığında sensör düğümlerinin birlikte çalışmaları oldukça verimli olmaktadır. Ancak bu şekilde sensör ağlarının ömrü uzayabilir.

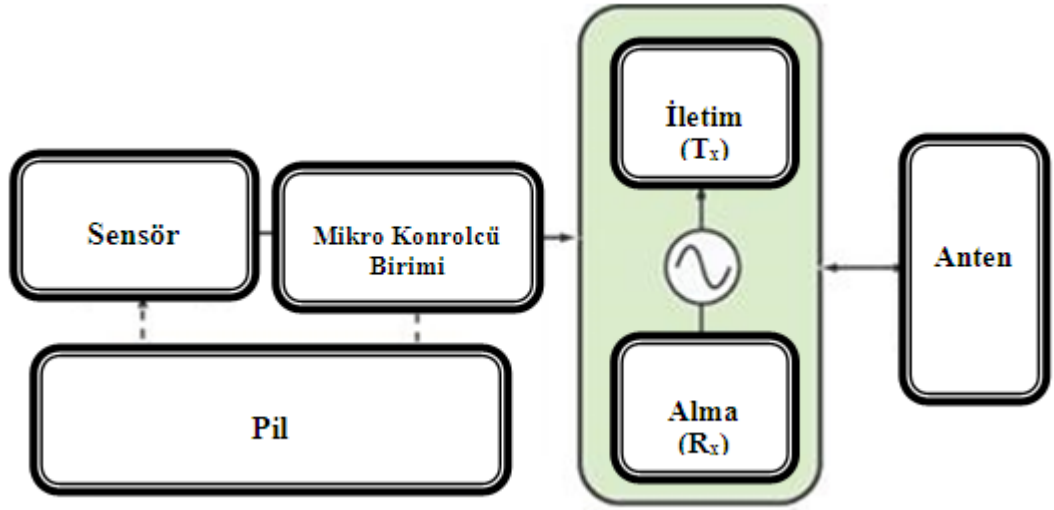
2.1.3. Kablosuz Sensör Aygıt Mimarisi

Kablosuz sensör cihazların mimarisi oldukça basittir. Bir kablosuz sensör; işlemci, bellek, radyo vericisi, anten, güç kaynağı ve giriş/çıkış arabiriminden meydana gelmektedir (Şekil 2.4). Kablosuz sensör cihazları, düşük güç tüketimi yapacak biçimde tasarlanmışlardır. Mikrokontrolcüler, mikroişlemcilere göre daha az enerji tüketmektedirler. Mimaride genellikle işlemci yerine mikrokontrolcüler kullanılmaktadır. Bu da maliyeti oldukça düşürmektedir. Mikrokontrolcülerin bazı kısımları uyku modunda çalışacak biçimde tasarlanmıştır. Sensörlerde kullanılan mikrokontrolcüler 16 bit ya da 32 bit RISC mimarisine sahiptirler ve düşük frekanslarda çalışmaktadırlar [29].

Kablosuz sensör cihazlarda kullanılan en popüler mikrokontrolcüler arasında Intel StrongARM SA-1100 [30] yer almaktadır. Söz konusu işlemci 206 MHz de çalışmaktadır. Bir diğer örnek ise 8 bitlik Atmel ATmega 128L [31] mikrokontrolcüsüdür.

Kablosuz sensör cihazlarında verileri saklamak için RAM belleğe ve program kodlarını sürekli tutmak için de ROM belleğe ihtiyaç vardır. RAM bellekler mikrokontrolcü içerisinde tutulmakta ve bir kaç yüz KB kapasitesinde olabilmektedirler.

Bir kablosuz sensör düğümü radyo alıcı-vericisi içermektedir. Kablosuz cihazlarla haberleşmek için gerekli tüm devreler bu modülde yer almaktadır. Bu modüldeki en önemli bileşenler; modülatör ve demodülatör modülleri, sayısal-analog ve analog-sayısal çeviriciler, düşük gürültü ve güç kuvvetlendiricileri, filtreler, mikserler ve anten olarak sıralanabilir.



Şekil 2.4 Kablosuz sensör aygıt mimarisi

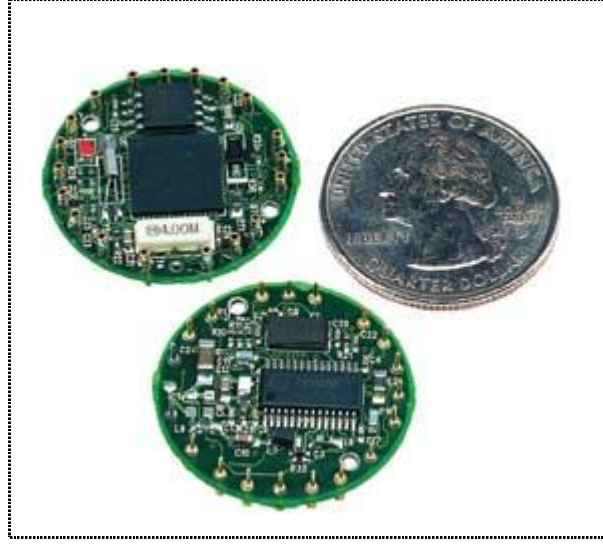
Radyo alıcı (R_x) ve vericileri (T_x) iletimde eş zamanlı olarak yarı iki yönlü olarak çalışmaktadırlar.

Tıpkı mikroişlemciler gibi alıcı ve vericiler farklı modlarda çalışabilmektedirler [32]. Bunlar; normal, iletime, alma, boşta ve uyku çalışma modlarıdır. Uyku modu kablosuz sensör ağların en önemli özelliklerinden birisidir. Bununla beraber cihazların açma ve kapamalarına dikkat edilmesi gerekir. Çünkü cihazlar en fazla enerjiyi bu durumlarda harcarlar. Bazı alıcı ve vericiler farklı yetenekler ile donatılmışlardır. Örneğin birden fazla uyku modunu desteklemektedir. Bazı kısımları kapalı tutulurken diğer kısımları uykuda tutulabilmektedir.

Ticari olarak kablosuz sensör ağları için üretilen mevcut alıcı ve vericilerin farklı karakteristikleri ve yetenekleri olabilmektedir. Sensör düğümleri normal olarak üç farklı frekans bandında çalışabilirler: 400 MHz, 800–900 MHz ve 2.4 GHz. İletim güçleri, modülasyon biçimleri ve veri iletim hızları üretici firmalara göre farklılık gösterebilmektedir. Örneğin RF Monolithic [30] firmasının TR 1000 ailesi 800–900 MHz frekans aralığında çalışabilmekte, dinamik olarak iletim gücünü 1.4mW'a kadar çıkarabilmekte ve iletim hızı 115.2 Kbps olabilmektedir.

Bunun yanında Chipcom firmasının CC100 ürünü olan popüler MICA2 800–900 MHz frekans aralığında çalışabilmekte, 50 adet programlanabilen kanal sunabilmekte, FSK modülasyonunu kullanmakta ve programlanabilen bir çıkış gücünü sunabilmektedir. Aynı ürün iletim anında 27 mA, alma anında 10 mA ve uyku modunda ise 1 mikroamperden daha az akım çekmektedir.

MICAZ da yer alan Chipcom CC2420 (Şekil 2.5) IEEE 802.15.4 standardı ile uyumlu çalışmaktadır [34]. Kablosuz sensör cihazlar genellikle harici 2 adet AA pil ile çalıştırılırlar.



Şekil 2.5 Sensör düğümleri [116].

2.1.4. Kablosuz Sensör Ağların Uygulama Alanları

Kablosuz sensör ağlarının farklı uygulama alanlarına yönelik esnek çözüm üretmeleri, onların popüler olmasını sağlamıştır [38]. Uygulamalarının çoğu fiziksel olguları, algılama, tahmin, sınıflandırma, izleme ve toplama ile ilgilidir [9]. Kablosuz sensör ağları; afet yardım operasyonlarında (Bir uçaktan yangın üzerine sensör düğümleri bırakılır, her bir düğüm ile sıcaklık ölçülür ve bir sıcaklık haritası türetilir), biyoçeşitlilik haritalamada, akıllı yapılar ya da köprülerde, yaban hayatı gözlemlenmede, deprem sonrası mekanik stres gözlemlenmede, hassas tarımda, tıp ve sağlıkta kullanılır.

2.1.4.1. Kablosuz Sensör Uygulamalarının Ana Fonksiyonları

Uygulama alanından bağımsız olarak, KSA uygulamalarının ana fonksiyonları veri toplama ve veri işlemedir. Toplanan ve işlenen veriler uygulamaya göre değişir.

Uygulama ve etki çeşitliliğine rağmen, uygulama alanından bağımsız olarak dört ana görev sıralanabilir [35]:

İzleme: Belirli bir yerde veya ağın kapsama alanında bir parametre değeri belirler.

Algılama: Bir olayın yâda olay parametrelerinin meydana gelişini algılar.

Nesne sınıflandırma: Bir nesne yâda olayı tanımlar. Genel olarak, birçok kaynaktan gelen veri kombinasyonlarını gerektirir ve işbirliği ile neticelendirmesini sağlar.

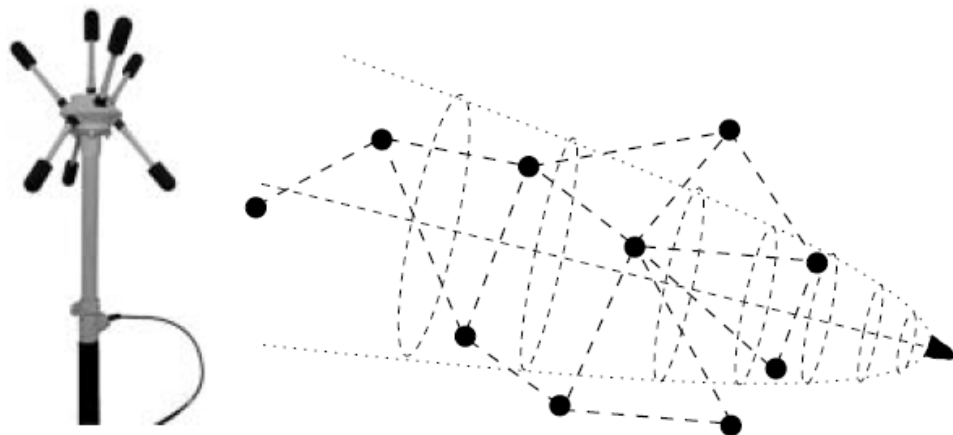
Nesne takip etme: Ağın kapsama alanı içine giren mobil bir nesnenin hareketlerini ve pozisyonunu izler.

2.1.4.2. Askeri Uygulamalar

Kablosuz sensör ağları askeri uygulama alanlarında başarılı bir biçimde kullanılabilmektedir. Bu uygulamaları; komuta, kontrol, iletişim, hesaplama, istihbarat, gözetleme, keşif ve hedef belirleme olarak sıralayabiliriz. Hızlı gelişimleri, kendilerini örgütlemeleri ve hata tolerans karakteristikleri gibi özellikleri sayesinde askeri uygulamalarda oldukça yoğun kullanmalarını sağlamıştır.

“Smart dust” kablosuz sensör ağlarının kullanıldığı ve DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) destekli ilk askeri uygulamalardan birisidir [36, 54].

Bir diğer uygulama alanı keskin nişancı yerini tespit etmedir. “Sniper detection system” bu amaçla yapılmış bir uygulamadır [14]. Gerek sabit ve gerekse hareket halindeki avcının yerini tam olarak tespit edebilmektedir. Bu sistemde pasif ses sensörleri kullanılarak gelen mermiyi algılayabilmektedir. Şekil 2.6’ da görüldüğü gibi avcı algılama sistemi bir dizi mikrofondan meydana gelmiş olup bir araca takılabileceği gibi bir kişi tarafından da taşınabilmektedir.



Şekil 2.6 Bumerang keskin nişancı algılama (solda) ve dağıtık algılama (sağda) sistemi [1,117,120].

2.1.4.3. VigilNet

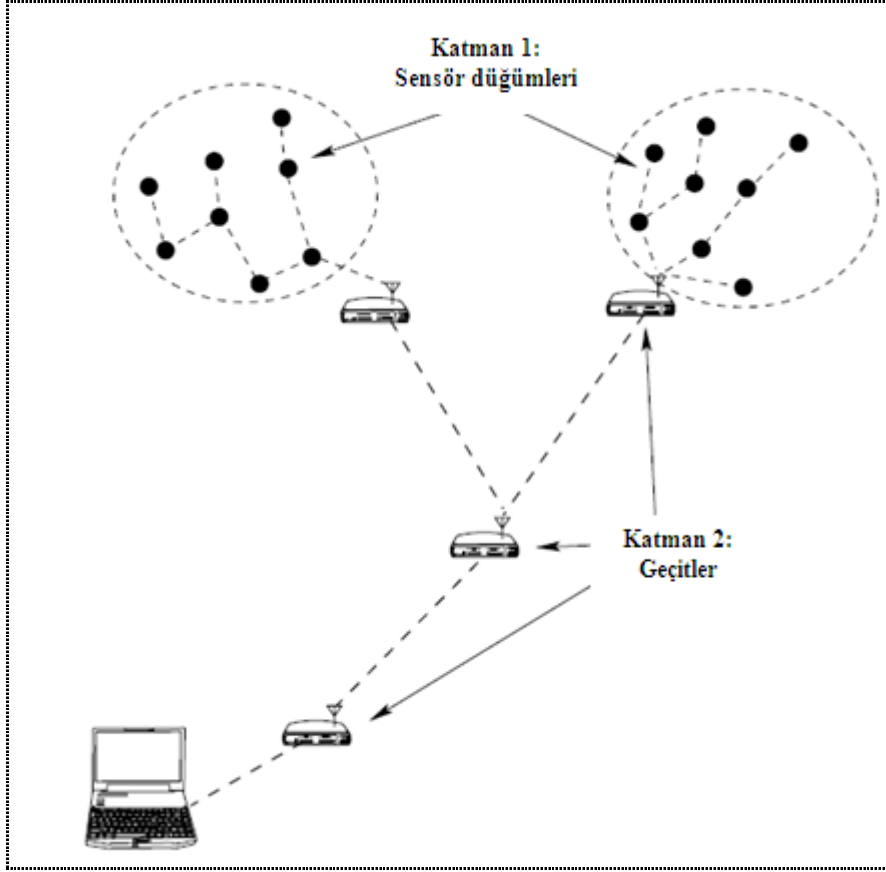
VigilNet [40] büyük ölçekli gözetleme ağıdır. Dağıtık sensör düğümleri vasıtasıyla zorlu ortamlarda enerji verimliliği ve gizli hedef takip etmek için geliştirilmiştir. Kablosuz ağı temeli mica2 [37] sensörlerine dayanmaktadır. Ağda manyetik sensörler kullanılmıştır. Hareket halindeki araçların manyetik etkileri algılanabilmektedir.

2.1.4.4. Çevresel Uygulamalar

Kablosuz sensör ağlarının bağımsız hareket edebilme ve uyumlu çalışma yetenekleri geniş çaplı çevresel uygulamalarda kullanılabilmektedir. Çevresel uygulamalara örnek olarak; bazı kuşların hareketleri, küçük hayvanlar ve böcekler, sulama, gökyüzü araştırmaları, kimyasal ve biyolojik etkiler, doğru ziraat, teknelerde çevresel gözlemleme, toprak, atmosferik değişimler, orman yangını algılama, meteorolojik araştırmalar, sel algılama, kirlilik çalışmaları verilebilir [41–56]. COA (College of the Atlantic) birçok adadaki arazi araştırmaları için kurulmuş alan araştırma programıdır [93].

2.1.4.5. Great Duck Island

Great Duck Island projesi [56, 58] Atlantik koleji ile Berkeley'deki İntel araştırma laboratuvarı işbirliği ile geliştirildi. Projenin amacı adadaki deniz kuşlarının çoğalmalarını ve hareketlerini izlemektir. Adadaki doğal ortamı gözlemlemek için iki katmanlı ağ mimarisi kullanılmıştır. Şekil 2.7' de görüldüğü gibi birinci katmanda bilgileri almak için sensör grupları kullanılmıştır. İkinci katmanda ise sensör gruplarını bağlamak ve bilgileri merkeze taşımak için geçitler kullanılmıştır. Merkez bilgisayar adanın üzerinde yer almakta ve uydu aracılığıyla internete bağlanmaktadır. İnternet üzerinden ana bilgisayara ve dolayısıyla sensörlere erişilebilmektedir.



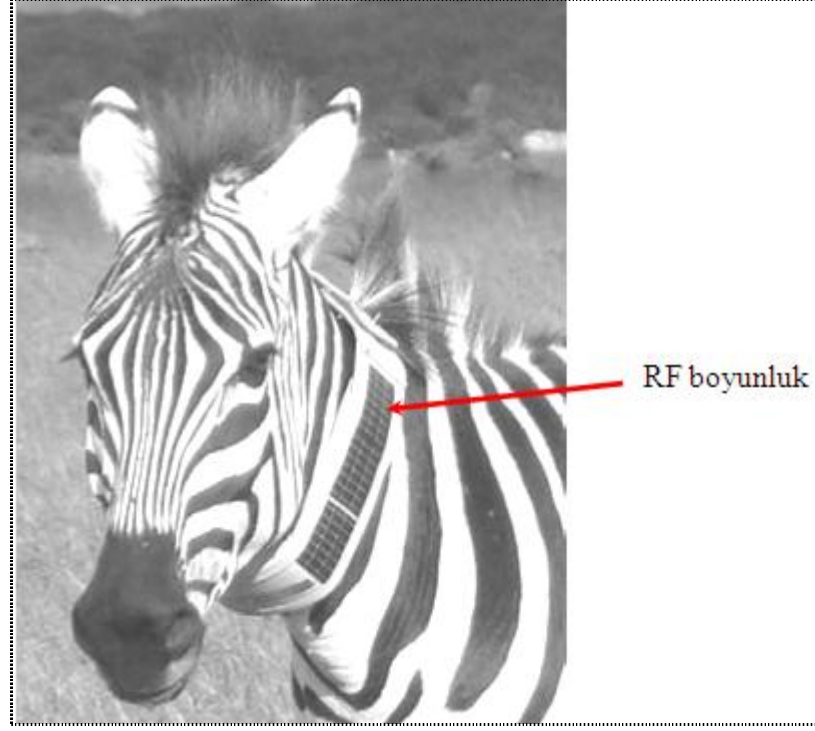
Şekil 2.7 Great Duck Island iki katmanlı ağ gözlemleme mimarisi

2.1.4.6. Corie

Corie çevresel bir gözlemleme ve tahmin sistemi olup Oregondaki Center for Coastal ve Land Margin Research [109] tarafından kurulmuştur. Farklı sensörler kullanılarak 24 farklı istasyonda suyun akış hızı, sıcaklığı, tuzluluk oranı ve derinliği ölçülmektedir [72].

2.1.4.7. ZebraNet

Zebranet [49] bir hayvan takip sistemi olup uzun vadeli zebra hareketlerini, kendileri ve diğer türler ile ilişkilerini araştırmak için geliştirildi. Kenyada [110] kurulan bu sistem iki farklı zebra türünü izlemektedir. Zebraların konumlarını izlemek için üzerinde mikro kontrolcüye bağlı GPS, şarjlı piller, pilleri şarj eden güneş enerjisi modülü ve kısa-uzun mesafeli RF olan birer tane boyunluk bulunmaktadır (Şekil 2.8). Zebraların konum bilgisi her üç dakikada bir GPS vasıtasıyla alınabilmektedir.



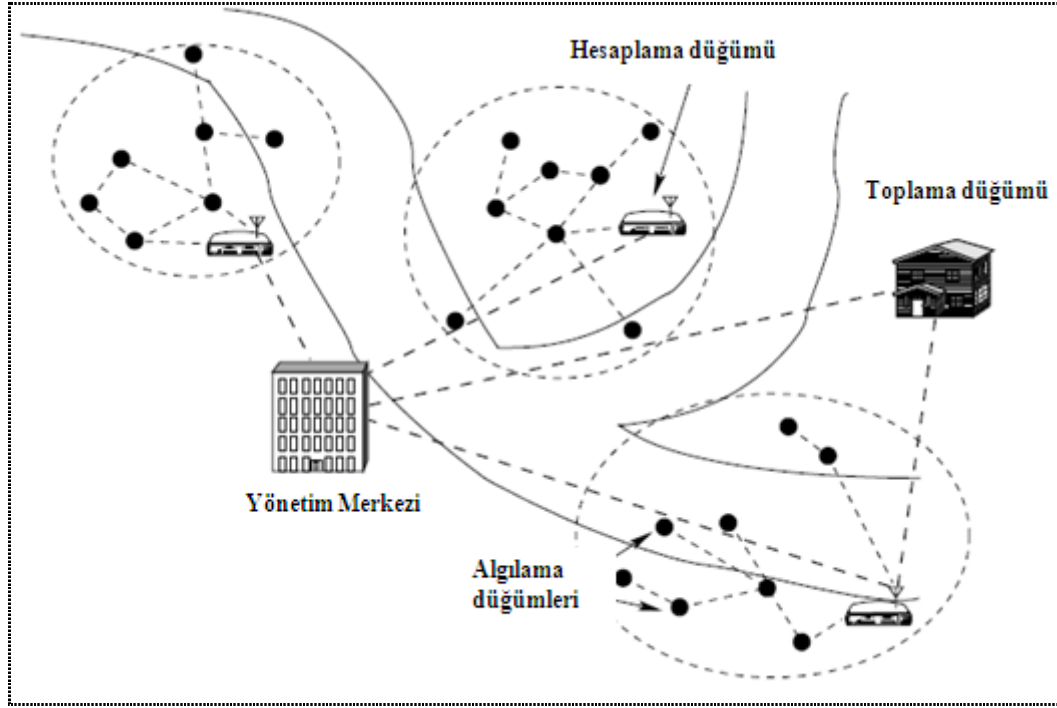
Şekil 2.8 ZebraNet sensör boyunluk [49]

2.1.4.8. Volkan Gözlemlene

Kablosuz sensör ağlar, insanın sürekli erişemediği ve imkânsız denilebilecek zorlu ortamlarda kullanılabilirler. Volkan izleme bu zorlu ve tehlikeli ortamlardan birisidir. Bu alandaki ilk denemeler 2004–2005 yıllarında ekvatordaki iki volkan üzerinde yapıldı [27, 55, 83]. 2004 yılında üç sensör düğümünden ve bir mikrofondan oluşan küçük bir sensör ağı volkan püskürtmelerini gözlemlemek için kullanıldı.

2.1.4.9. Erken Sel Algılama

Kablosuz sensör ağlar, bazı ülkelerde erken sel baskını uyarı sistemi olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.9). Sensörler ile yağan yağmur miktarları, suyun akış hızları, hava sıcaklığı ve nehir tabanları sürekli gözlemlenmektedir [42, 111].



Şekil 2.9 Sel algılama sistemi sensör ağı mimarisi

2.1.4.10. Sağlık Uygulamaları

Biyomedikal alanındaki akıllı ve tümleşik sensör içeren cihazların nakil işlemlerinde yerlerini alması kablosuz sensör ağlarının bu alanda kullanılmasına büyük imkânlar sağlamıştır. Bu uygulamalar arasında özürlü arabirimleri, tümleşik hasta gözlemleme, teşhisler, hastanede ilaç yönetimi, küçük böceklerin takibi, insan fizyolojik verilerinin gözlemlenmesi, hasta ve doktorların hastane içerisinde izlenmesi ve takip edilmesi sayılabilir [50, 54, 59–63].

2.1.4.11. Ev Uygulamaları

Teknoloji geliştikçe, akıllı sensör düğümler ve çalıştırıcılar; elektrikli süpürgeler, mikrodalga fırınlar, buzdolapları, DVD oynatıcılar, su gözlemleme sistemleri gibi uygulamalarda kullanılabilmektedirler. Ev cihazlarındaki bu düğümler vasıtasıyla ev cihazları hem birbirleri ile hem de uydu ve internet aracılığıyla diğer cihazlar ile haberleşebilmektedirler. Böyle bir yapı, cihazların hem yakında hem de uzakta oldukça kolay bir biçimde kontrol edilmesine imkân sağlamaktadır [64].

2.1.4.12. Endüstri Uygulamaları

Kablolu sensör ağları uzun süreden beri endüstriyel algılama ve kontrol alanlarında kullanılmaktadır. Böyle bir sistem, güncellenmek istendiğinde, neredeyse yeni bir sistem maliyeti kadar bir maliyet ön plana çıkıyordu. Bundan dolayı kablosuz sensör ağları kablolu ağlara göre bir avantaj olarak öne çıktılar.

Ticari uygulamalara örnek olarak; madde yorulmaları, sanal klavyeler, döküm yönetimi, ürün kalite yönetimi, akıllı ofisler, ofis yapılarının çevresel kontrolü, otomatik üretim ortamları için robot kontrolü, etkileşimli oyuncaklar, etkileşimli müzeler, fabrika süreç kontrolü ve otomasyon, felaket alanı gözlemlleme, gömülü sensör düğümleri ile akıllı yapılar, makine teşhis, ulaşım, fabrika enstrümantasyon, araç hırsızlık algılama, döndürme mekanizmaları, rüzgâr tünelleri, yankısız odalar verilebilir [41, 65-71].

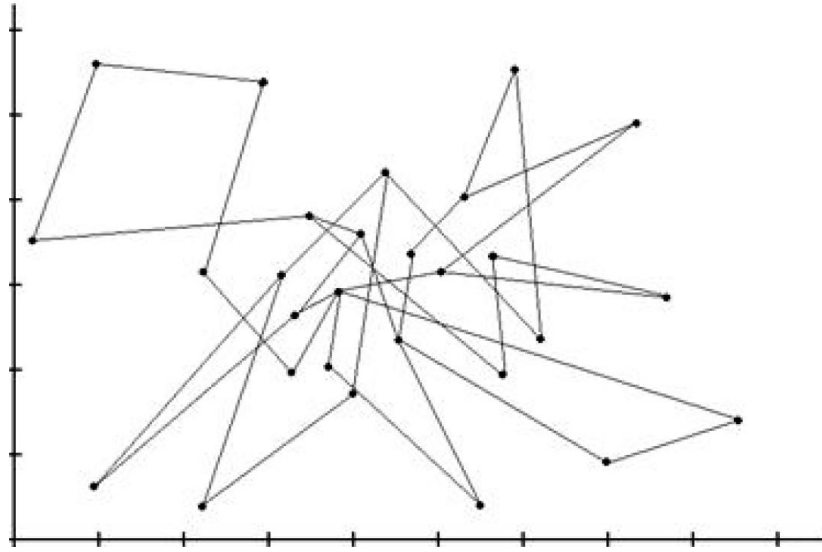
2.2. Hareketlilik Modelleri

Tasarsız ağlar için yeni bir protokol simülasyonunu adam akıllı yapmak için zorunlu olarak bir hareketlilik modelini kullanmayı gerektirir. Sadece böyle bir senaryo önerilen protokolün gerçekleştirilebilirliğini mümkün kılar. Şu anda ağların simülasyonlarında iki tip hareketlilik model tipi kullanılır. Bunlar izleyici ve sentetik olarak isimlendirilir. İzleyici tipi modeller gerçek yaşam sistemlerinde kullanılan modellerdir. Sentetik modelleri düğümlerin izleri yerine gerçek davranışlarını inceler. Bir hareketlilik modeli gerçek hareketli düğümlerin hareketlerini taklit edebilmelidir. Hareketlilik mobil tasarsız (ad hoc) ağların anahtar kriteridir.

Random RWMM (Walk Mobility Model) modeli gerçekleştirilmesinin ve analizinin basit olması nedeniyle MANET'lerde tercih edilmektedir. Büyük ölçekli tasarsız ağlarda bu model daha yaygın kullanılmaktadır. Ağ performansı hareketlilik modellerinin yapısından etkilenmektedir [78]

2.2.1. RWMM (Random Walk Mobility Model)

RWMM matematiksel olarak 1926 yılında Einstein tarafından tanımlandı. Doğadaki birçok hareket gözlemlenmeyecek şekilde meydana geldiğinden RWMM söz konusu düzensiz hareketleri taklit etmek için geliştirilmiştir [32].

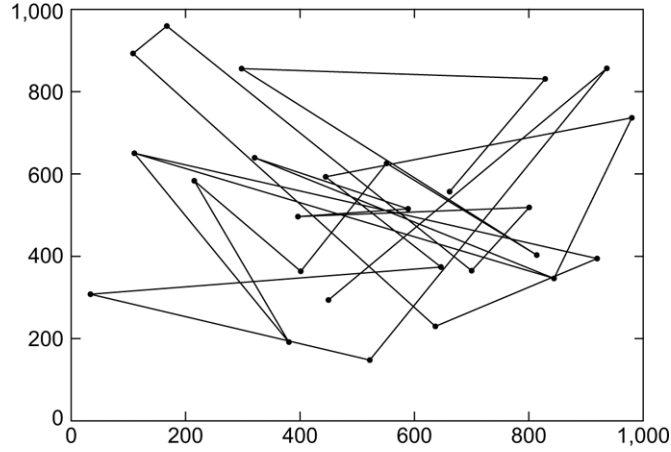


Şekil 2.10 Bir hareketli düğümün 2-D Random Walk Mobility Model tabanlı olarak gerçekleştirdiği seyahat modeli [118].

Bu modelde, bir mobil düğüm mevcut konumundan farklı bir konuma hızını ve yönünü tayin ederek rastgele hareket eder. Yeni hız ve yeni yön tamamen ön tanımlı bir aralıkta seçilir. Bunlar sırasıyla (s_{ilk} , s_{son}) ve $(0, 2\pi)$ dir. Bu modelde her bir hareket sabit bir t anında yâda sabit bir d mesafesinde gerçekleşir. Her t anında iki farklı konum arasındaki mesafe ölçülür. Aynı modelde eğer bir mobil düğüm simülasyon alanının kenarlarına ulaşırsa geldiği açı ile simülasyon alanına geri döner. RWMM'in çok sayıda türevi geliştirilmiştir. Bunlar 1-D, 2-D, 3-D ve d-D olarak ifade edilebilir. Şekil 2.10' da 2-D modelinde gözlemlenen hareket verilmiştir. Söz konusu şekildeki mobil düğüm 300 m x 600 m alanının merkezinden (150, 300 koordinat noktaları) itibaren hareketine başlamaktadır. Her bir noktada hareketli düğüm yönünü rastgele 0 ile 2π arasında ve hızını ise 10 m/s olarak belirlemektedir. Hareketli düğümün 60 s boyunca aynı hız ve aynı yön ile hareketine müsaade edilmektedir [82]. Aynı modelde belirlenen mesafe kadar hareket edildikten sonra da hareketli düğümün yönünü değiştirmesine müsaade edilmektedir.

2.2.2. Random Waypoint Mobility Model

Bu modelde bir düğüm yönünü ve hızını değiştirmeden önce bir müddet bekler. Söz konusu düğüm bekleme süresini tamamladığında rastgele yönünü seçerek (0 , $yüksek_hız$) parametreleri arasındaki bir hız değeri ile yoluna devam eder (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Bir hareketli düğümün 2-D Random Waypoint Mobility Model tabanlı olarak gerçekleştirdiği seyahat modeli [119].

2.3. Lineer Programlama

Sayısal karar verme yöntemlerinin hepsinde olduğu gibi lineer programlama modellerin kurulması, problemin tanımlanması ile başlar. Karar vericinin ulaşmak istediği bir amacının olması, bu amaca ulaşmada izlenebilecek alternatif stratejilerin bulunması, bu stratejilerden hangisinin amacı en iyi şekilde gerçekleştireceği hususunda şüphelerin bulunması lineer programlama yönteminin kullanılabileceği bir problemin varlığını gösterir. Bu problem bulunduğu sistem içerisinde gözlemlenerek, probleme etki eden parametreler belirlenir. Bu parametreler kullanılarak problemin amaç fonksiyonu ve sınırlar kümesinden oluşan lineer programlama modeli kurulmuş olur. Bu modelin çözülmesiyle, tüm sınır şartlarını sağlayan ve amaç fonksiyonunun değerini de optimum yapan karar değişkenlerinin değerleri elde edilir [39].

2.3.1. Problem Tanımlama

Bu aşamada çalışmaya konu olan, karar değişkenleri, parametreler, sınır şartları gibi temel faktörler belirlenir. Karar değişkenleri, problemi etkileyen kontrol edilebilir değişkenlerdir. Karar verici tarafından karar değişkenlerinin; kavramsal tanımları (üretilen ürünler, kullanılacak makineler, v.b.) yapıldıktan sonra bunlar X_i , $i=1,2,3,...,N$ şeklinde simgelerle gösterilir [103].

Sistemde kontrol edilemeyen değişkenlere ise parametre denir. Parametreler, belirli koşullarda karar vericinin kontrolü dışında belirli değerler alabilirler. Bir lineer programlama modelindeki parametreler: makine kapasitesi, kalıp kapasitesi, insan gücü, birim başına maliyet, bir hammaddenin ürüne dönüşüm oranı, v.b. olabilir.

Parametreler C_j , $j=1,2,3,\dots,N$ şeklinde simgelerle gösterilir. Kurulacak lineer programlama modelinin çözüm getirmek istediği problemin içinde bulunduğu sistem veya çevre sistemlerden kaynaklanan sınırlayıcı koşullara kısıtlar denir. Bir anlamda kısıtlar, problemin dayandığı karar ortamında, karar değişkenlerini ve bunlarla parametreler arasındaki ilişkileri etkileyen koşullardır.

2.3.2. Model Oluşturma

Problem belirlendikten sonra problemi en iyi şekilde temsil edecek lineer bir matematiksel modelin kurulması gerekir. Model gerçeğin basitleştirilmiş bir gösterimidir.

2.3.3. Model Çözme

Model geliştirildikten sonra modelin çözülerek, bilinmeyen değişkenlerinin hesaplanması gerekir. Lineer programlama modellerinin çözümünde grafik yöntemi ve simpleks yöntemi kullanılmaktadır [87].

Ancak günümüzde bilgisayar programlarındaki ilerlemelerle beraber, kurulan çok kompleks modeller bile GAMS (General Algebraic Modeling System), LINDO (Linear Interactive and Discrete Optimizer), Microsoft Excel gibi paket programlar ile kısa sürede çözümlenebilmektedir.

2.3.4. Modele Ait Çözüm Sonuçlarını Doğrulama

Modelin çözümü sonucunda ulaşılan karar değişkenlerinin değerleri ile beklenen değerler karşılaştırılır. Bunun sonucunda modelin sistemi hangi ölçüde temsil ettiği, modeldeki varsayımların geçerliliği, model kapsamına alınmış gereksiz değişkenler, ulaşılmak istenen amaçların tutarlılığı ortaya konulmaya çalışılır. Belirlenen hata veya eksiklikler, karar modeli üzerinde düzeltilir ve model tekrar çözülür.

2.3.5. Model Uygulama

Bu aşama, elde edilen sonuçların karar verici tarafından uygulanmasıdır

2.3.6. Lineer Programlama Modellerinin Matematiksel Gösterimi

Bir lineer programlama modelinin yapısındaki amaç fonksiyonu, sınır denklemleri ve pozitiflik şartından oluşan üç temel bileşen matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:

2.3.7. Amaç Fonksiyonu

Lineer programlamanın varsayımına uygun olarak lineerdir. Genellikle kar maksimizasyonu veya maliyet minimizasyonu amacına uygun şekilde kurulurlar.

Standart lineer programlama problemi şöyle tanımlanır [103-105]:

1. Pozitif değişkenler:

$$x_j \geq 0, j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$$

2. $Ax = b$, olarak yazdığımız değişkenler lineer kısıtları ifade ederler. Burada A; M satır ve N sütundan ibaret bir matrisi ve b; M bileşenli bir sütun vektörüdür.

3. Amaç değişkenlerin lineer fonksiyonunu minimize etmektir:

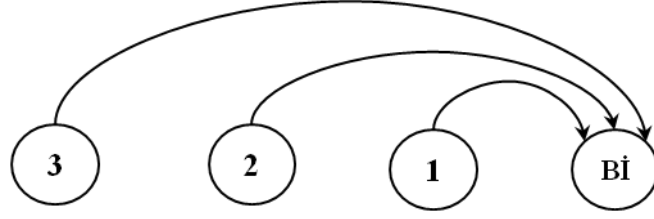
$$c^T x = c_1 x_1 + \dots + c_N x_N$$

Eğer x kısıtlamaları karşılıyorsa ($Ax = b, x \geq 0$) o zaman standart lineer programlama probleminin uygun bir çözümü olarak x çağrılır. Eğer x değişkeni amaç fonksiyonu ($c^T x$) daha da minimize ediyorsa o zaman x lineer programlama probleminin en uygun çözümüdür.

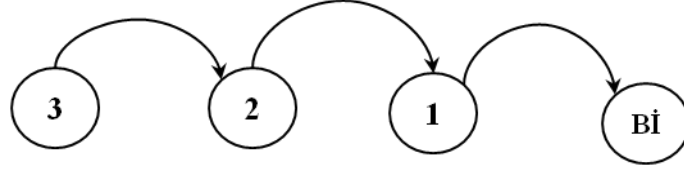
2.3.8. Düğümler Arasındaki Veri Akışının Lineer Programlama ile Dengelenmesi

Düğüm tarafından üretilen veriler alıcı düğüme iletilirken harcanan enerji miktarı, alıcı düğüme olan uzaklıkla üssel olarak arttığı kabul edilmektedir [88]. Kablosuz sensör ağlarında yardımlaşma, dolayısıyla verimli enerji kullanımı son derece önemlidir.

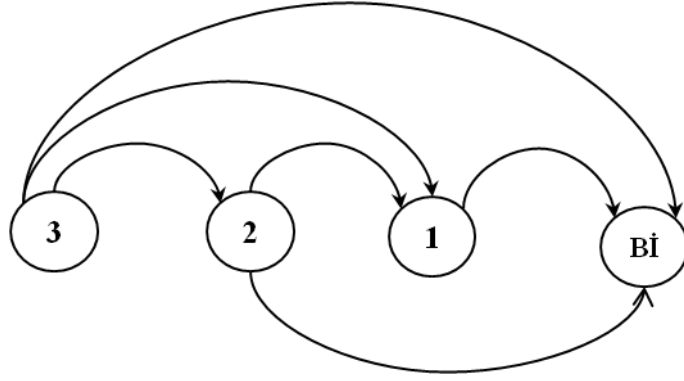
Şekil 2.12'deki gibi biri baz istasyonu olmak üzere dört sensör düğümünden oluşan ağın iletişim biçimini incelediğimizde, her bir sensör düğümünün kendi verisini direkt baz istasyonuna (Bİ) gönderdiğini görürüz. Bu durumda 3 numaralı sensör düğümünün enerjisi çok daha erken bitecektir. Bu yapıda yardımlaşma yoktur.



Şekil 2.12 Sensörlerden baz istasyonuna atlamasız veri akış biçimi



Şekil 2.13 Sensörlerden baz istasyonuna en yakın sensör üzerinden veri akış biçimi

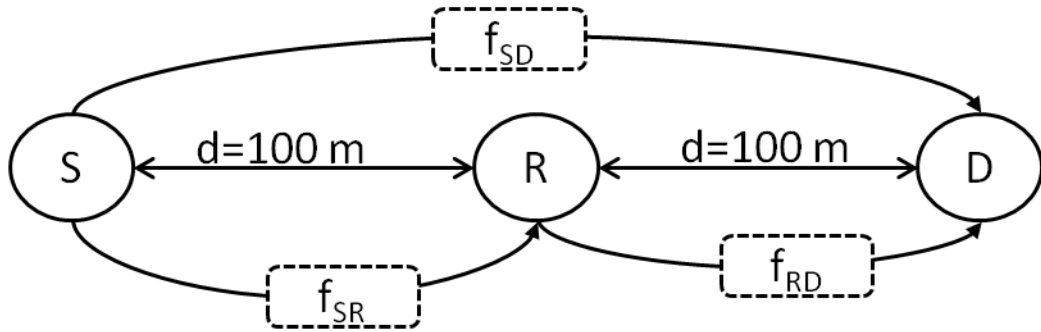


Şekil 2.14 Sensörlerden baz istasyonuna çok atlamalı veri akış biçimi

Şekil 2.13' te verilen durumda ise sensör düğümleri bencil bir şekilde davranmaktadır. Her bir sensör düğümü kendisine en yakın olan sensör düğümüne verilerini gönderdiğinde, enerjisi erken bitecek olan düğüm 1 numaralı düğüm olacaktır. Çünkü 1 numaralı düğüm, kendi ürettiği verinin yanında 2 ve 3 numaralı düğümlerin de verilerini baz istasyonuna taşımaktadır. Verilen her iki durumda da bir denge söz konusu olmadığında ağın kapsama alanı kısa sürede bitecektir.

Üçüncü bir durum olarak bir ağ ortamındaki verilerin dengeli bir şekilde baz istasyonuna gönderilmesidir. Bu durum şekil 2.14' te kullanılan çok atlama tekniği ile gösterilmiştir [35]. Söz konusu modelde düğümlerin enerjileri daha verimli kullanılmakta ve ağın ömrü daha uzun olmaktadır [15]. Bunu gerçekleştirmek için de lineer programlama kullanılmaktadır [112].

Verdiğimiz bir örnek ile lineer programlama ile kablosuz sensör ağlarında düğümler arasında taşınan veriyi optimize etmek suretiyle ağın ömrünü daha uzun tutmaya çalıştık. Örnek için 3 sensör düğümünde meydana gelen bir topoloji kullanıldı (Şekil 2.15). Hesaplamaların kolay yapılması için lineer topoloji yapısı benimsendi. Topolojide kullanılan üç sensör düğümünden ikisi kaynak-hedef diğeri ise sadece aldığı veriyi gönderen yani aradaki düğüm olarak görev yapmaktadır. Lineer olarak kurulan topolojide düğümler arasındaki mesafe 100'er m kabul edildi. Burada eğer S düğümü ürettiği 100 bit verinin tamamını direkt D düğümüne gönderirse o zaman enerjisi daha çabuk biteceğinden ağın ömrü kısa olacaktır. Aynı düğüm eğer ürettiği verinin tamamını R düğümü üzerinden D düğümüne gönderirse, o zaman R düğümü tüm veriyi D düğümüne ileteceğinden enerjisi daha erken bitecek ve ağın ömrü ksalacaktır. Ağın uzun ömürlü olması için S düğümünün ürettiği verinin dengeli bir şekilde bir kısmını R düğümü üzerinden D düğümüne, kalan kısmını ise direkt D düğümüne göndermesi gerekmektedir.



Şekil 2.15 Üç sensörden oluşan lineer topoloji

Herhangi bir t anında S düğümü $f_{SD}+f_{SR}$ kadar veri üretilmektedir. Burada kullanılan f_{ij} notasyonu veri akımının düğüm-i den düğüm-j ye akışını ifade etmektedir. Bu nedenle problemimiz $f_{SD}+f_{SR}$ maksimizasyonu olarak tanımlanmaktadır. R düğümü, aldığı kadar veriyi D düğümüne ileteceğinden $f_{SR}= f_{RD}$ olarak ifade edebilir. Topolojide kullanılan S ve R düğümlerinin aynı e enerjisine sahip olduğunu düşünürsek, S ve R düğümleri için sırasıyla enerji tüketim kısıtlarını (2.1)'den itibaren verilen denklemler ile ifade edebiliriz. Denklemi yazılan her iki düğüm için de harcanan enerjinin, sahip olan enerjiden daha küçük yâda eşit olduğunu gösterdik. Bu tür problemlerin çözümü yapılırken eşitsizlikler yerine eşitlikler kullanılır.

$$\{P_{tx,SD}f_{SD}+P_{tx,SR}f_{SR}\}\leq e \quad (2.1)$$

$$\{P_{tx,SR}f_{SR}+P_{tx,RD}f_{RD}\}\leq e \quad (2.2)$$

Düğümler arasındaki mesafe 100 m olarak belirlediğinden dolayı $P_{tx,SD}$, $P_{tx,SR}$, $P_{tx,SR}$ ve $P_{tx,RD}$ enerjilerini kolaylıkla hesaplanabilir ($\rho=50$ nJ, $\varepsilon=100$ μ J).

$$P_{tx,SD} = \rho + \varepsilon * d(S,D)^2 = 0.05 + 100e-6*(200)^2 = 4.05 \quad (2.3)$$

$$P_{tx,SR} = \rho + \varepsilon * d(S,R)^2 = 0.05 + 100e-6*(100)^2 = 1.05 \quad (2.4)$$

$$P_{tx,SR} = 0.05 \quad (2.5)$$

$$P_{tx,RD} = \rho + \varepsilon * d(R,D)^2 = 0.05 + 100e-6*(100)^2 = 1.05 \quad (2.6)$$

Elde edilen yeni değerler kullanılarak (2.1) ve (2.2) denklemlerini yeniden düzenleyebiliriz.

$$4,05f_{SD} + 1,05f_{SR} = e \quad (2.7)$$

$$4,05f_{SD} + 1,05f_{SR} = e \quad (2.8)$$

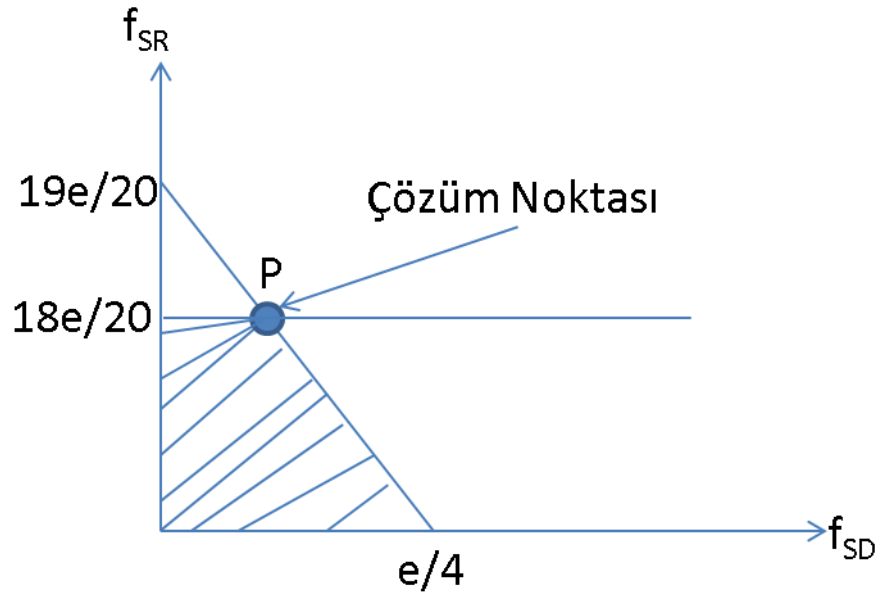
$$0.05f_{SR} + 1,05f_{RD} = 0.05f_{SR} + 1,05f_{SR} = 1,1f_{SR} = e \rightarrow f_{SR} = 0.9e \quad (2.9)$$

(2.9) denkleminde bulunan f_{SR} değişkenini (2.8) denkleminde yerine koyarak F_{SD} değişkenini bulduk.

$$4,05f_{SD} + 1,05*e/1.1 = e \rightarrow f_{SD} = 0.01e \quad (2.10)$$

$F_{SR}+f_{SD}$ veri akışlarının toplamını maksimize etmek için (2.8) ve (2.9) denklemleri birlikte çözüldüğünde çözüm kümesi olarak f_{SD} ve f_{SR} için sırasıyla $P(0.01e, 0.9e)$ bulunur.

Ayrıca $f_{SD}+f_{SR}$ nin optimum değeri ise $0.91e$ olmaktadır. Bu çözümün grafiksel gösterimi Şekil 2.16' da gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Denklem çözüm grafiği

Buraya kadar en basit bir şekilde, sensör ağlarındaki düğümler arasında verilerin nasıl dengeli taşınacağını dolayısıyla bir lineer problemin nasıl çözülebileceğini gösterdik.

3. SİSTEM MODELİNİ KURMA VE OPTİMİZASYON PROBLEMİNİ ÇÖZME

Matematiksel programlama problemleri gerçek yaşamdaki olguları modelleyen matematiksel modellerdir. Bu modeller parametreleri ve değişkenleri kullanırlar. Bunların ikisi de sayıları temsil ederler. Aralarındaki fark şudur: Parametrelerin değeri bilinmektedir. Değişkenlerin değeri ise işlem sürecinde hesaplanmaktadır. Tüm matematiksel programlama problemleri iki bileşenden oluşur. Bunlar kısıtlar ve amaç fonksiyonlarıdır [39].

Bu çalışmadaki amacımız ağdaki hareketlilik ile birlikte değişen ağ topolojisinden dolayı harcanan farklı enerjilerin yük dengeleme üzerindeki etkisini araştırmak ve bu çerçevede optimizasyon sonucu ağın ömrünü maksimum düzeyde tutmaktır.

Bu bölümde öncelikle sistem modelini, amaç fonksiyonunu ve kısıtları formüle ettik. Daha sonra optimizasyon problemini çözmek için yeni bir teknik sunduk. Baz istasyonu haricindeki tüm düğümlerin model ile belirlenen sınırlar dâhilinde iletişim enerjileri optimize edilmiştir.

Modelimizdeki düğümlerin yer değiştirme, kaynak-hedef çiftlerini belirleme ve kaynak düğümlerin paket üretme anlarını L olarak ifade ediyoruz. L parametresini zaman dilimlerinin bölündüğü bir zaman dilimi (time slot) olarak düşünebiliriz [102].

Bu çalışmada yapılan simülasyonlarda tüm iletişim paketlerinin aynı büyüklükte ve her L anında kaynak düğümün üreteceği veriyi 100 bit olarak kabul ediyoruz.

Aynı zamanda her L anında kaynak düğümün ürettiği 100 bitlik verinin hedef düğüme optimizasyon neticesinde tayin edilen düğümler üzerinde gönderilmekte ve simülasyon neticesinde tüm L anları boyunca en fazla enerji harcayan düğüm enerjisi bulunmaktadır.

3.1. Sistemin Matematiksel Modeli

Biz ağın N_v sensörden meydana geldiğini ve ağ içindeki tüm sensörlerin birbiri ile haberleşebildiğini kabul ediyoruz. Çalışmadaki asıl odak noktamız sensörler arasındaki iletişimdir. Bununla beraber ağın dışındaki iletişim yani ağın baz istasyonları ile iletişimi bu çalışmanın araştırması dahilinde değildir.

Sistem modelinde kullandığımız tüm varsayımlar, standart olup kablosuz sensör topluluğu tarafından genişçe kabul görmüşlerdir [1, 76, 84, 88]. İlk varsayımımız

sensörlerin iletişim esnasında harcadıkları enerjilerin; algılama ve işleme durumlarındaki enerjilerden daha büyük olduğudur [1].

Bu çalışmada algılayıcı düğümleri için, geniş ölçüde kabul görmüş ve [88] de tanıtılan enerji modelini kullandık. Buna göre bir simülasyonun her L anında bir düğümden diğerine bir bit göndermek için gerekli olan enerji miktarını (3.1)'deki gibi ifade ettik.

$$P_{tx,ij,L} = \rho + \varepsilon d_{ij,L}^{\alpha} \quad (3.1)$$

Her L anında bir bit almak için de gerekli olan enerji miktarını da (3.2) deki gibi ifade ettik.

$$P_{rx} = \rho \quad (3.2)$$

(3.1) denkleminde gösterilen ρ parametresi, elektronik devrelerdeki enerji kaybını, ε parametresi vericinin verimliliğini, $d_{ij,L}^{\alpha}$ her L anında (i, j) düğümleri arasındaki mesafeyi ve α ise erişim yolu kaybını temsil eder. Literatürde yol kayıp üstelinin 2 ile 5 arasında ($2 < \alpha < 5$) bir değer alabileceği ifade edilmektedir [76, 88]. (3.1) görüldüğü gibi harcanan bit gönderim enerjisinin, uzaklığa bağlı olarak üstel bir şekilde arttığını ifade edebiliriz.

Araştırdığımız problemin amaç fonksiyonunun optimize edilmesi sonucunda ağ ömrünün en yüksek olmasını ve düğüm başına tüketilen enerjinin ise minimum olmasını amaçlıyoruz. Modelimizde her L anında kaynak olarak seçilen bir düğüm sabit hızla 100 bitlik veri üretir.

Ağ modellemede kullanılan değişkenler ve açıklamaları ile birlikte Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. LP formülasyonu için terminoloji

Değişken	Açıklama	Sayısal Değerler
V	Düğüm kümesi	$N_1, N_2, N_3, \dots, N_{100}$
N_V	Düğüm sayısı	100
L	Anlar kümesi	$L_1, L_2, L_3, \dots, L_{40}$
N_L	An sayısı	40
K	Akımlar kümesi	$K_1, K_2, K_3, \dots, K_{16}$
N_K	Akım sayısı	16
S^k	k akımının kaynak düğümü	$S^1, S^2, S^3, \dots, S^K$
D^k	k akımının hedef düğümü	$D^1, D^2, D^3, \dots, D^K$
X^k	k akımının kaynak ve hedef düğümleri dışındaki düğümler kümesi	$X^1, X^2, X^3, \dots, X^K$
R_{max}	Anlık en fazla hareket yarıçapı	0,10, 20, 30..150 m
A_V	Ağ alanı	400 x 400 m ²
ϵ	Vericinin verimliliği	100 pJ/bit/m ²
ρ	Elektronik devrede tüketilen enerji	50 nJ/bit
α	Yol kayıp üsteli	2
Z^{kl}	l anında k akım kaynağının ürettiği veri miktarı	100 bit
e_i	Düğüm-i'nin toplam enerjisi	nJ
P_{rx}	Bir bit alırken tüketilen enerji miktarı	nJ
$P_{tx,ij}$	Düğüm-i'den düğüm-j'ye bir bit veri gönderme enerjisi	nJ
d_{ij}	Düğüm-i ile düğüm-j arasındaki mesafe	m

Tablo 3.1’de verilen değişkenlerin kullanıldığı ve enerji dengeleme için lineer programlama tabanlı olarak oluşturulan matematiksel model Şekil 3.1’ de verilmiştir.

Amaç: Batarya kullanımını en aza indirmek	
$f_{ij}^l \geq 0, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall l \in L$	(3.3)
$\sum_{j \in V} f_{ij}^l = \sum_{j \in V} f_{ji}^l, \quad \forall i \in X, \quad \forall l \in L$	(3.4)
$\sum_{j \in V} f_{ij}^l = \sum_{j \in V} f_{ji}^l + Z^l, \quad \forall i \in S, \quad \forall l \in L$	(3.5)
$Z + \sum_{j \in V} f_{ij}^l = \sum_{j \in V} f_{ji}^l, \quad \forall i \in D, \quad \forall l \in L$	(3.6)
$P_{rx} \sum_{l \in L} \sum_{j \in V} f_{ji}^l + \sum_{l \in L} \sum_{j \in V} P_{tx,ij}^l f_{ij}^l \leq e_i, \quad \forall i \in V$	(3.7)
$e_i = \text{batarya}, \quad \forall i \in V$	(3.8)

Şekil 3.1 Sistemin matematiksel modeli

Şekil 3.1’de verilen sistemin matematiksel modelinde yer alan ve sistemin sınırlarını belirleyen her bir denklemin modellemedeki görevini adım adım açıklayalım:

Denklem (3.3) akımların negatif olamayacağını belirtmek için kullanılıyor. Her L anında i -düğümünden j -düğümlerine gönderilecek bilgi paketleri pozitif olmak durumundadır. Burada her i ve j düğümü V düğümler kümesinin birer elemanı, her l ise anlar kümesi olan L ‘nin birer elemanıdır.

Denklem (3.4) bir düğümün aradaki düğüm olması durumunda kendisine giren ve çıkan verilerin her L anı için eşit olacağını belirtiyor. Bir düğüm diğer düğümlerden ne kadar veri almışsa, o kadar veriyi göndermek durumundadır.

Denklem (3.5) ile i -düğümünün kaynak düğüm olması durumunda, ürettiği veri miktarı ve diğer j -düğümlerinden aldığı veri miktarı toplamının j -düğümlerine gönderdiği veri miktarı toplamına eşit olacağı ifade ediliyor.

Denklem (3.6) ile i -düğümünün hedef düğüm olması durumunda, tüm j -düğümlerinden aldığı veri miktarı ve L anında üretilen veri miktarı toplamının j -düğümlerine gönderdiği veri miktarına eşit olacağı ifade ediliyor.

Denklem (3.7) ile P_{rx} ’in sabit ve P_{tx} ’ in ise uzaklığa bağlı olduğunu yani düğümler arasındaki mesafeden bağımsız olduğunu ve tüm düğümlerin diğer düğümlerden aldıkları veri akımlarından dolayı harcanan enerji toplamı ile diğer düğümlere veri göndermek için harcanan toplam enerjiye küçük ya da eşit olacağı ifade ediliyor.

Denklem (3.8) ile tüm düğümlerde aynı miktarda başlangıç enerjisi olması gerektiği ifade ediliyor.

Her L anı için i ve j düğümleri arasındaki uzaklık ve dolayısıyla aralarındaki haberleşme için birim bit başına düşen iletişim maliyeti L ’ye bağlı olarak değişiyor. Çünkü her L anında bir yer değiştirme söz konusudur.

Burada (3.3-3.7) olarak verilen matematiksel eşitlikler ve eşitsizlikler lineer programın kısıtlarını (3.8) ise amaç fonksiyonunu temsil etmektedir.

Bir bitin kaynaktan hedefe ulaşması için geçtiği tüm düğümler lineer program tarafından belirleniyor. Burada temel amaç tüketilen enerjiyi optimizasyon ile minimize etmektir.

Özetlemek gerekirse, burada optimizasyon problemini her bir L anı esnasında tek kaynak-hedef çifti için formüle ettik. Bu problemin lineer program ile çözümü, ağı hareketlilik yapısı değiştiği zaman harcanan enerjiyi optimize ederek ve enerji değişimi hakkında bir fikir vermektedir.

3.2. Optimizasyon Problemini Çözme

Lineer programlama (LP) yöneylem araştırma alanının en başarılı disiplinlerinden biridir [17]. Matematiksel programlama modelinin iki temel elemanından biri optimize edilecek amaç fonksiyonu, diğeri ise kısıtlardır. Lineer programlama bir tip matematiksel programlama modelidir. Bu matematiksel model; optimize edilecek bir fonksiyon, eşitlikler ve eşitsizliklerden oluşmaktadır.

Çalışılan modeldeki fonksiyon ve kısıtlara bakıldığında bunların lineer olduğu görülür. Dolayısıyla çözdürülmek istenilen problemin de lineer olduğu ifade edilebilir..

Bugün, cebirsel modelleme dilleri, matematiksel programlama problemlerini temsil etmek ve çözmek için en iyi yöntem olarak görülmekte ve yaygın olarak kabul edilmektedir.

Modelin çözümünde GAMS (General Algebraic Modeling System), modelleme yazılım paketi kullanıldı [112].

GAMS, matematiksel programlama ve optimizasyonu için bir üst düzey modelleme sistemidir. GAMS, dil derleyicisinden ve tümleşik yüksek performanslı, istikrarlı çözücülerden oluşur. GAMS karmaşık, büyük ölçekli modelleme uygulamaları için özel olarak tasarlanmıştır.

Geliştirilen matematiksel model, GAMS ortamında kodlama ve modelleme kurallarına uygun olarak yazılarak çalıştırıldı ve elde edilen sonuçlar test edildi.

3.3. Sistemin Hareketlilik Modeli

Bu çalışmada düğümleri alana yerleştirmek, düğümlere hareketlilik kazandırmak ve düğümlerin hareketini alan içinde sınırlamak için RWMM'yi temel alan yeni bir model kullandık [32, 78, 82, 106-107]. Tablo 2.2'de çalışmada kullandığımız modelin RWMM'ye olan benzerlikleri verilmiştir.

RWMM'de her bir hareket, sabit bir t anında yâda sabit bir mesafede gerçekleşir. Her t anında iki farklı konum arasındaki mesafe ölçülür. Aynı modelde eğer bir mobil düğüm

simülasyon alanının kenarlarına ulaşırsa geldiği açı ile simülasyon alanına geri döner [32].

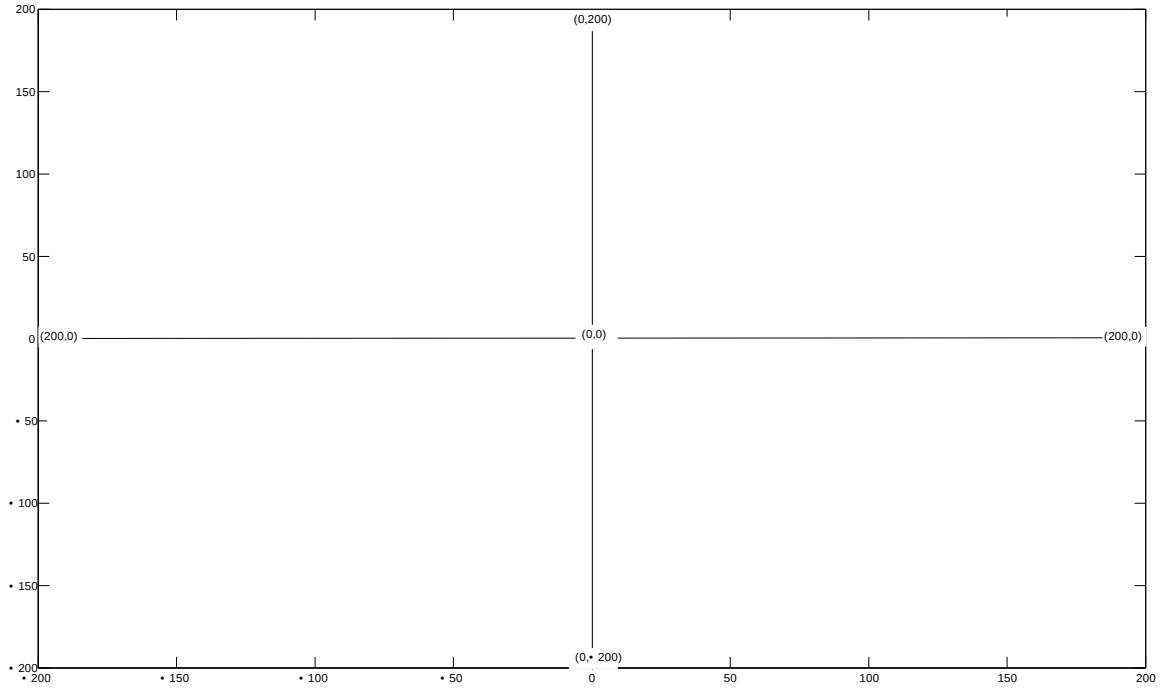
Modelimizde N_v adet sensör fiziksel bir olguyu gözlemlemek için belirli bir alana RWMM baz alınarak yerleştiriliyor. Daha sonra hem sensör sayısı hem de alanın büyüklüğü değiştirilerek etkilerine bakılıyor. Başlangıçta 100 adet sensör, 400 m x 400 m bir alana rastgele yerleştiriliyor. Düğümlerin yerleştirileceği alana sanal bir koordinat sistemi oturttuğumuzu varsayarak alan içindeki düğümlerin (x,y) koordinat çifti (-r, r) arasında herhangi bir değer alacağı kabul ediliyor. Bu durumda yatay ekseninde yani (-r, r) arasındaki herhangi bir değer düğümün x koordinatlarını, dikey ekseninde ve (-r, r) arasındaki herhangi bir değer düğümün y koordinat noktasını temsil etmektedir.

Tablo 3.2. Kullandığımız modelin RWMM ile karşılaştırılması

Hareketlilik Özellikleri	RWMM [32, 82]	Çalışmada Kullanılan Hareketlilik Modeli
Alana düğüm yerleştirme	Rastgele	Rastgele
Düğümün yer değiştirme biçimi	Mevcut_konum → Yeni_konum	Mevcut_konum → Yeni_konum
Yer değiştirmeler arasında bekleme durumu	Yoktur	Yoktur
Yer değiştirme parametreleri	Yön (0, 2*pi) ve Hız (speedMin, speedMax)	Yön (0, 2*pi), Yeni_konum(önceki_konum + R_{max})
Hareketin meydana gelişi	Sabit bir t zamanında yâda sabit bir mesafede meydana gelir.	Sabit bir L anında ve önceki konumundan R_{max} yarıçapı kadar bir mesafede meydana gelir.
Bir sonraki hareketin başlama biçimi	Yeni yön belirlenir ve yeni hız hesaplanır.	Bir sonraki L anında yeni yön belirlenir ve önceki konumundan R_{max} yarıçapı kadar yer değiştirme gerçekleşir.
Düğümün alanı terk etme durumu	Düğümün alanı terk edemez	Düğümün alanı terk edemez
Düğümün alan kenarlarına ulaştıklarında sergiledikleri hareket	Geliş açısı ile alan içine yansıyarak hareket ederler.	Geliş açısı ile ve dışarı çıkacakları kadar içeri doğru hareket ederler.

Her L anında ve her bir düğüm için birer (x, y) koordinat çifti kullanılmaktadır. Sensörlerin konumlarını tanımlayan (x, y) koordinat çiftleri alan içindeki herhangi birer noktayı temsil eden tamsayılardan meydana gelmektedir. Alanın merkezini koordinat sisteminin merkez noktası olarak kabul ettiğimiz için sensörlere ait koordinat değerleri pozitif yâda negatif olabilmektedir (Şekil 3.2).

Sayısal bir büyüklük olan r değerini 200 alırsak bu durumda düğümlerin yerleştirileceği alan kare şeklinde olacaktır. Alan içinde bir düğüm yatay eksen boyunca (-200, 200) noktaları arasında hareket ederken dikey eksen boyunca (-200, 200) noktaları arasında hareket edecektir. Düğümlerin yerleştirildikleri alanın hem yataydaki hem de dikeydeki ardışık iki koordinat noktası arasındaki uzaklık birer m olarak kabul edilmiştir. Örneğin bir düğümün hareketlilik ($R_{\max}=10$, $L=1$) anında (100, 100) koordinatlarında olduğunu kabul edelim. Aynı düğümün $L+1$ ($R_{\max}=10$ m, $L=2$) anında (100, 109) koordinatlarında olduğunu varsaydığımızda söz konusu düğümün bir önceki duruma göre dikey ekseninde 9 m yukarı doğru hareket ettiğini söyleyebiliriz. Modelde düğüm sayısı (N_v), an sayısı (N_L) ve alanın büyüklüğü (A_v) değiştirilmek suretiyle istenilen büyüklükteki bir alana ve istenilen sayıda düğüm üretilip yerleştirilebilmektedir.

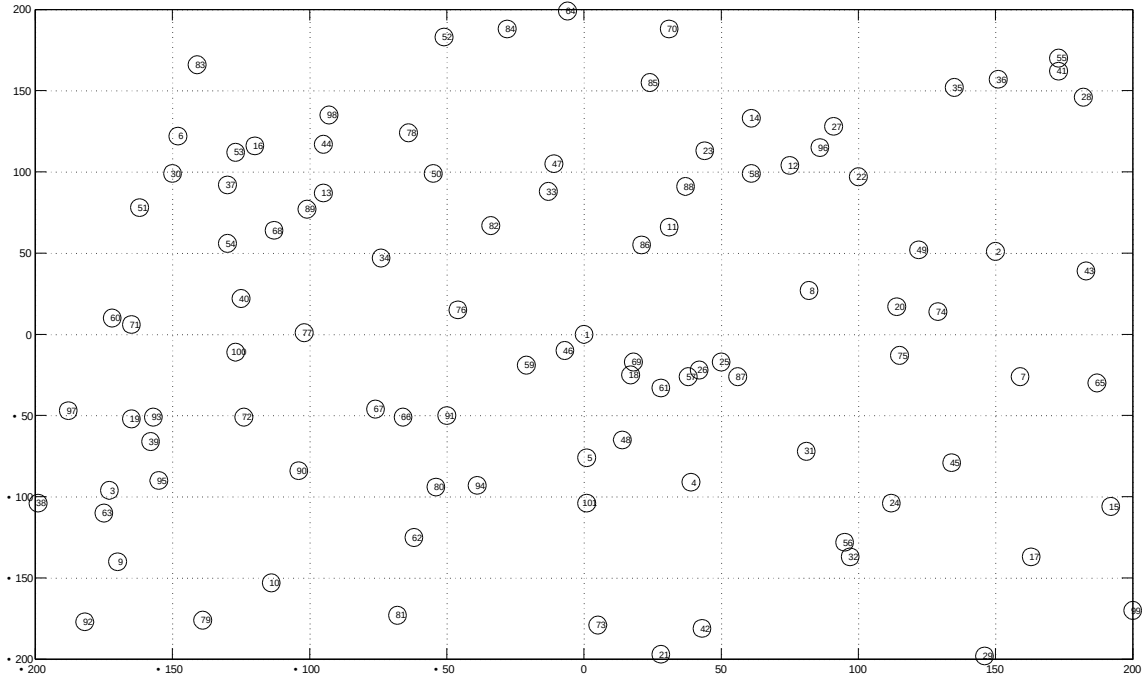


Şekil 3.2 Sanal koordinat sistemi ve düğümlerin yerleşim alanı

Oluşturulan koordinat sistemin içinde düğümler rastgele yer alırlar. Koordinat sistemi ağ alanını dört eşit bölgeye ayırmakta ve her bir bölgede düğümler yer almaktadır. Dolayısıyla düğümler bulundukları bölgenin koordinat noktaları ile temsil edilmektedirler. I. bölgede düğümlerin koordinatları (x, y) , II. bölgede $(-x, y)$, III. bölgede $(-x, -y)$ ve IV. bölgede ise $(x, -y)$ olarak temsil edilmektedir.

Şekil 3.3' te $400 \times 400 \text{ m}^2$ bir alana yerleştirilen 100 adet düğümün alandaki görüntüsü yer almaktadır. Alan içerisinde düğümlerin dağılımı L' ye göre sürekli değişmektedir. Rastgele ilk yerleştirmenin ardında düğümlerin belli bir yarıçap içerisinde hareket etmesi yerleşim düzenini, ağın topolojisini sürekli değiştirmektedir.

Başlangıçta düğümler rastgele dağıtıldığından dolayı, düğümler birbirlerine yakın olabildikleri gibi uzakta olabilirler. Alanın belli bir kısmı yoğun şekilde düğümler ile korunurken diğer kısımları daha seyrek düğümler ile korunabilir. Hareketlilik ile beraber düğümlerin alan içindeki yerleri rastgele değişecektir. Dolayısıyla sürekli değişen dinamik bir topoloji karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.3 400 m x 400 m alan içersine rastgele yerleştirilen 100 adet düğümün görüntüsü

3.4. Düğümlerin Alan Dışına Çıkışlarının Engellenmesi

Başlangıçta düğümlerin yer alacağı yerleşim alanının sınırları ve alanın büyüklüğü GAMS' ta tanımlanmaktadır. Bundan dolayı söz konusu düğümler alana rastgele yerleştirilmekte ve alan içinde rastgele noktalarda yer almaktadırlar. Hareketliliğin olmadığı her L anında düğümler belirlenen alanın dışına asla çıkamazlar. Bu durumda her L anı için sadece kaynak-hedef çifti ve kaynak-hedef çifti arasında veri iletiminde görev alacak düğümler değişir. Fakat işin içersine hareketlilik girdiğinde yani sürekli değişen

bir R_{max} yarıçapı içinde bir önceki noktaya göre konum değişimi söz konusu olduğunda, düğümlerin alan dışına çıkma ihtimali vardır. Ancak düğümlerin alan dışına çıkması istenmeyen bir durumdur. Başlangıçtaki statik duruma göre düğümler arasındaki mesafeler artacağından dolayı hem daha fazla enerji harcanması söz konusu olacak hem de asıl gözlenmesi ya da kontrol edilmesi gereken alan istenilen şekilde kontrol edilemeyecektir.

Düğümlerin alan dışına çıkması istenmeyen bir durum olduğu gibi düğümlerin kenarlarda birikmeleri de istenmeyen bir durumdur. Bu tür durumların önüne geçmek için GAMS programlama ortamında özel bir kontrol mekanizması kullanılmıştır.

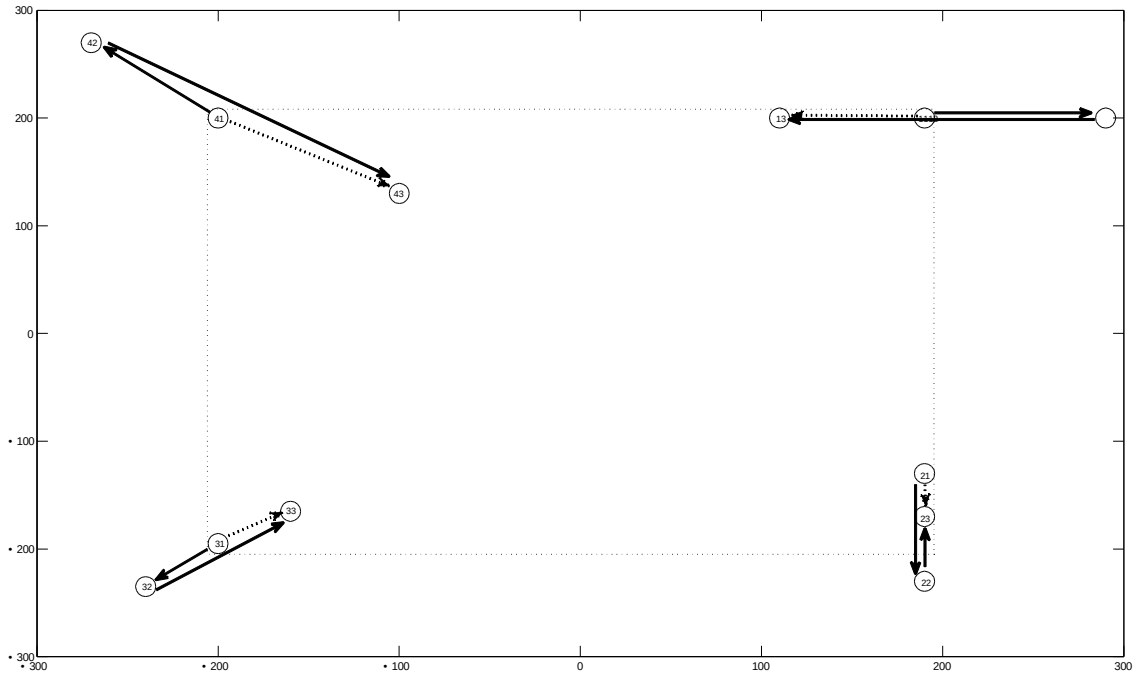
Düğümlerin belirlenen alan dışına çıkışını engellemek ancak düğümlerin akıllı bir şekilde hareket etmesi ile mümkündür. Düğümlerin akıllı bir biçimde hareket etmesi demek, alan sınırlarında ve gidecekleri yönde kaç metre dışarı çıkmaları gerekiyorsa, aynı mesafeyi alan dışının zıt istikametinde yani alan içine doğru hareket sergilemeleri demektir. Bu mantık çerçevesinde düğümler alan sınırlarına dayandıklarında, alanın dışına doğru olarak değil de içine doğru olarak hareket edeceklerdir. Bu hareket tarzı RWMM 'ye uygun düşmektedir.

Bu hareket biçimini daha açık olarak Şekil 3.4 ile ifade edebiliriz. Söz konusu şekilde 11 konumundaki sensör düğümü (190, 200) koordinatlarında iken hareketlilik nedeniyle 12 konumuna yani (290, 200) koordinatlarına gitmek istemektedir. Bu durumda söz konusu düğüm yatay ekseninde +100 metre hareket edecektir. Hareket neticesindeki 100 m'nin 90 m'si sınır ihlalidir. Fakat sensörlerin alan dışına çıkışları olmadığından dolayı söz konusu sensör 90 m dışarı çıktığı kadar yatay ekseninde 90 m içeri girecektir. Bunu da ancak mevcut istikametinin 180 derece tersi yönde hareket etmesi ile sağlayacaktır. Yani (110, 200) koordinatlarına sahip 13 konumuna hareket edecektir.

Benzer şekilde 21 konumundaki sensör düğümü (190, -130) koordinatlarında iken mobilite nedeniyle 22 konumuna yani (190, -230) koordinatlarına gitmek istemektedir. Bu durumda dikey eksenin 30 m geçilmesi söz konusudur. Fakat sensörlerin alan dışına çıkışları olmadığından dolayı sensörümüz dışarı çıktığı kadar, 30 m dikey ekseninde içeri girecektir. Yani (190, -170) koordinatlarına sahip 23 konumuna hareket edecektir. Söz konusu sensör -y yönünde bir hareket eğiliminde olduğu halde akıllı bir şekilde hareket ederek yönünü tam zıt istikamet olan +y 'e çevirmiş ve hareket etmiştir.

31 konumundaki sensör düğümü $(-200, -195)$ koordinatlarında iken mobilite nedeniyle 32 konumuna yani $(-240, -235)$ koordinatlarına gitmek istemektedir. Bu durumda hem yatay hem de dikey koordinatlarda sınır ihlali söz konusudur. Fakat sensörlerin alan dışına çıkışları olmadığından dolayı sensörümüz her iki yönde de dışarı çıktığı kadar içeri girecektir. Yani $(-160, -165)$ koordinatlarına sahip 33 konumuna hareket edecektir.

Son olarak 41 konumundaki sensör düğümü $(-200, 200)$ koordinatlarında iken mobilite nedeniyle 42 konumuna yani $(-270, 270)$ koordinatlarına gitmek istemektedir. Bu durumda hem yatay hem de dikey koordinatlarda sınır ihlali söz konusudur. Fakat sensörlerin alan dışına çıkışları olmadığından dolayı sensörümüz her iki yönde de dışarı çıktığı kadar içeri girecektir. Yani $(-100, 130)$ koordinatlarına sahip 43 konumuna hareket edecektir.

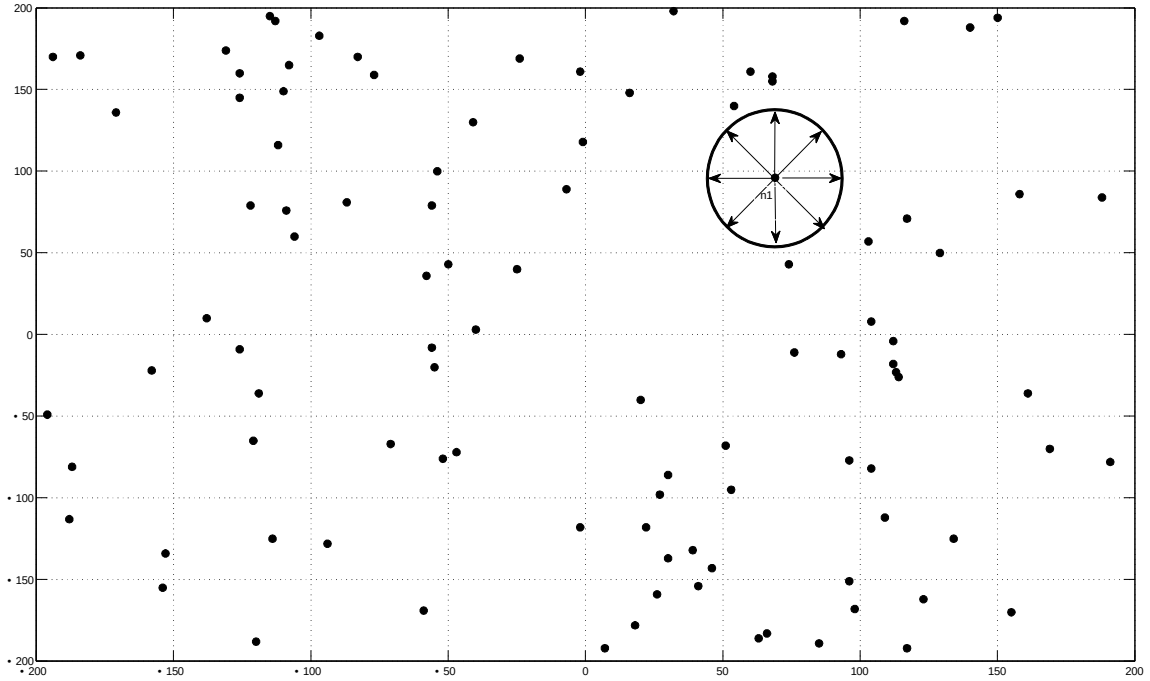


Şekil 3.4 Sensörlerin hareketlilik esnasında dışarı yerine içeriye yönelik hareketleri

3.5. Hareketlilik Esnasında Düğümlerin Yer Değiştirme Biçimi

Sensörlerin mevcut bulundukları konum anını L olarak ifade edersek; bir önceki konum anını $L-1$ ve bir sonraki konum anını ise $L+1$ ile ifade edebiliriz. L 'nin her anında sensörler hareket etmektedirler. Hareketlilik durumunda yani hareketlilik yarıçapının ($R_{max} > 0$) olması durumunda sensörler, bir önceki konumları olan $L-1$ anındaki

koordinatlarından belirlenen $R_{\max}$ yarıçapı içinde rastgele herhangi bir noktada bulunabileceklerdir. Sensörler ilk yerleştirildikleri merkez noktalarından belirlenen $R_{\max}$ yarıçapı içinde sağa (+x, 0), sola (-x, 0), yukarı (0, +y) ve aşağı (0, -y) gibi ana yönlerde hareket edebilecekleri gibi (+x, +y), (-x, -y), (+x, -y), (-x, +y) gibi ara yönlerde de hareket edebileceklerdir (Şekil 3.5).



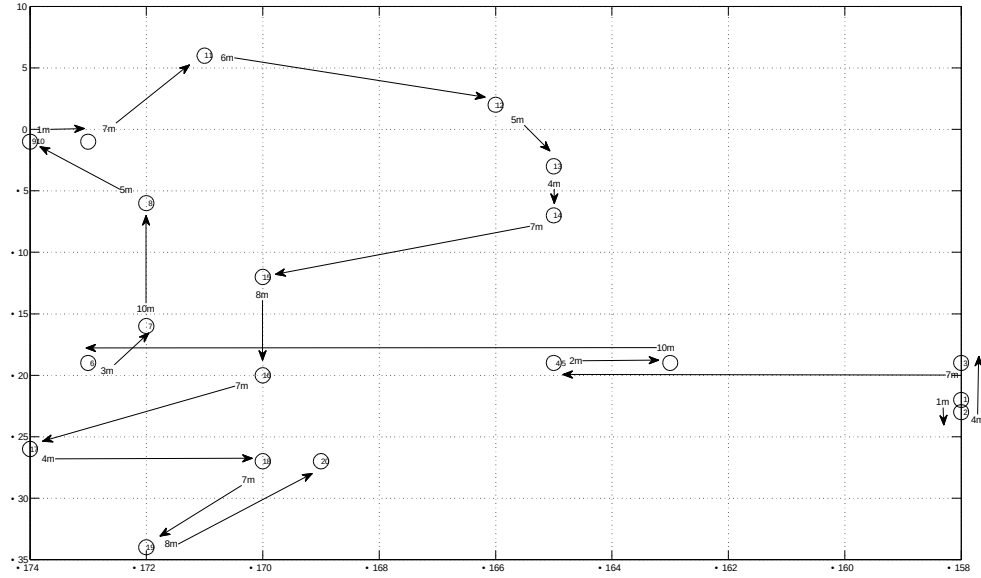
Şekil 3.5 Bir sensörün hareketlilik esnasındaki hareket yönleri

Örneğin başlangıçta $400 \times 400 \text{ m}^2$ bir alana yerleştirilen 100 adet sensörden birisi N_1 dir. N_1 sensörünün $R_{\max}=0$ durumunda (+100, +100) koordinatlarında olduğunu kabul edelim.

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi $R_{\max}=1 \text{ m}$ olduğu zaman N_1 sensörümüz 1 m'lik yarıçapı içinde sağa, sola, yukarı ve aşağı yönlerinde hareket edebileceği gibi ara yönlerde de hareket edebilmektedir. Bu durumda düğümlerin yön değiştirme aralığını $(0, 2\pi)$ olarak ifade edebiliriz [82, 99]. Yön açısının 0 olması mevcut yönünün bir önceki bulunduğu konum yönü ile aynı yönde olduğunu, 0'dan büyük olması durumunda ise yelkovanın tersi bir istikamette olduğunu göstermektedir.

Düğüm için hareketlilik modu aktif iken süreç içindeki her L anında bir önceki konumlarından ($L-1$ konumu) $R_{\max}$ yarıçapına bağlı olarak hareket ederler. Örneğin $R_{\max}=10$, $A_v=400 \times 400 \text{ m}^2$ ve $N_L=20$ anı için bir düğümün tüm L anları boyunca hareket ettiği noktalar Şekil 3.6'da olduğu gibi gözlenmiştir. Düğümümüz L_1 anında 1 konumundadır. L_2 anında 2 konumuna 0 açısıyla hareket eder. L_1 - L_2 anındaki yer

değiştirme sadece 1 metre olmuştur. Aynı düğüm L_2 'den L_3 'e 180 derecelik ve L_3 'ten L_4 'e ise 90 derecelik açı ile hareket eder.



Şekil 3.6 Rmax =10 için bir sensörün L1 - L20 anları arasında yer değiştirme biçimi

Tablo 3.3. L_1 - L_{20} anlarındaki hareketlilik değerleri ve L ile L+1 arasındaki mesafeler

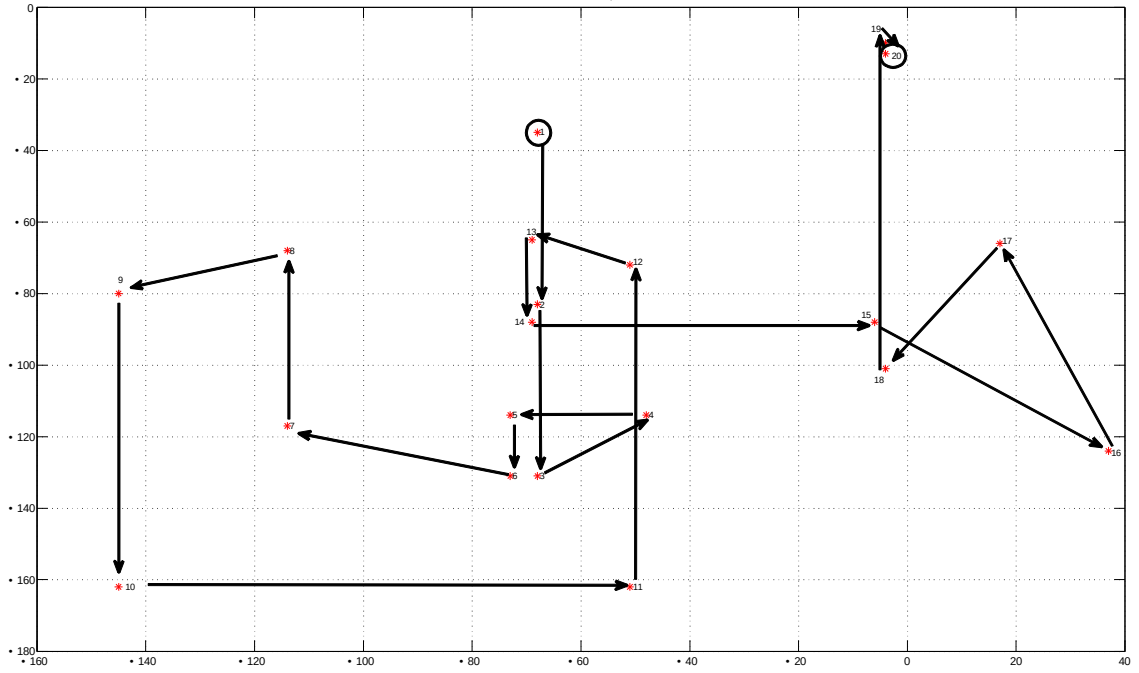
L_1 - L_{20}		x1	y1	x2	y2	d (N_i, N_j) m
L_1	L_2	-158	-22	-158	-23	1
L_2	L_3	-158	-23	-158	-19	4
L_3	L_4	-158	-19	-165	-19	7
L_4	L_5	-165	-19	-163	-19	2
L_5	L_6	-163	-19	-173	-19	10
L_6	L_7	-173	-19	-172	-16	3
L_7	L_8	-172	-16	-172	-6	10
L_8	L_9	-172	-6	-174	-1	5
L_9	L_{10}	-174	-1	-173	-1	1
L_{10}	L_{11}	-173	-1	-171	6	7
L_{11}	L_{12}	-171	6	-166	2	6
L_{12}	L_{13}	-166	2	-165	-3	5
L_{13}	L_{14}	-165	-3	-165	-7	4
L_{14}	L_{15}	-165	-7	-170	-12	7
L_{15}	L_{16}	-170	-12	-170	-20	8
L_{16}	L_{17}	-170	-20	-174	-26	7
L_{17}	L_{18}	-174	-26	-170	-27	4
L_{18}	L_{19}	-170	-27	-172	-34	7
L_{19}	L_{20}	-172	-34	-169	-27	8

Bu durumda L₂-L₃ anında yer değiştirme 4 m, L₃-L₄ anındaki yer değiştirme 7 m, L₄-L₅ anındaki yer değiştirme 2 m ve L₅-L₆ anındaki yer değiştirme 10 m olmuştur. Söz konusu düğümün L₁-L₂₀ hareketlilik değerleri Tablo 3.3'te ve alandaki görsel hareketi ise Şekil 3.6'da görüleceği gibi R_{max}=10 için yer değiştirme 0-10 m arasında herhangi bir değer olabilmektedir. Ve bu yer değiştirme bir önceki konuma göre gerçekleşmektedir.

Tablo 3.3' te verilen düğümler arasındaki mesafe bilgilerin hesaplanması için

$$|N_i N_j| = \sqrt{(N_{jx} - N_{ix})^2 + (N_{jy} - N_{iy})^2}$$

Söz konusu düğümün L anları boyunca hareketlilik alanına bakıldığında neredeyse mevcut alanın %30 'unu dolaştığı gözlenmektedir. Hareketlilik yarıçapı olan R_{max}=100 ve N_L=20 olarak alındığında aynı düğümün, 20 farklı konumu ile neredeyse alanın tamamını dolaştığı gözlemlenebilecektir. Bu durum Şekil 3.7'de açıkça gösterilmiştir.



Şekil 3.7 R_{max}=100 için bir sensörün L1 - L20 anları arasında yer değiştirme biçimi

3.6. Kaynak – Hedef Arasında Veri İletim Biçimi

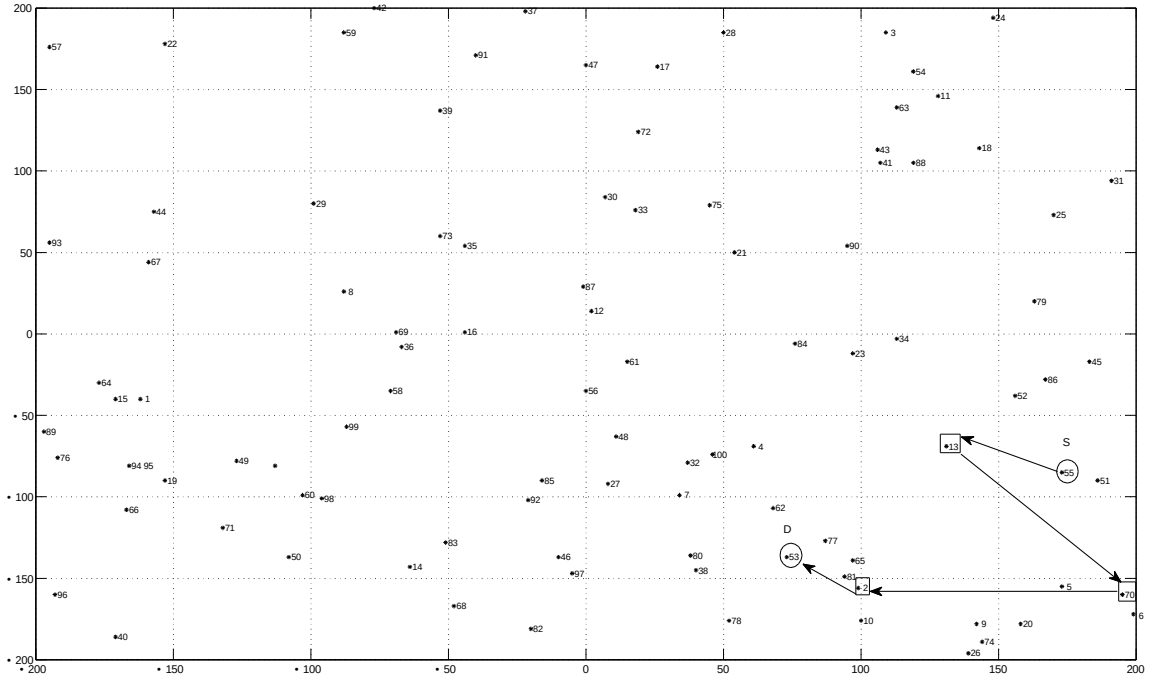
Her L anı için farklı Kaynak (S) - Hedef (D) çifti seçilerek kaynaktan hedefe 100 bitlik veri transfer edilmektedir. Veri transferi esnasında aradaki birçok düğüm görev almaktadır. Düğümlerin en az enerji ile verileri transfer etmek için seçtiği aradaki düğümler (relay) tamamen model tarafından seçilmektedir. Optimizasyon çerçevesinde

gerçekleşen bu olayda en az enerji ile verilerin kaynaktan hedefe transfer edilme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Hareketliliğin olmadığı durumda her L anı için farklı S-D çifti seçilerek $N_L=L$ olana kadar N_L adedince 100 bitlik veri kaynak düğümden hedef düğüme transfer edilmektedir. Hareketlilik durumunda ise her L anı için farklı S-D çifti seçilmekle beraber hareketlilik yarıçapı olan R_{max} 'ın aldığı değere göre de düğümler konum değiştirmektedirler.

3.7. Statik Durumun L_1 Anında Veri Akış Biçimi

Simülasyon çalıştırıldıktan sonra mobilite yarıçapı ($R_{max}=0$), sensör sayısı ($N_v=100$) ve sensör alanı ($A_v=400$ m x 400 m) gibi başlangıç parametreleri kullanılarak L_1 anında rastgele kaynak-hedef çifti için Şekil 3.8'de gösterildiği gibi sırasıyla S_{55} ve D_{53} numaralı düğümler model tarafından seçilmişlerdir. S_{55} düğümü kaynak düğüm olarak (3.5) denkleminde uygun olarak çalışmaktadır. S düğümü (S_{55}) 100 bitlik verinin tamamını 70 ve 2 numaralı düğümler üzerinden 13 numaralı düğüme göndermiştir. 13 numaralı düğüm aradaki düğüm (relay) düğüm olarak çalışmakta ve kendisine gönderilen verinin tamamını 70 numaralı düğüme iletmektedir. 70 numaralı düğüm yine relay düğüm olarak çalışmakta ve aldığı verinin tamamını 2 numaralı düğüme aktarmaktadır.

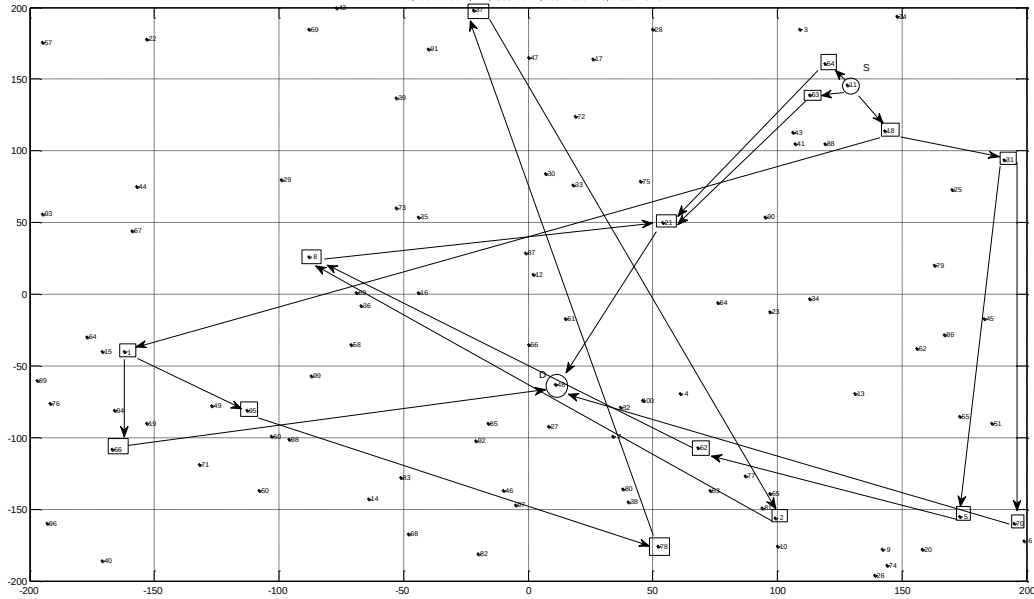


Şekil 3.8 S_{55} - D_{53} düğümleri arasında veri akış şeması

Aradaki düğüm olarak çalışan 2 numaralı düğüm ise aldığı tüm veriyi hedef düğüm olan D₅₃ numaralı düğüme iletmıştır. Aradaki düğümler (3.4) denklemine uygun olarak çalışmakta ve aldıkları veriyi aynen transfer etmektedirler. Kaynak düğümler ise (3.5) denklemine uygun olarak çalışmaktadır. Bu durumun gerçekleştiği grafik Şekil 3.8’de verilmiştir. Aynı şekilde S-D çiftleri dikdörtgen içinde, aradaki düğümler ise çember içinde gösterilmiştir.

3.8. Statik Durumun L₂ Anında Veri Akış Biçimi

$R_{\max}=0$, $N_v=100$, $A_v=400$ m x 400 m ve L₂ anında rastgele S-D çifti Şekil 3.9’da gösterildiği gibi S₁₁ ve D₄₈ numaralı düğümler seçilmişlerdir. Kaynak (S₁₁) ve hedef (D₄₈) arasında 100 bitlik verinin transfer işlemi bir önceki duruma göre daha karmaşık bir biçimde gerçekleşmiştir. Birçok noktada veri bölünmek suretiyle farklı düğümler üzerinde hedefe yönlendirilmiştir. Yönlendirmenin nasıl gerçekleştiğine dair grafik ve yönlendirme biçimi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

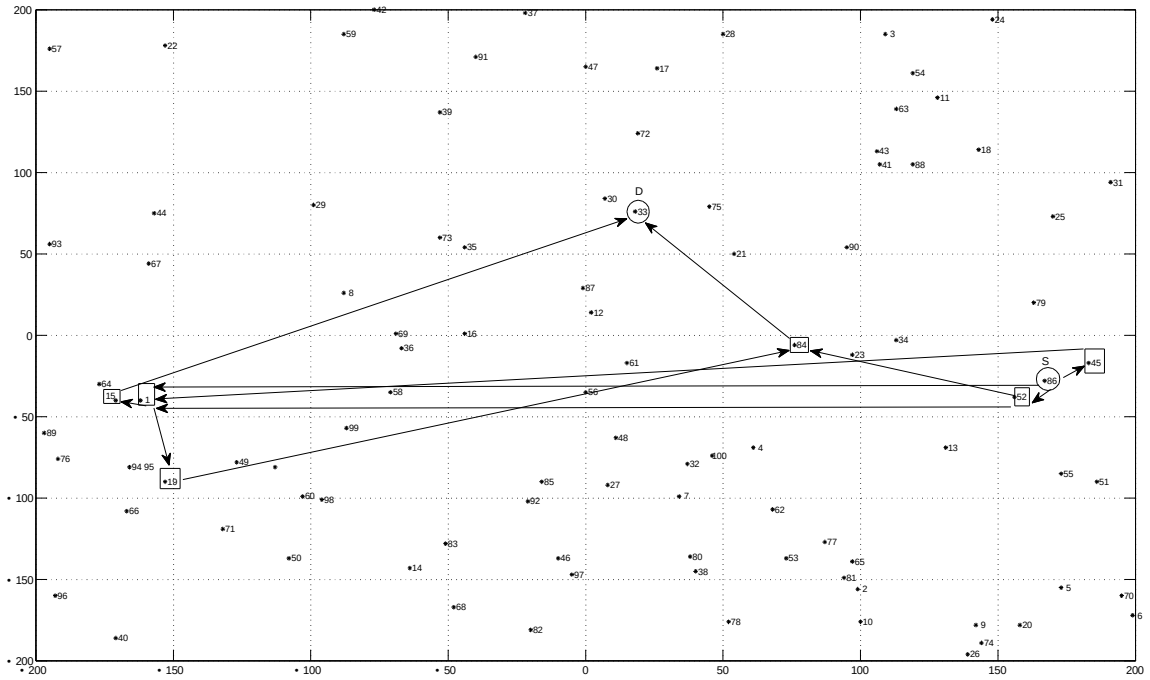


Şekil 3.9 S₁₁ - D₄₈ düğümleri arasında veri akış şeması

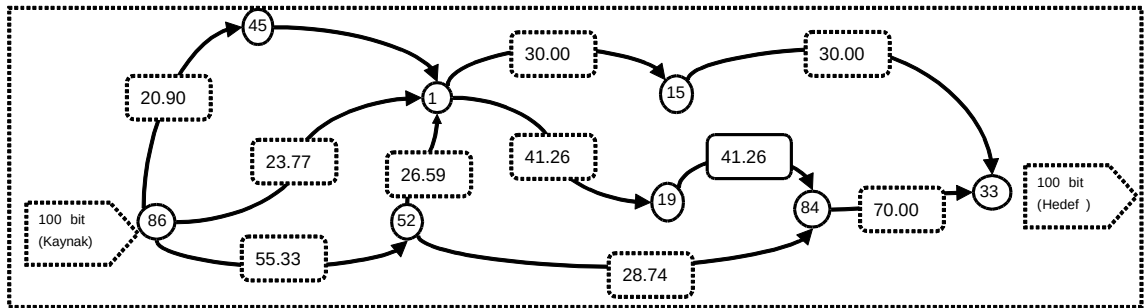
3.9. Statik Durumun L₄ Anındaki Veri Akış Biçimi

$R_{\max}=0$, $N_v=100$, $A_v=400$ m x 400 m ve L₄ anında rastgele S-D çifti S₈₆ ve D₃₃ numaralı düğümler seçilmişlerdir. Verilerin kaynaktan hedefe nasıl yönlendirildiği Şekil 3.10’da gösterilmiştir.

Ayrıca kaynak düğümün (S_{86}) 100 bitlik veriyi hedef düğüme (D_{33}) iletirken modelin kullandığı veri akış şeması Şekil 3.11’ de verilmiştir. Veri akış şemasında görüldüğü gibi 100 bitlik verinin bir kısmı (20.90 bit) N_{45} üzerinden, bir kısmı (55.33 bit) N_{52} üzerinden bir kısmı (23.77 bit) N_1 üzerinden gönderilmeye çalışılmıştır. N_1 düğümü üç farklı düğümünden aldığı verileri ($20.90 + 23.77 + 26.59=71.26$ bit) iki parça halinde ($30.00 + 41.26=71.26$) sonraki düğümlere göndermiştir. Neticede aradaki düğüm olarak çalışan bir düğüm aldığı veri kadar, veriyi aynen göndermiştir.



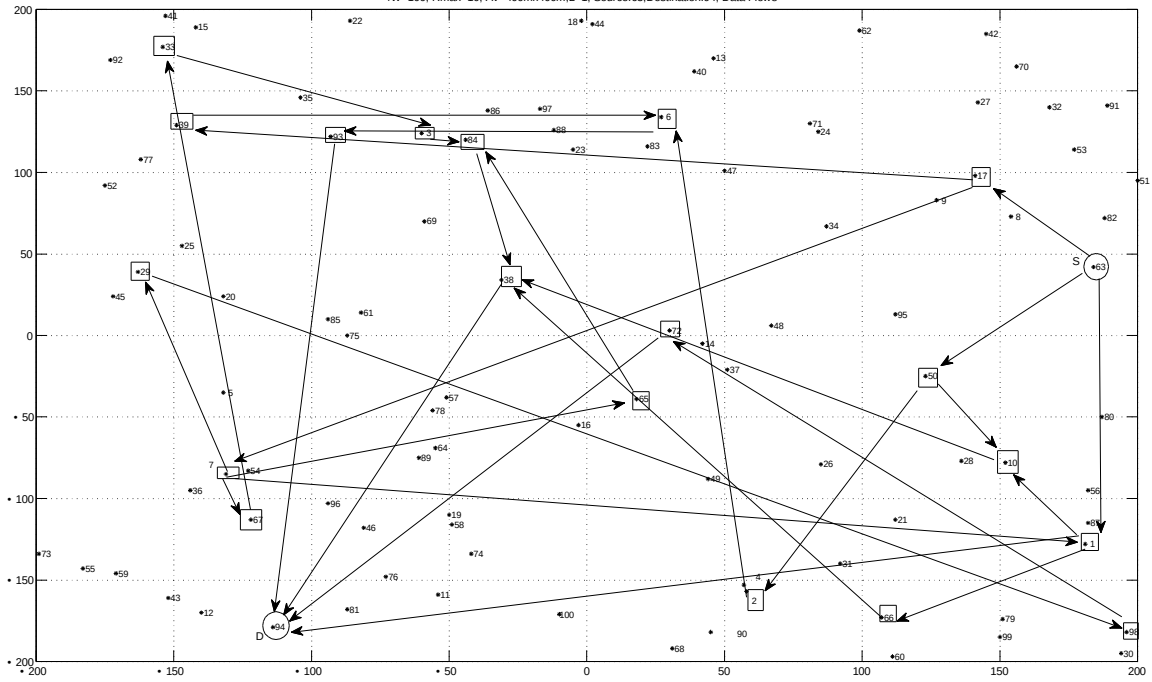
Şekil 3.10 S_{86} - D_{33} düğümleri arasında veri akış şeması



Şekil 3.11 S_{86} - D_{33} düğümleri arasında veri akış şeması

3.10. Hareketlilik Durumunun L_1 Anındaki Veri Akış Biçimi

$R_{\max}=10$, $N_v=100$, $A_v=400$ m x 400 m ve L_1 anında rastgele S-D çifti S_{63} ve D_{94} numaralı düğümler seçilmişlerdir. Verilerin kaynaktan hedefe nasıl yönlendirildiği Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Optimizasyon süresince farklı anlarda veri iletmek için kullanılan düğüm sayısı değişebilmektedir. Kimi anlarda düğüm sayısı daha az kimisinde ise daha fazla olabilmektedir.

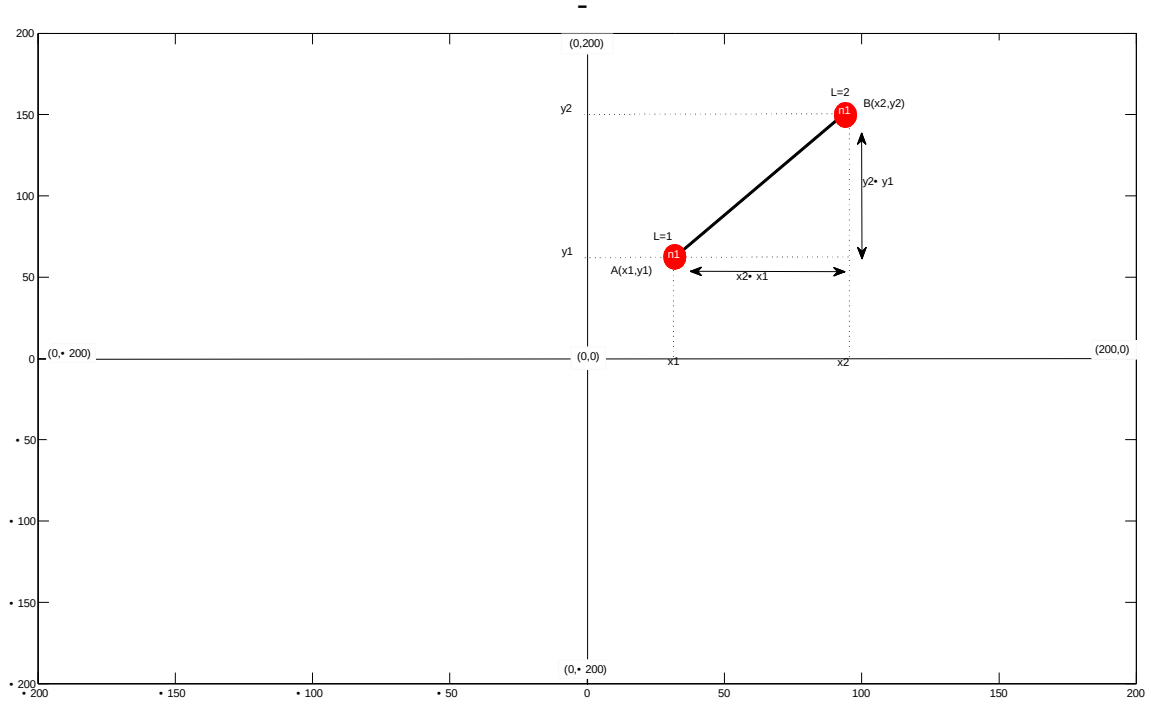


Şekil 3.12 S_{63} - D_{94} düğümleri arasında veri akış şeması

3.11. Sensör Düğümleri Arasındaki Mesafeler

Her bir sensör düğümünün alandaki konumu (x, y) koordinat noktaları ile belirlenmektedir. Alanda yer alan her bir düğüm (x, y) koordinat bilgisine sahiptir. Düğümler alana yerleştirildikten sonra öncelikle düğümlerin bulunduğu konum bilgileri model için hazırlanır. Bir düğümden diğerine bilgi paketi gönderilirken aradaki mesafe büyük önem arz ettiğinden dolayı başlangıçta bu mesafe bilgileri de simülasyonun her anı için hesaplanıp bellekte tutulmaktadır. Bu vesileyle bir düğümün diğer tüm düğümler ile olan uzaklık bilgileri tablodan kolayca model tarafından alınabilmektedir. İki düğüm arasındaki mesafeyi hesaplamak için analitik düzlemi kullanırız. Analitik düzlem bu amaçla büyük kolaylıklar sağlar. Örneğin N_1 düğümünün L_1 anında A noktasında ve L_2

anında B noktasında olduğunu varsayarsak düğümümüzün yer değiştirmesi $|AB|$ arasındaki mesafe (3.9) kadar olacaktır. Analitik düzlemde iki nokta arasındaki mesafeyi hesaplamak için Öklid mesafesinden [114] faydalanırız (Şekil 3.13) . Benzer şekilde bir düğümün L_2 ve L_3 anlarında bulunduğu konumlar arasındaki uzaklığı da aynı teoremlerle hesaplarız. İki konum arasında bulunan mesafe metre olarak ölçülmektedir.



Şekil 3.13 İki düğümün koordinat bilgileri kullanılarak aralarındaki uzaklığın analitik düzlemde gösterimi

$$|AB| = \sqrt{(X2 - X1)^2 + (Y2 - Y1)^2} \quad (3.9)$$

Modelde bir düğümün L anında bulunduğu mevcut konumu ile $L-1$ anındaki önceki konumu arasındaki mesafeler ve aynı düğümün diğer düğümler arasındaki mesafeler her L anı için hesaplanmaktadır.

Biz GAMS'ta her L anı için bir düğümün diğer tüm düğümler ile arasındaki mesafeyi (3.10) daki gibi hesaplıyoruz.

$$d(i,j,L) = \text{sqr}(\text{sqr}(x(i,L)-x(j,L))+\text{sqr}(y(i,L)-y(j,L))) \quad (3.10)$$

3.12. İki Düğüm Arasında Bir Bitin Gönderilmesi İçin Harcanan Enerji Hesabı

Düğümler kendi etraflarında her yöne veri iletimi yapabilirler. Modelde algılama için harcanan enerji, iletişim için harcanan enerjiye göre çok daha küçük olduğundan dolayı ihmal edilmiştir [88]. Bu modelde düğümler sadece veri alma veya gönderme esnasında enerji harcarlar. Veriyi gönderen düğüm için verinin iletileceği düğüme olan mesafesi önemlidir. Mesafe arttıkça harcanan enerji değeri de buna bağlı ve üstel olarak artacaktır. Veriyi alan düğüm için mesafenin bir önemi yoktur. Bit başına standart bir enerji tüketimi söz konusudur. Optimizasyonun her L anı için kaynak-hedef düğüm çiftleri sürekli değişmektedir. Bunlara bağlı olarak arada veri iletiminde görev yapacak olan düğümler de değişmektedir. Bu yapıya bağlı olarak tüketilen enerji değeri de sürekli farklı olmaktadır. Hareketlilik ile değişen ağ yapısındaki düğümlerin konumlarına bağlı olarak her bir düğüm için gerekli olan pil enerjisi de sürekli olarak farklı olacaktır.

Her L anı için iki düğüm arasında bir bitin gönderilmesi için harcanan enerji (3.1) ve veriyi alan düğüm için harcanan enerji ise (3.2) denklemindeki gibi hesaplanıyor.

GAMS programlama ortamında her L anı için bir bitin gönderilmesi için gereken enerjiyi (3.11) deki gibi hesapladık.

$$P_{tx}(i,j,L) = \rho + \varepsilon * \text{sqr}(d(i,j,L)); \quad (3.11)$$

Hesaplama yapılırken özellikle kaynak ve hedef düğümlerinin farklı olmasına dikkat edilir.

4. ANALİZ SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Analiz sonuçları, Şekil 3.1' de verilen matematiksel modelin GAMS [112] ile çözdürülmesi neticesinde elde edilmiştir. Analizlerde iki boyutlu (2-D) kare topolojisi kullanılmıştır. Kare topolojisinde düğümler alana rastgele yerleştirilmektedir.

4.1. Analizler İçin Kullanılan Modelin Genel Kuralları

Simülasyonda, hareketlilik olmaksızın statik durumda ($R_{\max}=0$);

- Sensörler rastgele alana yerleştirilmektedir.
- Her L anı için S-D çifti rastgele değişmektedir.
- Her L anı için sensörlerin konumları sabittir.
- Başlangıçta her bir sensörün diğer sensörlere olan uzaklığı hesaplanmaktadır. Bu aşamada hareketlilik olmadığından dolayı tüm L anları boyunca söz konusu mesafeler sabittir.
- Her L anı için gönderilecek veri paketi miktarları sabittir ve 100 bittir.
- Her L anı için kaynak ve hedef arasında gönderilecek 100 bitlik veri için veri yönlendirme tablosu optimizasyon çerçevesinde yeniden belirlenir.
- N_L an sayısına ulaşıncaya kadar tüm L anları için tek bir enerji değeri optimizasyon probleminin çözümü neticesinde bulunur.
- Bulunan bu enerji herhangi bir L anında, en fazla enerji harcayan düğümün enerjisidir.

Simülasyonda, hareketlilik esnasında yani $R_{\max}$ yarıçapı her değiştiğinde;

- Her L anı için S-D çifti rastgele değişmektedir.
- Her L anı için sensörlerin yerleşim alanı içindeki konumları en fazla belirlenen yarıçap kadar değişmektedir.
- Her L anı için her bir sensörün diğer sensörlere olan uzaklığı yeniden hesaplanmaktadır.
- Her L anı için gönderilecek veri paketi miktarları sabittir ve 100 bittir.
- Her L anı için kaynak ve hedef arasında gönderilecek 100 bitlik veri için veri yönlendirme tablosu optimizasyon çerçevesinde yeniden belirlenir.

- N_L an sayısına ulaşıncaya kadar tüm L anları için tek bir enerji değeri optimizasyon probleminin çözümü neticesinde bulunur. Bulunan bu enerji herhangi bir L anında, en fazla enerji harcayan düğümün enerjisidir.

4.2. Analiz Sonuçlarının Bulunması ve Test Edilmesi

Matematiksel olarak gerçekleştirilen modelin GAMS [112] ortamında doğru olarak kodlandığını, doğru olarak çalıştığını ve üretilen sayısal sonuçların doğruluğunu tespit etmek için çok sayıda test yapıldı. Öncelikle hareketlilik olmaksızın düğümlerin alan içerisindeki dağılımları, her defasında kaynak (S) ve hedef (D) çiftinin her L anı için farklı seçilme durumu, S-D çifti arasındaki gönderilecek verilerin doğru akışı, aradaki düğümlerin çalışma biçimleri üretilen enerji değerlerinin doğruluğu, düğümler arasındaki mesafelerin doğru hesaplama biçimleri defalarca test edildi. Test yapılırken başlangıç parametreleri küçük tutularak üretilen sonuçların kararlılığı daha kolay doğrulandı. Başlangıçta çalıştırma parametrelerinin küçük tutulması test sonuçlarının analiz edilmesini kolaylaştırmıştır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Simülasyon sonuçlarını test etmek için kullanılan parametreler

Modelin çalışma sayısı	10
N_L	1
A_v	400 m x 400 m
N_v	3
R_{max}	0 m (Statik durum)
Topoloji	Rastgele
P	50 nJ
E	100 pJ
A	2

Simülasyonun ürettiği sonuçların doğruluğunu test etmek için düğüm sayısı 3 ($N_v=3$) olarak belirlendi. Simülasyon; hareketlilik olmaksızın ($R_{max}=0$ m) belli bir alanda ($A_v=400 \times 400$ m²) ve bir an sayısı ($N_L=1$) için çalıştırıldı. Düğüm sayısı 3 olduğundan dolayı bunlardan rastgele birisi kaynak düğüm yani 100 bit üretecek düğüm (S), bir diğeri ise yine rastgele hedef düğüm (D) olarak seçilecektir. Kalan bir tek düğüm ise aradaki düğüm (R) olarak görev yapacaktır.

Simülasyon çalıştırdıktan sonra düğümler belirlenen alana rastgele yerleştiriliyorlar. N_1 kaynak düğüm (S) ve N_3 hedef düğüm (D) olarak rastgele seçiliyor. Geriye kalan N_2 düğümü ise aradaki düğüm (R) olarak görev yapmaktadır. Kaynak düğüm olan N_1

düğümü tarafından 100 bitlik veri üretilerek N_2 düğümü üzerinden N_3 düğümüne gönderilmektedir. Alan içindeki düğümlerin konumları Tablo 4.2’ te belirtilen koordinat noktaları ile temsil edilmektedir.

Tablo 4.2. Üç düğümün L1 anında alandaki yerleşim koordinat bilgileri

Düğüm	An (L)	X(i,L)	Y(i,L)
N_1	1	83	-37
N_2	1	-21	-7
N_3	1	-160	177

Simülasyon tamamlandıktan sonra kaynak olan N_1 düğümü ürettiği 100 bitin, 71.5144 bitini N_2 düğümü üzerinden N_3 düğümüne, geriye kalan 28.4856 bitin tamamını ise direkt hedef olan N_3 düğümüne göndermektedir. Aradaki düğüm olan N_2 düğümü ise N_1 düğümünden aldığı verinin tamamını (71.5144 bit) hedef düğüme göndermektedir.

Tablo 4.3’te gösterildiği gibi simülasyon; N_1 düğümünden 108.2405 m uzaklıktaki N_2 düğümüne bir bit göndermek için harcadığı enerjiyi 1.2216 μJ , N_1 düğümünden 323.7978 m uzaklıktaki N_3 düğümüne bir bit göndermek için harcadığı enerjiyi 10.5345 μJ , N_2 düğümünden 230.6014 m uzaklıktaki N_3 düğümüne bir bit göndermek için harcadığı enerjiyi 5.3677 μJ olarak hesaplamaktadır (Şekil 4.1).

Bir bit göndermek için (3.1) deki denklem ile hesaplanan enerji eşdeğerini, Excel hesaplama programını [113] kullanarak ta bulduk. Örneğin N_1 düğümünün 108.2405 m mesafede N_2 düğümüne bir bitin gönderilmesi için harcadığı enerjiyi Excel ile $(=0.05+100*10^{-6}*(108.2405)^2 \rightarrow 1.2216$ olarak) aynı şekilde bulduk.

Tablo 4.3. Üç düğümün L1 anındaki veri gönderim enerjisi, harcanan gönderim enerjisi ve mesafe bilgileri

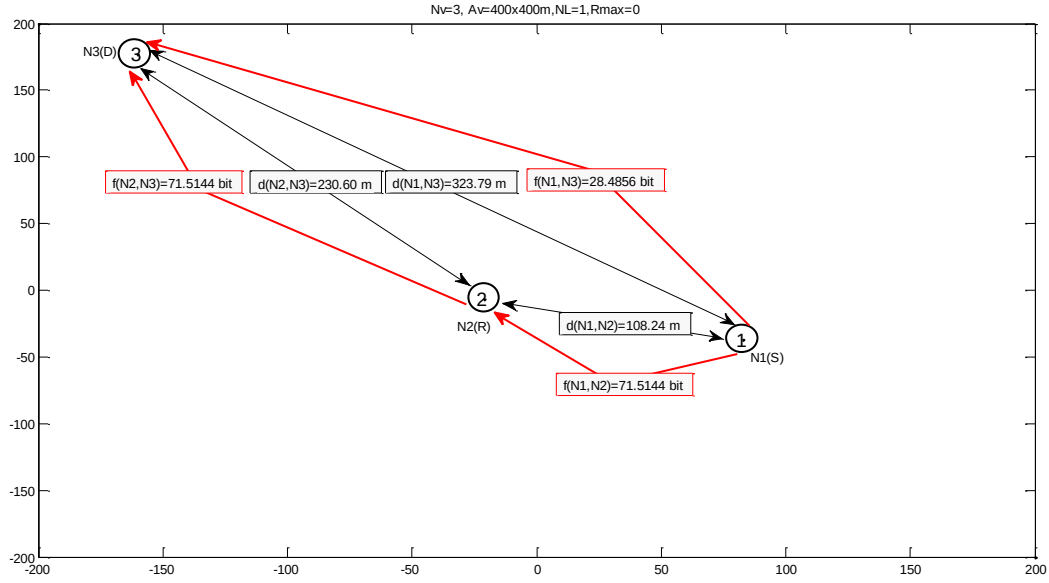
i	j	L	f(i,j,L) Bit	$P_{tx}(i,j,L)$ μJ	d(i,j,L) m
N_1	N_2	1	71.5144	1.2216	108.2405
N_1	N_3	1	28.4856	10.5345	323.7978
N_2	N_3	1	71.5144	5.3677	230.6014

Simülasyonun üç düğüm için bulduğu mesafe bilgilerini Excel ortamında doğruluğunu test etmek için (3.9) denklemini kullandık.

İki düğüm arasındaki mesafeyi metre olarak hesaplayan (4.1) denklemini gerçekleştirmek için Excel’de KAREKÖK (4.1) formülünü kullandık.

$$=KAREKÖK((C2-E2)^2+(D2-F2)^2). \quad (4.1)$$

Bu hesaplama neticesinde simülasyonun bulduğu ve Tablo 4.3'te verilen düğümler arasındaki mesafe bilgileri ile Excel'de hesaplanan mesafe bilgilerinin eşit olduğu görüldü (Şekil 4.2).



Şekil 4.1 Düğümlerin alandaki yerleşimleri, aralarındaki mesafeler ve gönderilen veri miktarları

G2		fx =KAREKÖK((C2-E2)^2+(D2-F2)^2)					
	A	B	C	D	E	F	G
1	Nod-i	Nod-j	X1	Y1	X2	Y2	d(Nod-i,Nod-j) m
2	N1	N2	83	-37	-21	-7	108.2405
3	N1	N3	83	-37	-160	177	323.7978
4	N2	N3	-21	-7	-160	177	230.6014

Şekil 4.2 Düğümlerin koordinat bilgileri kullanılarak aralarındaki mesafelerin hesaplanması

Üç düğümlü bir simülasyonun çalıştırılması neticesinde en fazla enerji harcayan düğüm enerjisi 387.44 μ J olarak bulundu. Düğümler arasında mesafelere bağlı olarak değişen bit başına enerji değerleri (alım ve gönderim enerjileri) Tablo 4.4' te gösterilmiştir. Bu durumda N_1 düğümü kendisine 108.2405 m uzaklıktaki N_2 düğümüne bir bit göndermek için 1.2216 μ J gönderim enerjisi ($P_{tx,N1N2}$) ve aynı mesafe üzerinde 71.5144 bit göndermek için de 87.3620 μ J gönderim enerjisi ($P_{tx,N1N2}$) harcamaktadır. Aynı mesafe

üzerinde N_2 düğümünün N_1 düğümünden 71.5144 biti alması için de harcadığı alım enerjisi ($P_{rx,N2N1}$) 3.5757 μJ olmaktadır.

Tablo 4.4. Düğümlerin aralarındaki mesafelere bağlı olarak harcanan enerjiler

i	j	f(i,j)	Ptx(i,j)/bit	Toplam Ptx(i,j) μJ	Toplam Prx(i,j) μJ
N_1	N_2	71.5144	1.2216	87.3620	3.5757
N_1	N_3	28.4856	10.5345	300.0816	1.4243
N_2	N_3	71.5144	5.3677	383.8678	3.5757

Simülasyonun bulduğu düğümler arasında veri transfer için harcanan enerji değerlerini Excel ortamında gruplandırarak her düğümün gönderim ve alım enerjilerini hesapladık. Tablo 4.5’de verildiği gibi N_1 düğümü kaynak düğüm olduğundan dolayı sadece veri göndermiştir. Dolayısıyla sadece 100 bitlik veri göndermek için harcadığı gönderim enerjisi 387.44 μJ . Aradaki düğüm olan N_2 düğümü 71.5144 bit veri almak için 3.58 μJ ve aynı veriyi göndermek için de 383.87 μJ enerji harcamıştır. Simülasyon boyunca harcadığı toplam enerji 387.44 μJ dür. N_3 düğümü hedef düğüm yani sadece veri alan ve hiçbir yere göndermeyen düğüm dur. Aynı düğümün N_1 ve N_2 düğümlerinden sırasıyla 28.4856 bit ve 71.5144 bit veri alımına karşın harcadığı toplam enerji 5.00 μJ .

Bit alım enerjisi sabittir ve mesafeden bağımsızdır. Bunun için simülasyonda kullanılan 50×10^{-3} μJ değeri 100 bit ile çarpıldığında 5.00 değeri elde edilmektedir. Bu değer simülasyonun bulduğu değer ile aynıdır.

Ayrıca simülasyonun bulduğu en fazla enerji harcayan düğümün enerjisi ile bizim ikinci bir hesaplama ile bulduğumuz enerjiler aynı çıkmaktadır. Bu enerji N_1 ve N_2 düğümlerinin harcadıkları enerji ile eşdeğerdir. Simülasyon neticesinde hem pil enerjisi optimum hale getirilmiş hem de gönderilecek veriler dengeli olarak iki düğüm üzerinden hedefe gönderilme şekli tercih edilmiştir. Böylece ağ ömrünün en iyi olmasına çalışılmıştır.

Tablo 4.5. Simülasyon boyunca düğümlerin harcadıkları gönderim ve alım enerji toplamaları

Düğüm	İletim Enerjisi μJ	Alım Enerjisi μJ	Toplam Enerji /Düğüm μJ
N_1	387.44	0	387.44
N_2	383.87	3.58	387.44
N_3	0	5.00	5.00

4.3. Analiz Sonuçlarının Sayısal Olarak Elde Edilmesi

Modelin çalıştırılması dışarıdan girilen parametrelere bağlı olarak adım adım gerçekleştirildi.

Modelde her defasında N_L an sayısı, düğüm sayısı (N_V) ve düğüm alanının büyüklüğü (A_V) gibi parametreler değiştirilerek birden fazla durum için sonuçlar elde edildi.

Modelde önce düğüm sayısı ve alan sabit tutularak an sayısı değiştirildi. Bunun için $N_L=10$ ve R_{max} hareketlilik yarıçapının her bir değeri için simülasyon 200 kere çalıştırıldı ve her bir R_{max} değeri için simülasyonun çözüm olarak bulduğu 200 tane enerji değeri elde edildi.

- 1- Birinci adımda $A_V=400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, $N_V=100$ değerleri sabit tutulup $N_L=10$ ve $R_{max}=0$ alındı. $R_{max}=0$ olması bir simülasyonun tüm L anları boyunca ağ yapısının ilk yerleşimde olduğu gibi olması, değişmemesi demektir. Statik durum için simülasyon 200 kere çalıştırıldı. Bunun neticesinde 200 tane farklı enerji değeri elde edildi. Enerji değerlerinin farklı olmasının sebebi başlangıçta $N_L=10$ olarak alınan an değerinin modelde sırasıyla $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9$ ve L_{10} değerlerini alması ve buna bağlı olarak her L anı için S-D çiftinin değişmesi ve veri akışında görev alacak düğümlerin her L için farklı mesafelerde ve farklı olmasından kaynaklanmaktadır. $N_L=10$, $A_V=400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, $N_V=100$ ve $R_{max}=0$ için üretilen 200 tane enerji değeri Excel ortamına aktarıldı.
- 2- Simülasyonun ikinci adımında işin içerisine hareketlilik dâhil edildi. Yani $R_{max}=10$ yapıldı. R_{max} değerinin 10 olarak alınması, bir düğümün simülasyonun tüm L anları boyunca bulunduğu konumdan $L+1$ anı için en fazla 10 m ve $(0, 2*\pi)$ yön aralığında hareket etmesi demektir. $N_L=10$, $A_V=400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, $N_V=100$ ve $R_{max}=10$ için simülasyon 200 kere çalıştırıldı ve elde edilen 200 enerji değeri Excel ortamına aktarıldı.
- 3- Üçüncü adımda hareketlilik yarıçapı olan R_{max} bir önceki duruma göre 10 m daha artırılarak 20 m yapıldı. Başlangıç parametreleri olan $N_L=10$, $A_V=400 \times 400 \text{ m}^2$, $N_V=100$ ve $R_{max}=20$ için simülasyon 200 kere çalıştırıldı ve elde edilen 200 sonuç Excel ortamına aktarıldı.
- 4- Dördüncü adımda hareketlilik yarıçapı 10 m daha artırılarak 30 yapıldı. Başlangıç parametreleri olan $N_L=10$, $A_V=400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, $N_V=100$ ve $R_{max}=20$ için simülasyon 200 kere çalıştırıldı ve elde edilen 200 sonuç Excel ortamına aktarıldı.

- 5- Beşinci ve sonraki adımlarda hareketlilik yarıçapı olan R_{max} değeri 10'ar metre artırılarak 150 m 'ye kadar çıkartıldı. Her defasında simülasyon 200 kere çalıştırıldı ve 200 tane enerji değeri elde edildi. Elde edilen değerler Excel ortamına aktarıldı.

4.4. Normalize Değerlerin Elde Edilmesi

Yukarıda da belirtildiği gibi $R_{max}=0$ için yani statik durumda 200 tane enerji değeri üretildi. R_{max} değeri sürekli 10 m artırılarak 0-150 m aralığı için hareketlilik durumundaki enerji değerleri elde edildi. Her bir hareketlilik yarıçapı değişiminde simülasyon 200 kere çalıştırıldı ve 200 tane enerji değeri elde edildi. Her bir R_{max} değeri için elde edilen sonuçların ortalaması alınarak **R_{max} - Normal enerji** değerlerine ait tablo elde edildi (Tablo 4.6-a).

Her bir R_{max} değeri için elde edilen normal enerji değerlerinin tamamı $R_{max}=0$ için elde edilen enerji değerlerine sırasıyla bölünerek yeni sonuçlar elde edildi. $R_{max}>0$ 'daki her enerji değeri için bulunan yeni sonuçların ortalaması alınarak **R_{max} -Normalize Enerji** değerler tablosu elde edildi (Tablo 4.6-b).

Tablo 4.6. $N_L=10$, $A_v=400$ m x 400 m, $N_v=100$ ve $R_{max}=0-150$ m için normal enerji değerleri (a) ve normalize edilen enerji değerleri (b)

Tablo 4.6. a

R_{max} (m)	Normal Enerji Değerleri (Mikrojoule)
0	32.02285
10	29.44835
20	29.32345
30	29.26645
40	29.2484
50	28.9308
60	28.78145
70	28.7742
80	28.3819
90	28.3237
100	28.1522
110	27.94825
120	27.7645
130	27.52505
140	27.50155
150	27.3207

Tablo 4.6. b

R_{max} (m)	Normalize Enerji Değerleri
0	1
10	0.99136083
20	0.985278599
30	0.980494918
40	0.976651883
50	0.972344361
60	0.967369872
70	0.961658919
80	0.956327395
90	0.947865004
100	0.941796368
110	0.939081846
120	0.93327426
130	0.924652136
140	0.918014498
150	0.912201136

Tablo 4.6’da elde edilen normalize ve normal sonuçlara ait MATLAB [29]’ta çizdirilen grafikler sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Yukarıda an sayısı (N_L)=10 için yapılan işlemler neticesinde elde edilen değerlerin üretilme biçimi $N_L=20$ ve $N_L=40$ için de ayrı ayrı kullanılarak söz konusu N_L değerlerine ait sayısal sonuçlar elde edildi ve Excel ortamına aktarıldı. Farklı N_L değerlerine ait ve her R_{max} değerinin değişiminde simülasyonun 200’er kere çalıştırılması sonucu elde edilen sayısal değerlere ait grafik Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Söz konusu grafikte yatayda hareketlilik yarıçapına ait değerler yer alırken, dikeyde ise normalize enerji değerleri yer almıştır. Bu durumda normalize enerji değerleri hareketliliğin bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

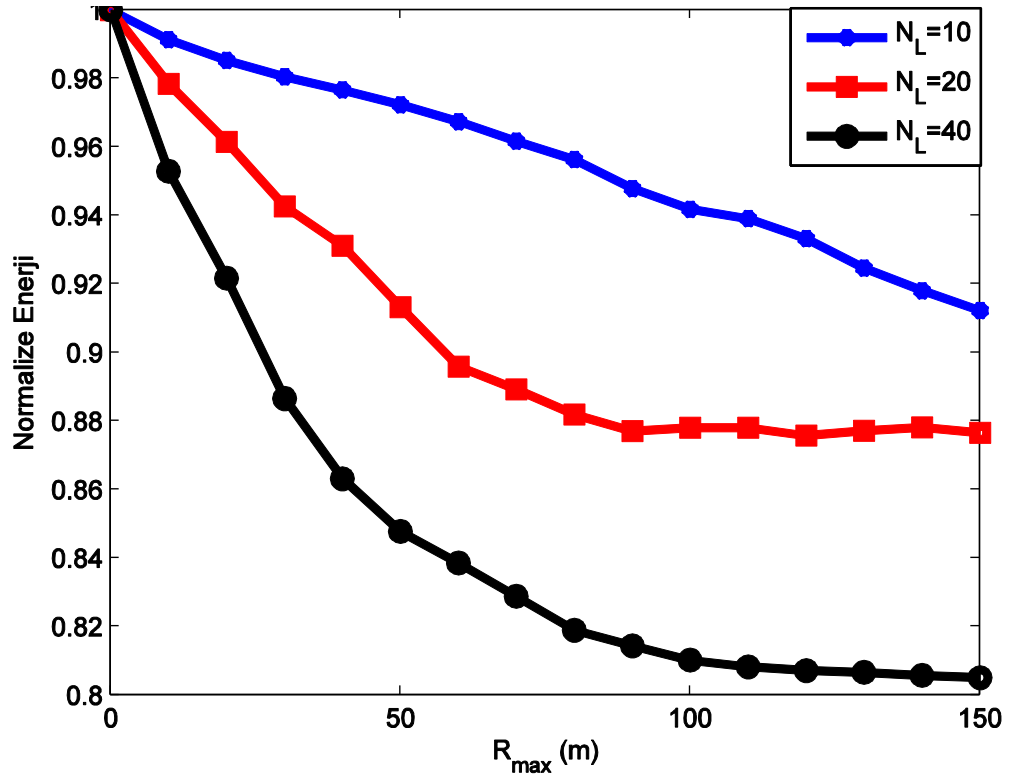
4.5. An Sayısına Bağlı Olarak Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi

Bu modelde düğümlerin yerleşim alanı ve düğüm sayısı sabit tutularak an sayısının değiştirilmesi ile elde edilen sayısal sonuçların grafikleri çizildi. N_L parametresine bağlı olarak değişen enerji değerleri için kullanılan parametreler Tablo 4.7’ de gösterilmiştir.

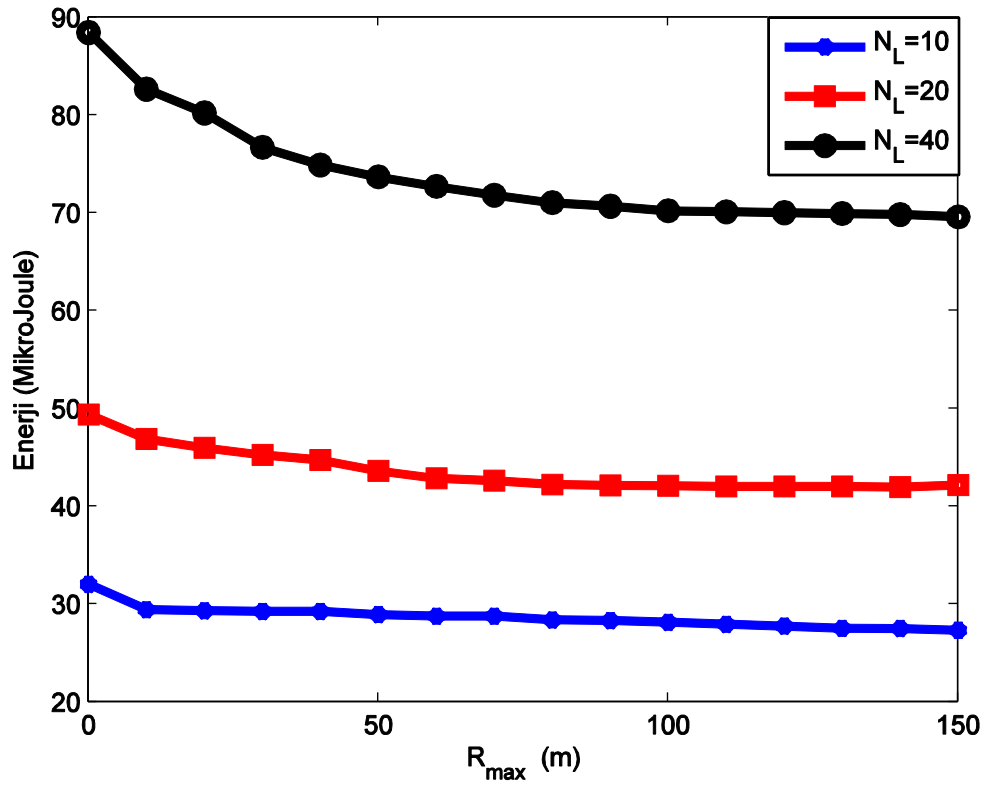
Tablo 4.7. N_L an sayısına bağlı olarak değişen enerji değerleri için kullanılan parametreler

Model adı	Hareketlilik ile beraber an sayısının yük dengelemeye etkisi
Modelin çalıştırma sayısı	200 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için)
N_L	10/20/40 (Farklı fakat her bir eğri için sabit)
A_v	400 m x 400 m (Her bir eğri için sabit)
N_v	100 (Her bir eğri için sabit)
R_{max}	Değişken (0-150 m)
Topoloji	Simülasyon başlangıcında rastgele
ρ	50 nJ/bit
ε	100 pJ/bit/m ²
α	2

Şekil 4.3’te verilen grafiklerin elde edilmesi için; öncelikle an sayısı sabit tutulmuş ve hareketlilik yarıçapı 10 m aralıklarla artırılarak 150 m ye kadar devam edilmiştir. Her bir hareketlilik yarıçapının değişiminde simülasyon 200 kere çalıştırılmış ve ortalaması alınmıştır. Her bir simülasyonun başlangıcında 100 adet sensör düğümü rastgele bir biçimde alana serpilmiştir. Alandaki her bir sensör düğümü simülasyonun her anında hareketlilik yarıçapı kadar bulunduğu konumdan itibaren hareket etmiştir.



Şekil 4.3 $N_L=10$, $N_L=20$ ve $N_L=40$ için elde edilen normalize değerlere ait sonuçların grafiksel gösterimi



Şekil 4.4 $N_L=10$, $N_L=20$ ve $N_L=40$ için elde edilen enerji değerlerine ait sonuçların grafiksel gösterimi

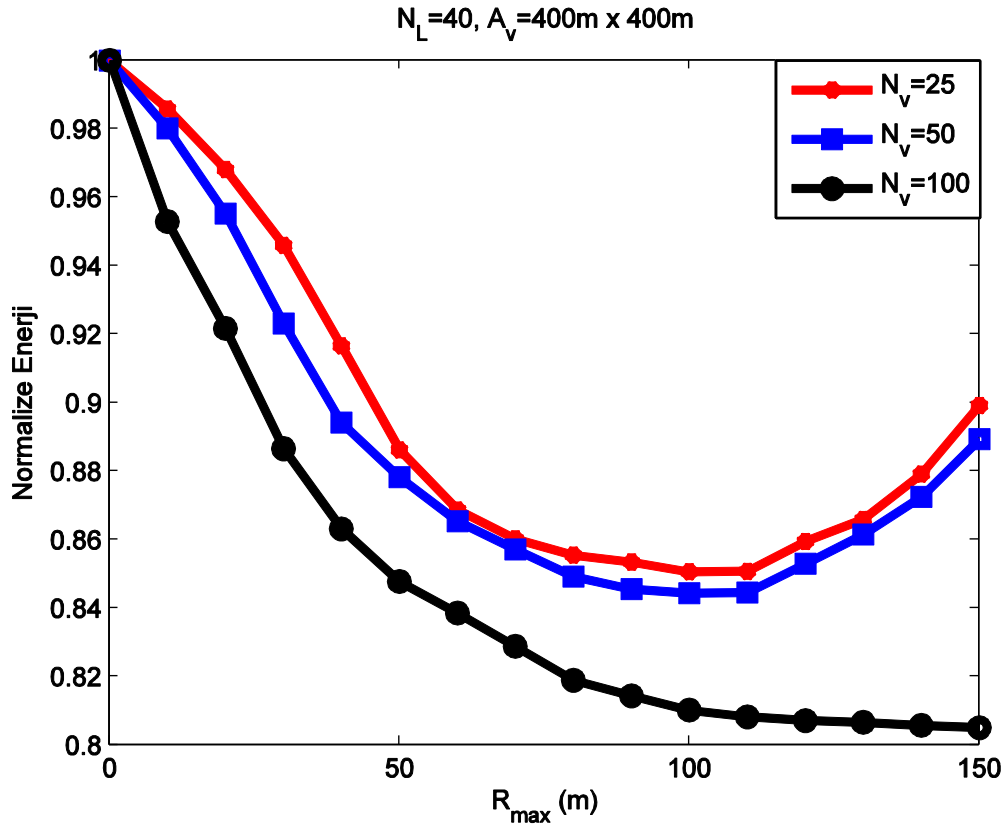
4.6. Düzüm Sayısına Bağlı Olarak Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi

Modelde N_L an sayısı ve alan sabit tutulup düğüm sayısı değiştirilerek ($N_v=25$, $N_v=50$ ve $N_v=100$) R_{max} hareketlilik yarıçapının 0-150 m arasındaki her bir değeri için simülasyon 200 kere çalıştırıldı. Her bir R_{max} değeri için elde edilen 200 tane normalize enerji (Şekil 4.5) ve normal enerji (Şekil 4.6) grafiksel olarak gösterilmiştir. Düzüm sayısına bağlı olarak değişen enerji değerlerine ait parametreler Tablo 4.8’ de verilmiştir.

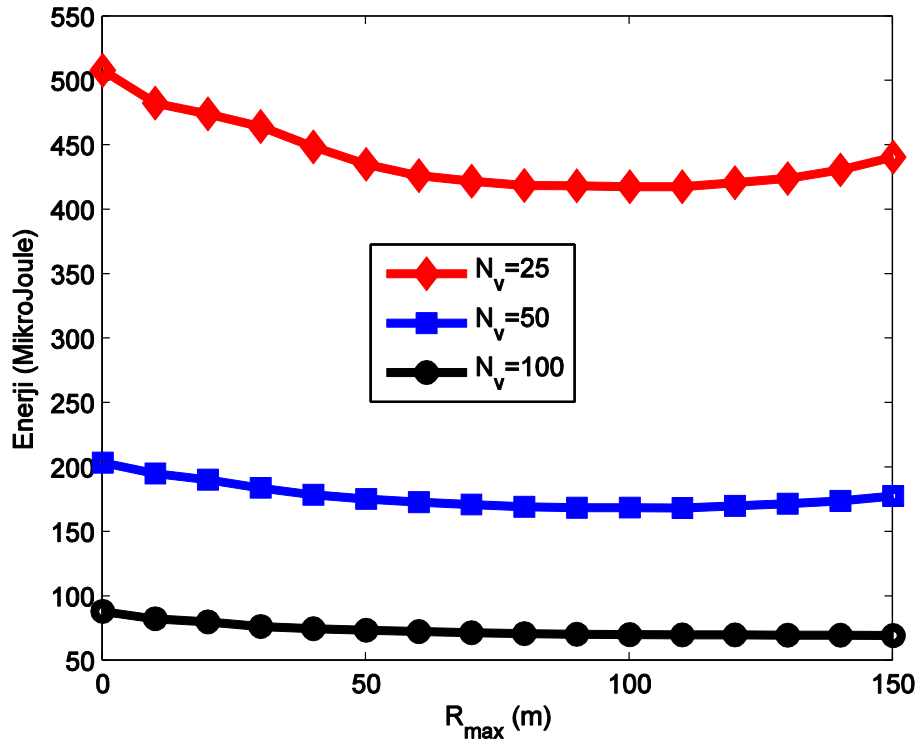
Tablo 4.8. Düzüm sayısına bağlı olarak değişen enerji değerleri için kullanılan parametreler

Model adı	Hareketlilik ile beraber düğüm sayısının yük dengelemeye etkisi
Modelin çalışma sayısı	200 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için)
N_L	40 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için sabit)
A_v	400 m x 400 m (Her bir eğri için sabit)
N_v	25/50/100 (Değişken, fakat her bir eğri için sabit)
R_{max}	0-150 m (Değişken)
Topoloji	Simülasyon başlangıcında rastgele
ρ	50 nJ/bit
ϵ	100 pJ/bit/m ²
α	2

Şekil 4.5’te verilen grafiklerin elde edilmesi için; öncelikle düğüm sayısı sabit tutulmuş ve hareketlilik yarıçapı 10 m aralıklarla artırılarak 150 m ye kadar devam edilmiştir. Her bir hareketlilik yarıçapının değişiminde simülasyon 200 kere çalıştırılmış ve ortalaması alınmıştır. Her bir simülasyonun başlangıcında 100 tane sensör düğümü rastgele biçimde alana serpilmiştir. Alandaki her bir sensör düğümü simülasyonun her anında hareketlilik yarıçapı kadar bulunduğu konumdan itibaren hareket etmiştir. Dolayısıyla sürekli değişen bir ağ örüntüsü ve örüntü neticesinde kaynaktan hedefe gidecek bilginin taşınacağı aradaki düğüm örüntüsü optimizasyon probleminin çözülmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.5 $A_v=400\text{ m} \times 400\text{ m}$, $N_L=40$ sabit değerleri ve $N_v=25$, $N_v=50$ ve $N_v=100$ için elde edilen normalize enerji değerlerine ait sonuçların grafiksel gösterimi



Şekil 4.6 $A_v=400\text{ m} \times 400\text{ m}$, $N_L=40$ sabit değerleri ve $N_v=25$, $N_v=50$ ve $N_v=100$ için elde edilen normal enerji değerlerine ait sonuçların grafiksel gösterimi

4.7. Sensör Alanı Büyüklüğüne Bağlı Olarak Analiz Sonuçlarının Çizdirilmesi

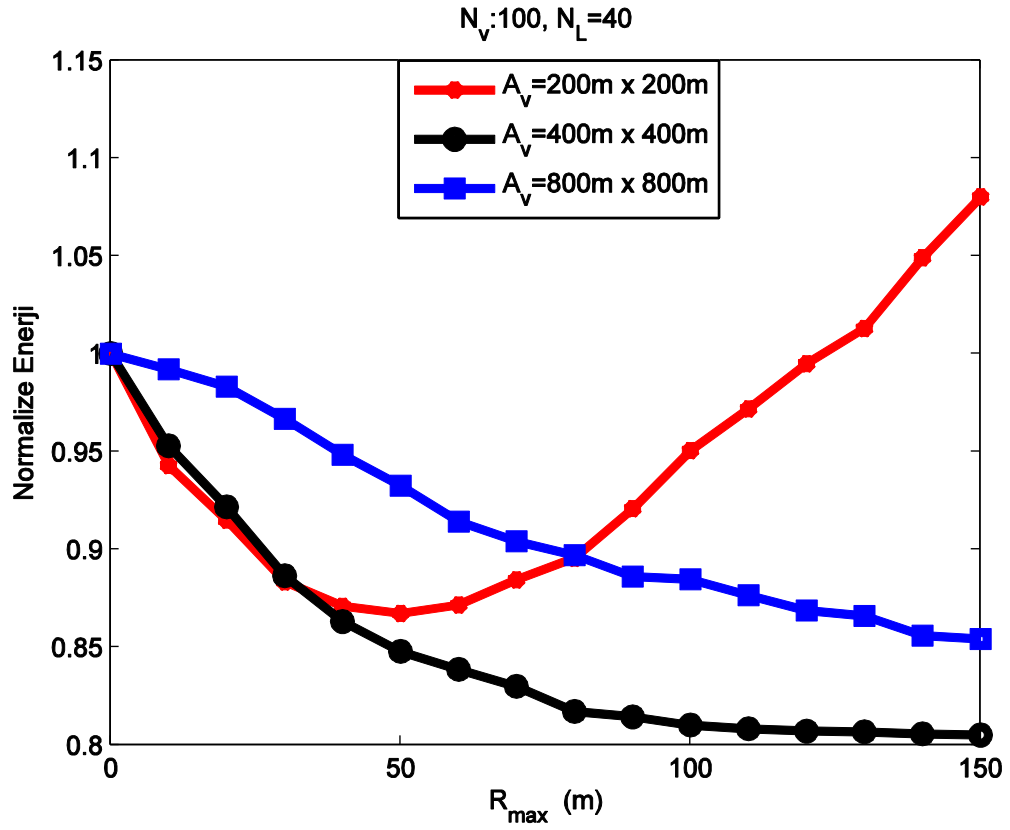
Modelde N_L an sayısı ve düğüm sayısı sabit tutularak alan büyüklüğü değiştirilmek suretiyle (200 m x 200 m, 400 m x 400 m ve 800 m x 800 m) hareketlilik yarıçapının 0-150 m arasındaki her bir değeri için simülasyon 200 kere çalıştırıldı. Her bir R_{max} değeri için elde edilen normalize enerji değerine ait grafik Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Alan büyüklüğüne bağlı olarak değişen enerji değerlerine ait parametreler Tablo 4.9 da gösterilmiştir.

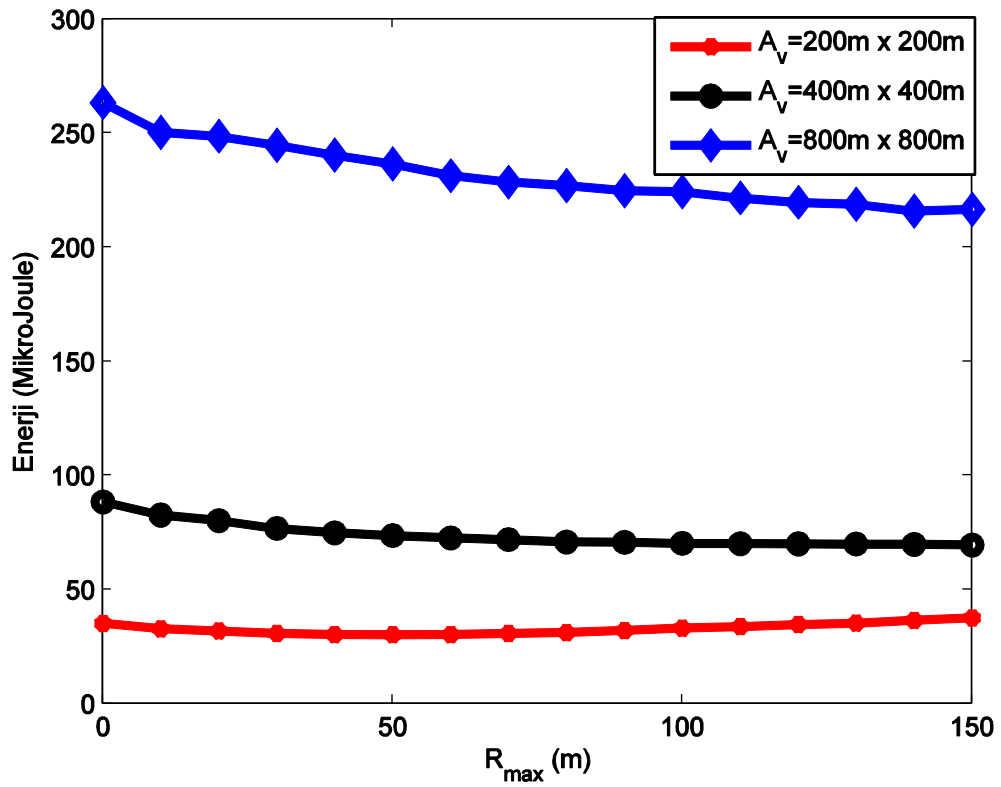
Tablo 4.9. Alan büyüklüğüne bağlı olarak değişen enerji değerleri için kullanılan parametreler

Model adı	Hareketlilik ile beraber alan büyüklüğünün yük dengelemeye etkisi
Modelin çalıştırma sayısı	200 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için)
N_L	40 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için sabit)
A_v	200 m x 200 m / 400 m x 400 m / 800 m x 800 m (Değişken, fakat her bir eğri için sabit)
N_v	100 (Her bir eğri için sabit)
R_{max}	0-150 m (Değişken)
Topoloji	Simülasyon başlangıcında rastgele
ρ	50 nJ/bit
ε	100 pJ/bit/m ²
α	2

Şekil 4.7’de verilen grafiklerin elde edilmesi için; öncelikle sensör alanının büyüklüğü sabit tutulmuş ve hareketlilik yarıçapı 10 m aralıklarla artırılarak 150 m ye kadar devam edilmiştir. Her bir hareketlilik yarıçapının değişiminde simülasyon 200 kere çalıştırılmış ve ortalaması alınmıştır. Her bir simülasyonun başlangıcında 100 tane sensör düğümü rastgele bir biçimde alana serpilmiştir. Alandaki her bir sensör düğümü simülasyonun her anında hareketlilik yarıçapı kadar bulunduğu konumdan itibaren hareket etmiştir. Dolayısıyla sürekli değişen bir ağ örüntüsü ve örüntü neticesinde kaynaktan hedefe gidecek bilginin taşınacağı aradaki düğüm örüntüsü optimizasyon probleminin çözülmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.7 $N_V=100, N_L=40$ ve farklı alan büyüklükleri için elde edilen yük dengeleme grafikleri

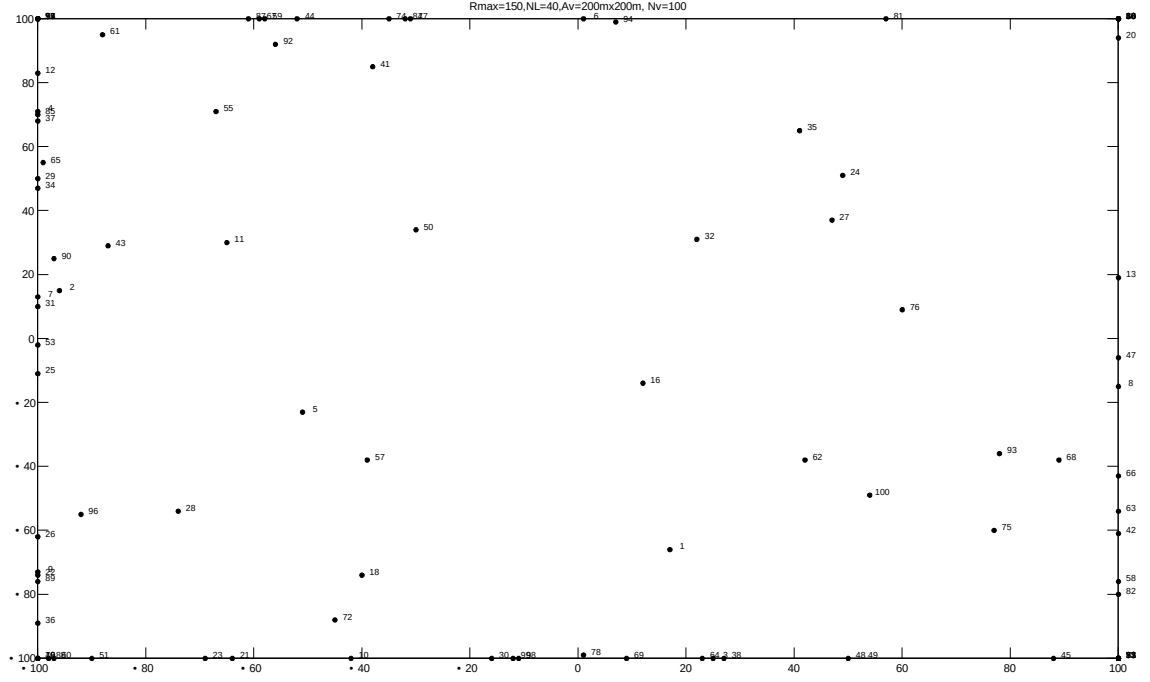


Şekil 4.8 $N_V=100, N_L=40$ ve farklı alan büyüklükleri için elde edilen normal enerji grafikleri

4.8. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

1. Şekil 4.3'te verilen normalize enerji ve Şekil 4.4'te verilen tüketilen enerji değerlerine bakıldığında ilk göze çarpan şey an sayısı (N_L) değeri ne olursa olsun hareketlilik işin içerisine girdiği andan itibaren düğümlerin enerji tüketimlerinde bir düşüşün olmasıdır. Bu da hareketliliğin yük dengeleme üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır. Düğüm sayısı ve alan büyüklüğü sabit tutulduğunda; an sayısının yüksek değerlerinde tüketilen enerjiler daha yüksek, düşük değerlerinde ise tüketilen enerjiler daha düşük olmaktadır (Şekil 4.4). Çünkü her bir anda 100 bitlik veri kaynaktan hedefe gitmektedir. Giden veriye bağlı olarak tüketilen enerjiler de doğal olarak artacaktır.
2. Küçük N_L değerlerinde ($N_L=10, N_L=20$) değişen R_{max} değerlerine bağlı olarak yük dengeleme oranının daha az, daha büyük N_L değerlerinde ($N_L>20$) yük dengelemenin daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Hareketlilik yarıçapının 100 m'den büyük olduğu noktalarda yük dengeleme oranı daha düşük olmaktadır (Şekil 4.3).
3. Şekil 4.3 'te görüldüğü gibi en iyi yük dengeleme grafiği $N_L=40$ değeri için elde edilmiştir. An sayısının yüksek değerlerinde normalize enerji değerinin daha çok düştüğünü ve dolayısıyla düğümler üzerindeki yükün daha iyi dengelendiğini görmekteyiz. An sayısının yüksekliği, modelin daha kapsamlı olarak çalışmasına ve daha hassas sonuçlar üretmesine neden olmaktadır.
4. Grafikte R_{max} değişimlerinde enerjinin bazı noktalarda ani artması yâda daha keskin düşmesi, seçilen S-D çiftlerinin aralarındaki mesafelerden kaynaklanmaktadır. Uzun mesafeler üzerinde enerji tüketimi daha fazla olmaktadır (Şekil 4.3).
5. Simülasyonda $N_L=40$ için elde edilen grafiğin daha dengeli olduğu gözlemlenmiştir. En hassas sonuçlar daha yüksek an ve daha çok çalıştırma sayılarında elde edilmektedir (Şekil 4.3).
6. Sabit alanda sensör sayısı $N_v=25$ olarak alındığında yükün $R_{max}<110$ değerine kadar daha dengeli, $R_{max}>110$ için daha dengesiz olduğu görülmektedir. Bu bir anlamda alanın büyütülmesi anlamına gelir ki sensörler arasındaki mesafelerin uzun olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.5). Belli bir mobilite değerinden sonra tüketilen enerjilerde artış gözlenmektedir.

7. Sensör sayısının yüksek değerlerinde yük dengeleme daha iyi sağlanmıştır. Yük dengeleme sensör sayısı ile doğru orantılı olarak artmıştır (Şekil 4.5).
8. Aynı alan içinde sensör sayısının artması ile harcanan enerjilerde düşüşlere neden olmuştur. Yüksek sensör sayısı ile birlikte daha iyi yük dengeleme sağlanmıştır. Sensör sayısının azalması, aynı alanı gözlemlemek için daha fazla mesafede iletişim ve daha yüksek enerji harcama anlamına gelmektedir (Şekil 4.6).
9. Simülasyonlarda düğüm sayısı ($A_v=100$) ve an sayısı ($N_L=40$) sabit tutulmuş, buna karşın alan büyüklüğü her simülasyonda değiştirilmiştir. Düğüm sayısı ve alan değerine bağlı olmaksızın hareketlilik ile birlikte tüketilen enerjilerde bir düşüş kaydedilmiştir (Şekil 4.8).
10. Alanın normal değeri $400 \times 400 \text{ m}^2$ olarak referans değer olarak alınmış ve $N_L=40$ için grafiği çizdirilmiştir. Bu değerler altında hareketliliğe bağlı olarak düzenli bir enerji düşüşü gözlemlenmiştir (Şekil 4.7).
11. Alanın değeri referans değere ($400 \times 400 \text{ m}^2$) göre büyütüldüğünde harcanan enerji daha yüksek olmaktadır (Şekil 4.8). Büyük alanda yük dengeleme daha az olmaktadır. Alan referans alana göre daha küçük tutulduğunda, doğal olarak düğümler arasındaki mesafeler kısalmış ve tüketilen enerji değerlerinde daha büyük düşüşler olmuştur (Şekil 4.8). Fakat alanın $200 \times 200 \text{ m}^2$ olduğu durumdaki hareketlilik yarıçapının $R_{\max}>40$ değerlerinde tüketilen enerjilerde bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışı, küçük olan alanın daha büyük hareketlilik yarıçapı ile düğümlerin yer değiştirmesi ve daha çok kenarlardaki konumlarda yer almasına bağlıyoruz (Şekil 4.9). Çünkü büyük yarıçaplarda dışarı çıkmak isteyen düğümlerin bu isteklerinin kısıtlanması ve dışarı çıkışlarının aksi istikamette hareket etmelerinin bir sonucudur. Tüketilen enerjinin $R_{\max}=150$ için daha büyük olması, küçük alanda yüksek yarıçaplı hareketliliğin bir neticesidir (Şekil 4.9). Burada aşırı hareketliliğin olumsuz etkisini görmekteyiz.
12. Alanın referans alana göre daha fazla büyütülmesi yani $800 \times 800 \text{ m}^2$ yapılması yük dengeleme üzerinde daha az etkili olmaktadır. Hareketlilik ile beraber enerji düşüşü daha küçük olabilmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.9 $R_{\max}=150$, $N_v=100$, $N_L=40$ ve $A_v=200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ parametrelerine karşılık düğümlerin konumları

5. ÇOKLU KAYNAK - HEDEF ARASINDA VERİ İLETİMİ

Şu ana kadar yaptığımız çalışmalarda tekli kaynak-hedef çifti arasında veri iletimini çeşitli parametrelere bağlı olarak inceledik. Bunun temelini matematiksel modelin optimizasyonu neticesinde tespit edilen düğümler dizisi oluşturmaktaydı. Hem hareketliliğin olduğu hem de hareketliliğin olmadığı durumlarda değişen topoloji üzerinde veri transfer biçimlerini inceledik. Modelde kaynak ve hedef arasında N_L an sayısınınca yer alan her L anında 100'er bit transfer edilmekteydi.

Üçüncü bölümden itibaren verilen modele yeni bir parametre eklenerek mevcut model bir üst seviyeye taşınmıştır.

Modele eklenen parametre ile her bir L anında N_K tane kaynağın N_K tane hedefe aynı anda nasıl veri gönderildiği incelendi. Bu inceleme hareketliliğin olmadığı statik ve hareketliliğin olduğu dinamik durumlarda yapılmaktadır. Bir simülasyonun her bir L anında $K*100$ bit, N_L anları süresince N_L*N_K*100 bit veri kaynaklardan hedeflere gönderilmekte ve bunun için tek bir enerji değeri üretilmektedir. Üretilen bu enerji, en fazla enerji harcayan düğümün enerjisi olmaktadır. Her L anında kaynak ve hedefler rastgele seçildiğinden dolayı K 'nın farklı değerleri için kaynak ya da hedef olan bir düğümün aynı zamanda aradaki düğüm (relay) olarak ta görev yapabilmektedir.

5.1. Çoklu S-D Arasında Veri Akış Modeli

Herhangi bir L anında K kadar S-D çifti arasında veri transferi gerçekleştirilmektedir. Tekli kaynak-hedef çifti için kullanılan modelimiz, K parametresinin dâhil edilmesiyle yeni bir boyut kazanmaktadır. Böylece çoklu kaynak-hedef çifti için yeniden düzenlenerek kullanılmaktadır (Şekil 5.1).

Amaç: Pil kullanımını en aza indirmek

$$f_{ij}^{kl} \geq 0, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad \forall l \in L \quad (5.1)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij}^{kl} = \sum_{j \in V} f_{ji}^{kl}, \quad \forall i \in X^k, \quad \forall k \in K, \quad \forall l \in L \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij}^{kl} = \sum_{j \in V} f_{ji}^{kl} + Z^{kl}, \quad \forall i \in S^k, \quad \forall k \in K, \quad \forall l \in L \quad (5.3)$$

$$Z^{kl} + \sum_{j \in V} f_{ij}^{kl} = \sum_{j \in V} f_{ji}^{kl}, \quad \forall i \in D^k, \quad \forall k \in K, \quad \forall l \in L \quad (5.4)$$

$$P_{rx} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} f_{ji}^{kl} + \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} P_{tx,ij}^l f_{ij}^{kl} \leq e_i, \quad \forall i \in V \quad (5.5)$$

$$e_i = pil, \quad \forall i \in V \quad (5.6)$$

Şekil 5.1 Çoklu kaynak-hedef arasında veri iletimini gerçekleştiren problemin matematiksel modeli

Modelde yer alan denklem (5.1) akımların negatif olamayacağını belirtmek için kullanılıyor. K adet kaynağın kullanıldığı her L anında i-düğümlelerinden j-düğümüne gönderilecek bilgi paketleri pozitif olmak durumundadır. Burada her i ve j düğümü V düğümler kümesinin birer elemanı, her l ise anlar kümesi olan L ‘nin birer elemanı ve her k ise akımlar kümesi olan K ‘nın bir elemanıdır.

Denklem (5.2) bir düğümün aradaki düğüm olması durumunda kendisine giren ve çıkan verilerin K adet kaynağın kullanıldığı her L anı için eşit olacağını belirtiyor. Bir düğüm diğer düğümlerden ne kadar veri almışsa, o kadar veriyi göndermek durumundadır.

Denklem (5.3) ile K adet kaynağın kullanıldığı ve i- düğümünün kaynak düğüm olması durumunda, ürettiği veri miktarı ve diğer j-düğümlelerinden aldığı veri miktarının toplamının j-düğümüne gönderdiği veri miktarı toplamına eşit olduğu ifade edilmektedir.

Denklem (5.4) ile K adet kaynağın kullanıldığı ve i- düğümünün hedef düğüm olması durumunda, tüm j-düğümlelerinden aldığı veri miktarı ve L anında üretilen veri miktarı toplamının j-düğümlelerine gönderdiği veri miktarına eşit olduğu ifade edilmektedir.

Denklem (5.5) ile K adet kaynağın kullanıldığı, P_{rx} 'in sabit ve P_{tx} ' in ise uzaklığa bağlı olduğunu yani düğümler arasındaki mesafeden bağımsız olduğunu ve tüm düğümlerin diğer düğümlerden aldıkları veri akımlarından dolayı harcanan enerji toplamı ile diğer düğümlere veri göndermek için harcanan toplam enerjiye küçük ya da olduğu ifade edilmektedir.

Denklem (5.6) ile tüm düğümlerde aynı miktarda başlangıç enerjisi olması gerektiği ifade ediliyor.

5.2. Aynı Anda ikili Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi

N_K parametresinin 1 olması tekli kaynak-hedef çiftlerini temsil ettiğinden ve önceki bölümde incelendiğinden dolayı bu bölümde N_K nın 1 den büyük olan değerlerini inceledik.

N_K parametresinin 2 olması herhangi bir L anında mevcut düğümler içinde rastgele seçilen iki kaynak ve iki hedef arasında veri transferini ifade etmektedir. Bu durumda bir simülasyon sonucunda $N_L * 2 * 100$ bit veri transfer edilecektir. N_K parametresinin 2 olması durumunda birinci kaynak-hedef çifti için K_1 ve ikinci kaynak-hedef çifti için K_2 değeri kullanılmaktadır.

Tablo 5.1'de $N_L=10$ ve $N_K=2$ için çalıştırılan simülasyonda rastgele seçilen S-D çiftleri, gönderilen veriler ve S-D arasındaki mesafeler gösterilmiştir.

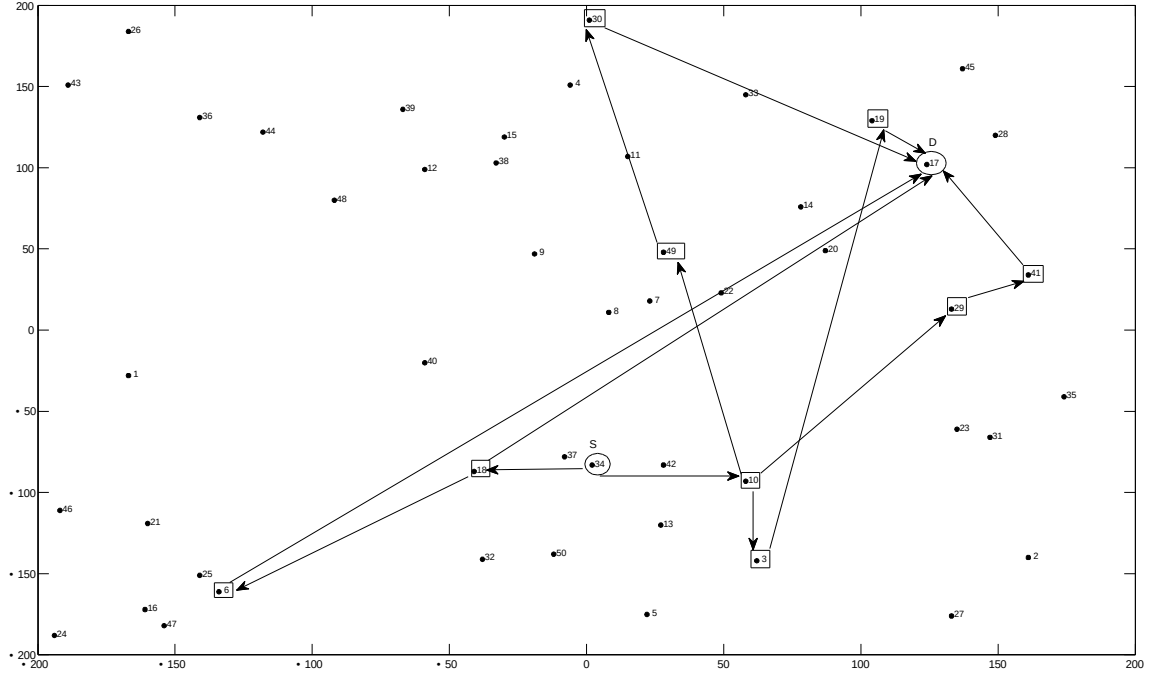
Tablo 5.1'de görüldüğü gibi L_1 ve K_1 için N_{34} düğümü kaynak, N_{17} düğümü ise hedef olarak seçilmiştir. $S^1_{34}-D^1_{17}$ çifti arasında iletilen verinin nasıl gönderildiğini, aradaki hangi düğümlerin kullanıldığını tamamen model karar veriyor. Modelin bulduğu optimum veri gönderme biçimine göre S^1_{34} ile D^1_{17} arasında gerçekleşen veri akış biçimi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1'de L_1 ve K_2 için rastgele N_2 düğümü kaynak, N_{45} düğümü ise hedef olarak seçilmiştir. Buna göre S^2_2 ile D^2_{45} arasındaki veri akış biçimi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

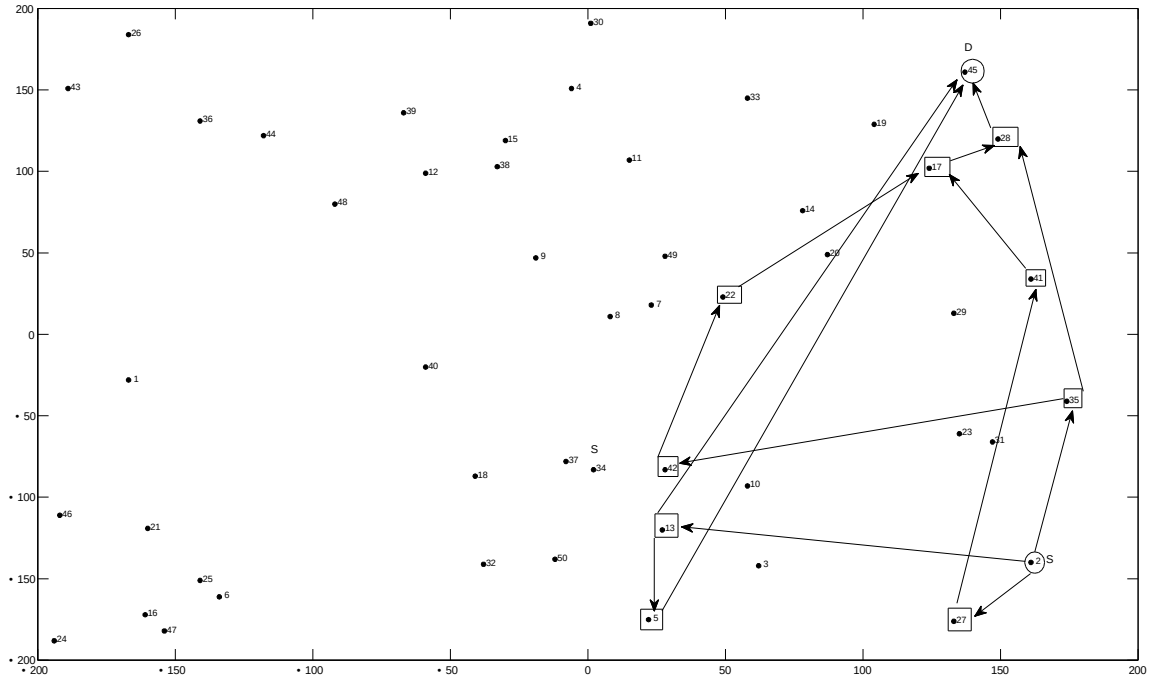
Tablo 5.1. $N_K=2$ için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri ve S-D çiftleri arasındaki mesafeler

L	K	S	D	S-D Gönderilen Veri (Bit)	S-D Arasındaki Mesafe(m)
1	1	34	17	100	221.7378
1	2	2	45	100	301.9553
2	1	7	24	100	295.6728
2	2	4	37	100	225.1325
3	1	38	21	100	257.5598
3	2	15	31	100	250.251
4	1	30	34	100	275.1724
4	2	1	30	100	263.2368
5	1	19	26	100	293.9018
5	2	8	41	100	146.1944
6	1	38	2	100	312.6095
6	2	7	12	100	117.1301
7	1	2	29	100	166.705
7	2	1	44	100	140.3091
8	1	16	35	100	354.3521
8	2	23	16	100	303.8265
9	1	37	41	100	204.093
9	2	27	13	100	90.3255
10	1	13	37	100	93.1319
10	2	41	32	100	253.731

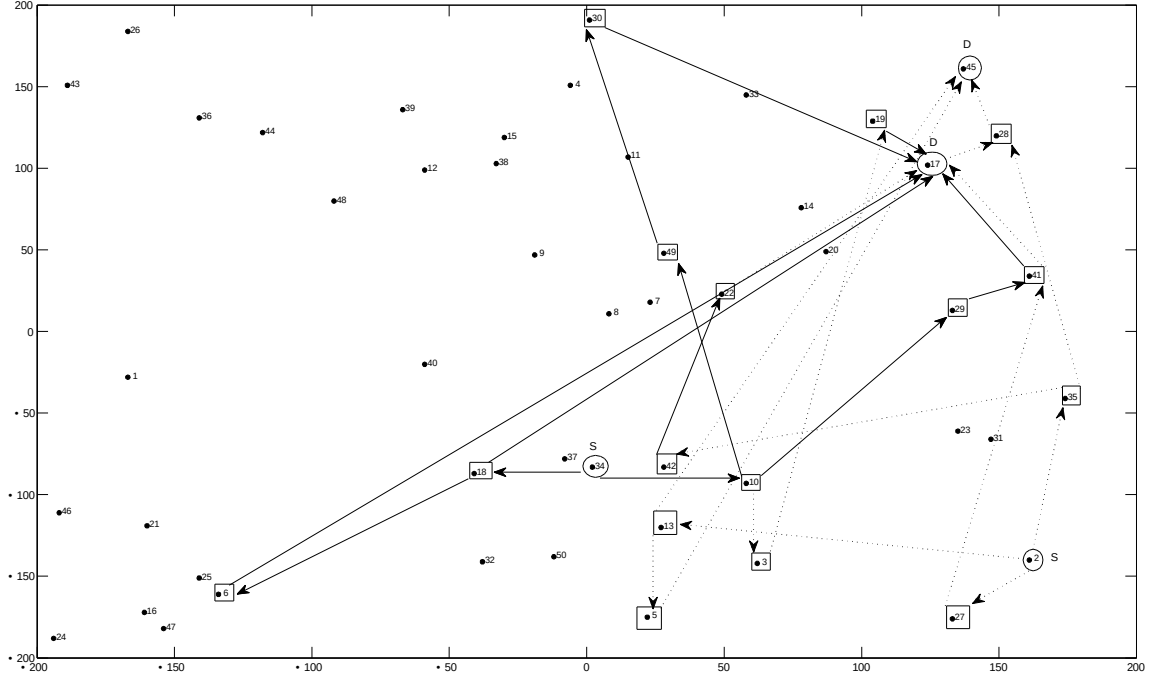
Her bir L anında K kadar hedef, K kadar kaynak ile haberleştiğinden dolayı K kadar 100 bitlik veri transfer edilmektedir. Hem K_1 hem de K_2 durumundaki S-D çiftleri arasındaki veri iletişimi aynı anda gerçekleşecektir. Bu durumda Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 'te verilen grafikleri birleştirerek Şekil 5.4' te olduğu gibi tek bir grafik olarak verdik. Söz konusu grafikte görüldüğü gibi K_1 değeri için N_{17} düğümü hedef düğüm iken, aynı düğüm K_2 değeri için aradaki düğüm olarak ta görev yapmaktadır. Bundan dolayı N_{17} düğümünün taşıyacağı veri bir simülasyon boyunca daha fazla olmaktadır.



Şekil 5.2. $R_{\max}=10$, $N_v=50$, $N_L=1$, K_1 ve $A_v=400$ m x 400 m için S_{34}^1 ile D_{17}^1 arasında veri iletim biçimi



Şekil 5.3 $R_{\max}=10$, $N_v=50$, $N_L=1$, K_2 ve $A_v=400$ m x 400 m için S_2^2 ile D_{45}^2 arasında veri iletim biçimi



Şekil 5.4 $R_{\max}=10$, $N_v=50$, $N_L=1$, K_1 , K_2 için $S_{34}^1 - D_{17}^1$ ile $S_{22}^2 - D_{45}^2$ arasında veri iletim biçimi

5.3. Aynı Anda Dörtlü Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi

N_K parametresi 4 yapılarak her bir L anında 4 kaynak-hedef çifti arasında toplam $4*100$ bitlik veri transfer edilmektedir. Tablo 5.2’ de görüldüğü gibi her bir L anında mevcut düğümlerden rastgele 4 tane kaynak-hedef çifti seçilmektedir. Özellikle L_6 için K değerlerine baktığımızda oldukça ilginç kaynak hedef çifti ortaya çıkmıştır. Örneğin L_6 , K_1 ve K_3 için N_{36} düğümü iki kere kaynak olarak seçilmiştir. Benzer bir durum L_6 , K_1 ve K_4 için de söz konusudur. K_1 için N_{11} düğümü hedef olarak seçilmiş ve K_4 için aynı düğüm bu defa kaynak olarak seçilmiştir. Kaynak düğümleri veri üreten düğümlerdir. Hedefe gönderecekleri veriyi optimizasyon çerçevesinde belirlenen düğüm dizisi üzerinde gönderirler. Veriyi alan hedef düğümler ise veriyi alırlar ve başka yere göndermezler. Tablo 5.2’de görüldüğü gibi bazı düğümler kaynak-aradaki düğüm ya da hedef-aradaki düğüm olarak görev yapmaktadırlar.

Tablo 5.2. NK=4 için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri

L	K	S	D	S-D Gönderilen Veri (Bit)
1	1	20	3	100
1	2	15	2	100
1	3	35	16	100
1	4	14	10	100
2	1	29	25	100
2	2	43	24	100
2	3	35	40	100
2	4	42	43	100
...	...	...	...	...
6	1	36	11	100
6	2	31	4	100
6	3	36	45	100
6	4	11	39	100

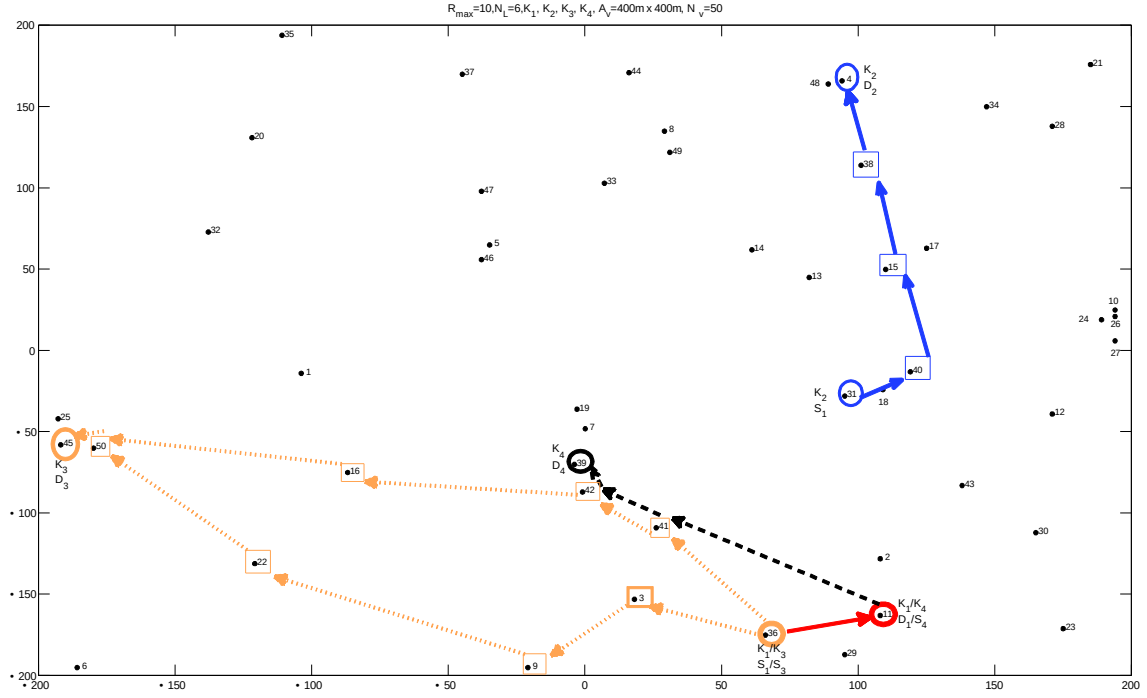
$N_K=4$ olarak alındığından dolayı her bir L anında seçilecek 4 kaynak-hedef arasında gönderilecek verilerin transferi aynı anda gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bunların tamamı o anki L değeri için yapılandırılan aynı topoloji üzerinde gerçekleşmektedir.

L_6 ve K_1 durumunda N_{36} düğümü (S^1_{36}) 100 bitlik veriyi üreterek direkt N_{11} düğümüne (D^1_{11}) gönderir (Şekil 5.5).

L_6 ve K_2 durumunda N_{31} düğümü (S^2_{31}) 100 bitlik veriyi üreterek N_{40} - N_{15} - N_{38} düğümleri üzerinden N_4 düğümüne (D^2_4) gönderir (Şekil 5.5).

L_6 ve K_3 durumunda N_{36} düğümü (S^3_{36}) 100 bitlik veriyi üreterek bir kısmını N_{41} - N_{42} - N_{16} - N_{50} , bir kısmını da N_3 - N_9 - N_{22} - N_{50} düğümleri üzerinden N_{45} düğümüne (D^3_{45}) gönderir (Şekil 5.5).

L_6 ve K_4 durumunda N_{11} düğümü (S^4_{11}) 100 bitlik veriyi üreterek direkt N_{41} - N_{42} düğümleri üzerinden N_{39} düğümüne (D^4_{39}) gönderir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 $R_{\max}=10$, $N_v=50$, L_6 , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , $A_v=400$ m x 400 m için $S^1_{36}-D^1_{11}$, $S^2_{31}-D^2_4$, $S^3_{36}-D^3_{45}$ ve $S^4_{11}-D^4_{39}$ arasında veri iletim biçimi

5.4. Aynı Anda Sekizli Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi

N_K parametresinin 8 olması durumunda her L an sayısı için 8 kaynak-hedef çifti arasında $8*100$ bitlik veri transfer edilmektedir. Herhangi bir $R_{\max}$ değeri için optimizasyon probleminin çözümü neticesinde toplam gönderilen bit sayısı ise $N_L*8*100$ bit olacaktır.

Tablo 5.3. $N_K=8$ için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri

L	K	S	D	S-D Gönderilen Veri (Bit)
1	1	4	31	100
1	2	30	34	100
1	3	41	46	100
1	4	29	10	100
1	5	45	46	100
1	6	45	37	100
1	7	23	21	100
1	8	11	25	100

L için yapılandırılan ağ topolojisi değiştirilmeden 8 adet veri transfer işlemi (K_1-K_8) gerçekleştirilmektedir. Bunların tamamını aynı şekil üzerinde verilmesi gerekirken, karmaşıklıktan kaçınıldığından dolayı farklı şekiller üzerinde verilmiştir.

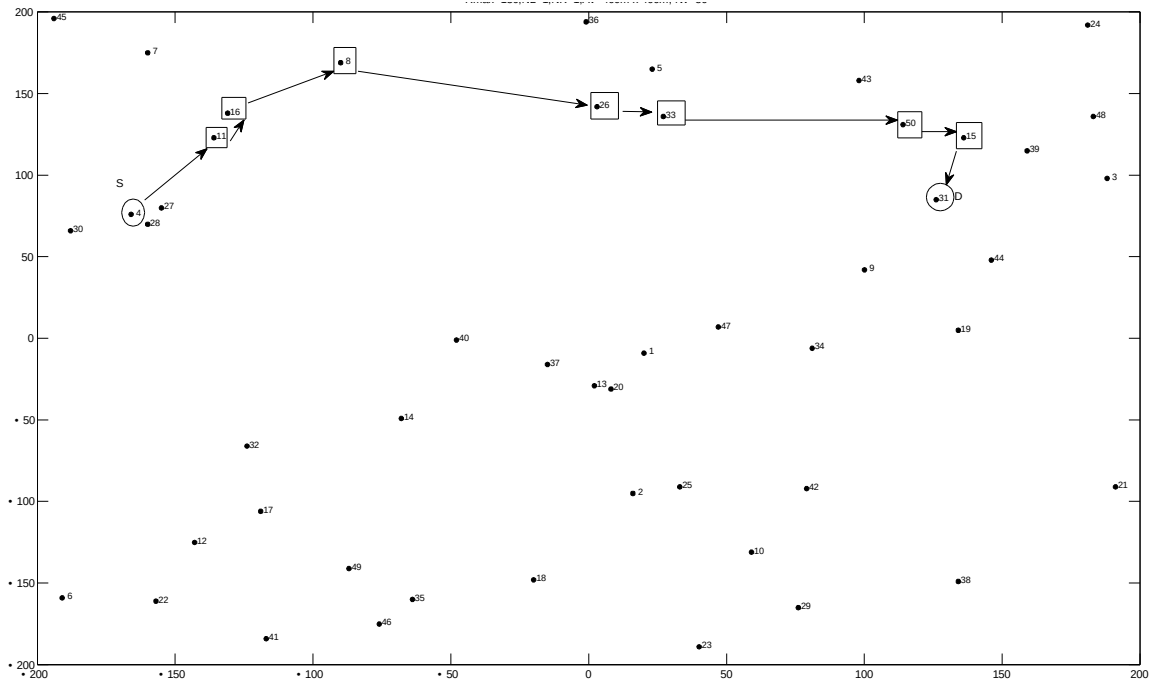
L_1 ve K_1 durumunda N_4 düğümü (S^1_4) 100 bitlik veriyi üreterek direkt N_{11} - N_{16} - N_8 - N_{26} - N_{33} - N_{50} - N_{15} düğümleri üzerinden N_{31} düğümüne (D^1_{31}) gönderir (Şekil 5.6).

L_1 ve K_2 durumunda N_{30} düğümü (S^2_{30}) 100 bitlik veriyi üreterek bir kısmını N_4 - N_{27} - N_{40} - N_{37} - N_1 - N_{47} düğümleri üzerinden, bir kısmını da N_{28} - N_{40} - N_{37} - N_1 düğümleri üzerinden N_{34} düğümüne (D^2_{34}) gönderir (Şekil 5.7).

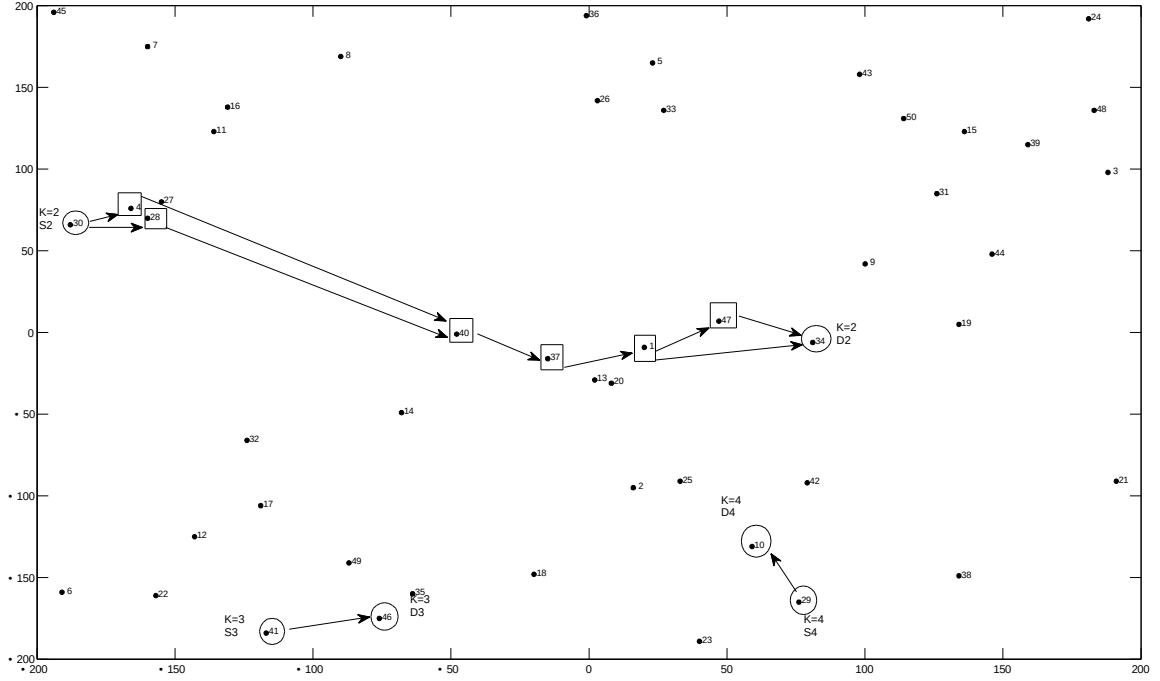
L_1 ve K_3 durumunda N_{41} düğümü (S^3_{41}) 100 bitlik veriyi üreterek direkt N_{46} düğümüne (D^3_{46}) gönderir (Şekil 5.7).

L_1 ve K_4 durumunda N_{29} düğümü (S^4_{29}) 100 bitlik veriyi üreterek direkt 10 nolu düğüme (D^4_{10}) gönderir (Şekil 5.7).

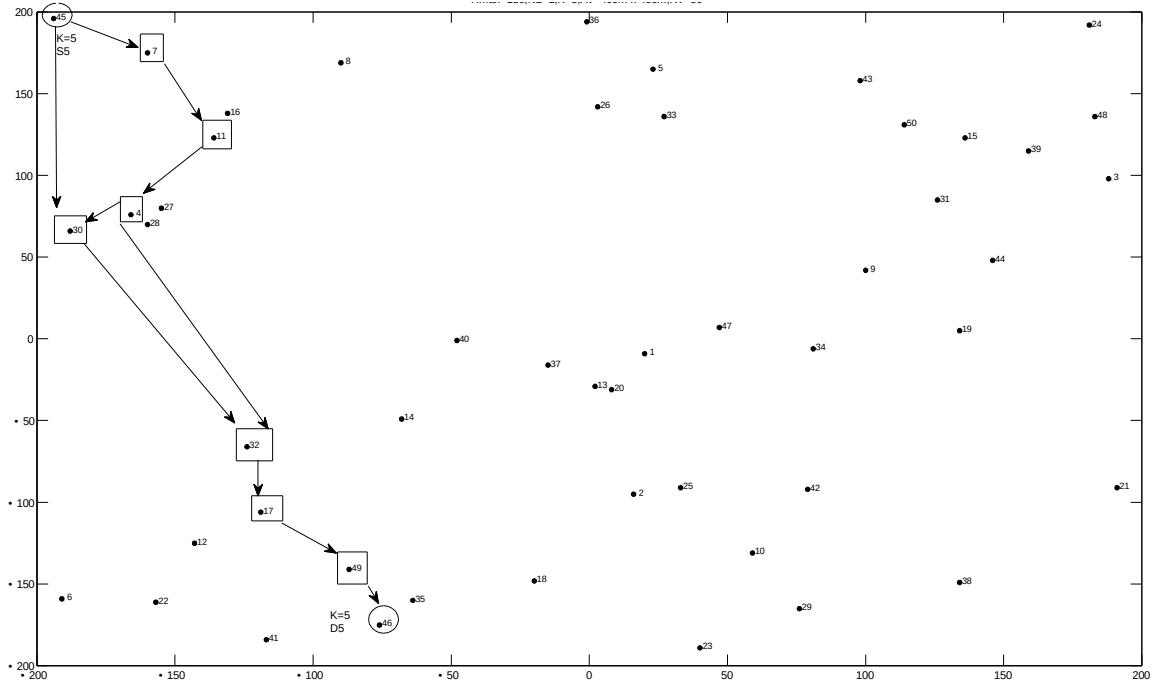
L_1 ve K_5 durumunda N_{45} düğümü (S^5_{45}) 100 bitlik veriyi üreterek bir kısmını N_7 - N_{11} - N_4 (N_{30})- N_{32} - N_{17} - N_{49} düğümleri üzerinden, bir kısmını da N_{30} - N_{31} - N_{17} - N_{49} düğümleri üzerinden N_{46} düğümüne (D^5_{46}) gönderir (Şekil 5.8).



Şekil 5.6 $R_{\max}=130$, $N_v=50$, L_1 , K_1 , $A_v=400$ m x 400 m için S^1_4 - D^1_{31} düğümleri arasında veri iletim biçimi



Şekil 5.7 $R_{\max}=130$, $N_v=50$, $L=1$, $K=2, K=3, K=4$, $A_v=400$ m x 400 m için $S^2_{30}-D^2_{34}$, $S^3_{41}-D^3_{46}$ ve $S^4_{29}-D^4_{10}$ düğümleri arasında veri iletim biçimi

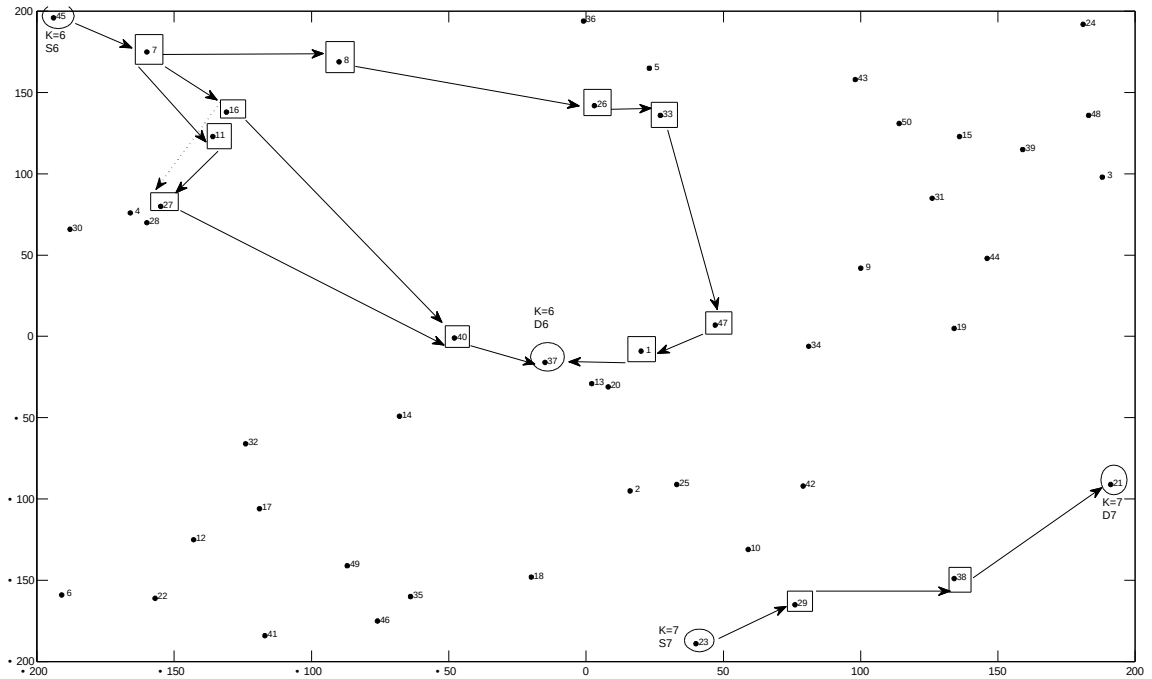


Şekil 5.8 $R_{\max}=130$, $N_v=50$, L_1 , K_5 , $A_v=400$ m x 400 m için $S^5_{45}-D^5_{46}$ düğümleri arasında veri iletim biçimi

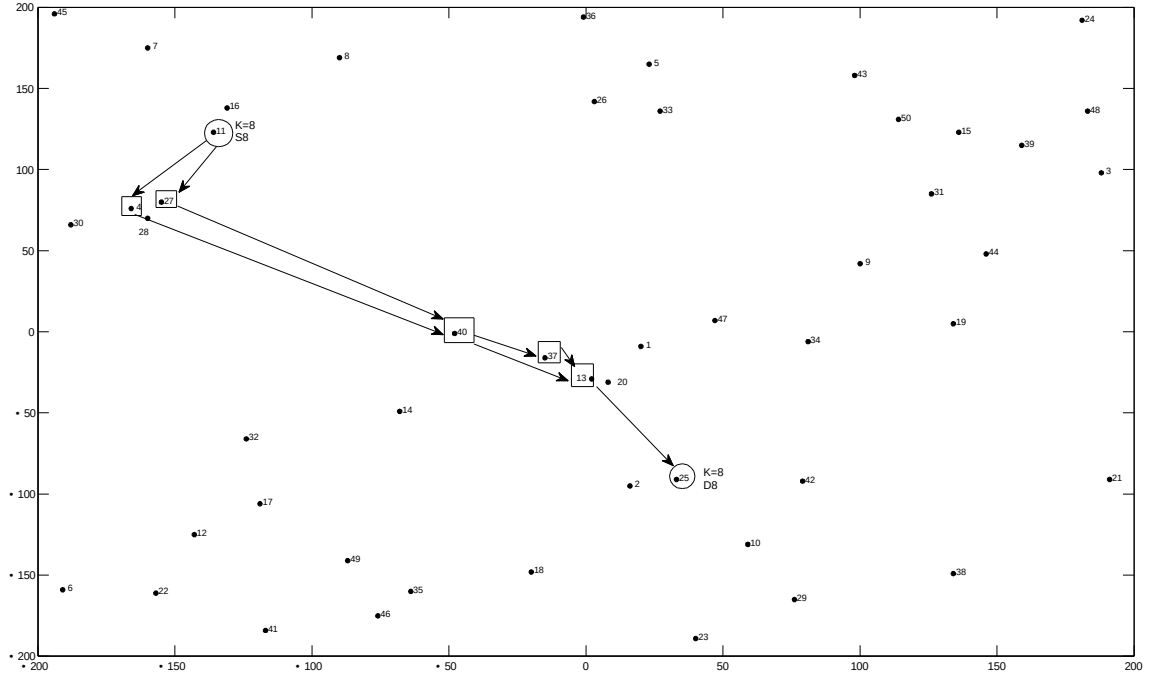
L_1 ve K_6 durumunda N_{45} düğümü (S^6_{45}) 100 bitlik veriyi üreterek bir kısmını N_7 - N_8 - N_{26} - N_{33} - N_{47} - N_1 düğümleri üzerinden, bir kısmını N_7 - N_{16} - N_{27} - N_{40} düğümleri üzerinden, bir kısmını da N_7 - N_{11} - N_{27} - N_{40} üzerinden N_{37} düğümüne (D^6_{37}) gönderir (Şekil 5.9).

L_1 ve K_7 durumunda N_{23} düğümü (S^7_{23}) 100 bitlik veriyi üreterek N_{29} - N_{38} düğümleri üzerinden N_{21} düğümüne (D^7_{21}) gönderir (Şekil 5.9).

L_1 ve K_8 durumunda N_{11} düğümü (S^8_{11}) 100 bitlik veriyi üreterek bir kısmını N_{27} - N_{40} - N_{37} - N_{13} düğümleri üzerinden, bir kısmını N_4 - N_{40} - N_{13} düğümleri üzerinden N_{25} düğümüne (D^8_{25}) gönderir (Şekil 5.10).



Şekil 5.9 S^6_{45} - D^6_{37} , S^7_{23} - D^7_{21} düğümleri arasında veri iletim biçimi



Şekil 5.10 S^8_{11} - D^8_{25} düğümleri arasında veri iletim biçimi

5.5. Aynı Anda Onikili Kaynak-Hedef Arasında Veri Transferi

N_K parametresinin 12 olması durumunda her N_L an sayısı için 12 kaynak-hedef çifti arasında 12×100 bitlik veri transfer edilmektedir. Herhangi bir R_{max} değeri için optimizasyon probleminin çözümü neticesinde toplam gönderilen bit sayısı ise $N_L \times 12 \times 100$ bit olmaktadır.

Tablo 5.4. $N_K=12$ ve $R_{max}=10$ için mevcut düğümler arasında seçilen S-D çiftleri

L	K	S	D	S-D Gönderilen Veri (Bit)
1	1	2	43	100
1	2	23	25	100
1	3	33	41	100
1	4	27	39	100
1	5	14	37	100
1	6	22	28	100
1	7	21	16	100
1	8	36	30	100
1	9	23	16	100
1	10	25	13	100
1	11	19	31	100
1	12	18	28	100

L_1 için yapılandırılan ağ topolojisi değiştirilmeden 12 adet veri transfer işlemi (K_1 - K_{12}) gerçekleştirilmektedir.

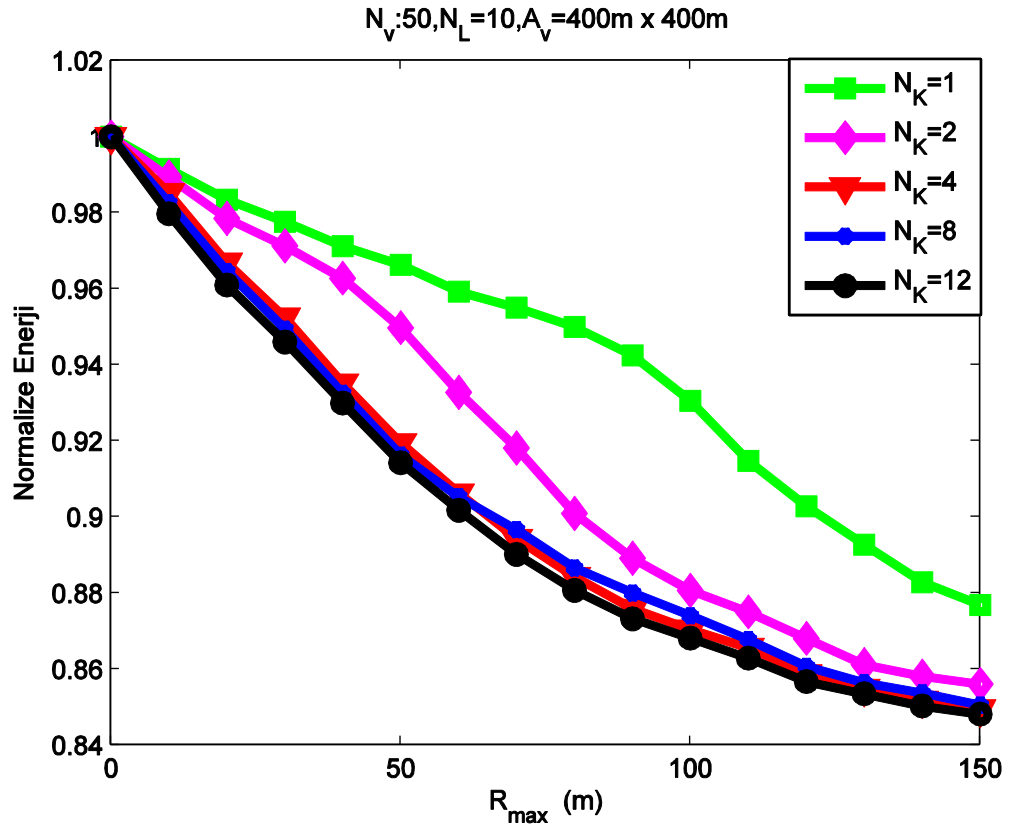
5.6. Çoklu Hedef-Kaynak Arasında Veri İletimi için Harcanan Enerji Değerleri

Yukarıda birden fazla kaynak-hedef çiftleri arasında veri iletimini her K değeri için ayrıntılı olarak verdik. Bu aşamadan sonra belirlenen kaynak-hedef çiftleri için simülasyonun birden fazla çalıştırılması sonucunda elde edilen değerlerin görsel etkilerini grafikler üzerinde gözlemlenmektedir.

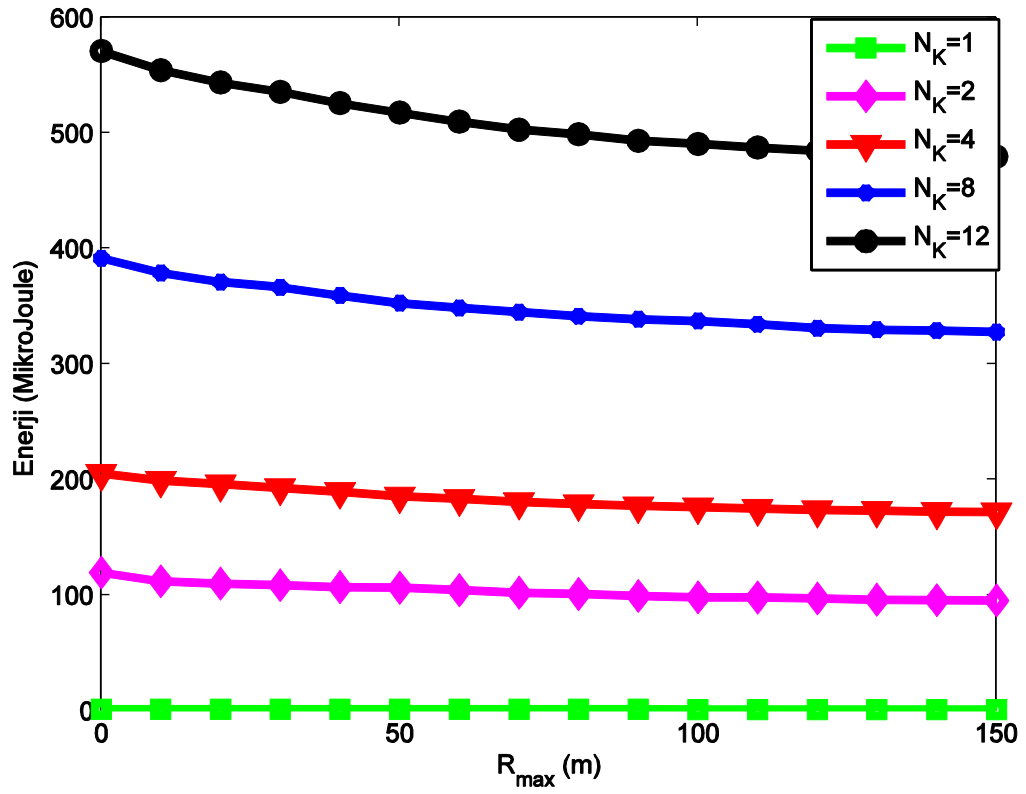
Tablo 5.5. Çoklu kaynak-hedef arasında veri iletimi için kullanılan model çalışma parametreleri

Model adı	Çoklu kaynak-hedef arasında veri iletimi
Modelin çalışma sayısı	100 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için)
N_L	10 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için sabit)
A_v	400 m x 400 m (her bir eğri için sabit)
N_v	50 (Her bir eğri için sabit)
R_{max}	0-150 m (Değişken)
N_K	1/ 2/ 4/ 8/12 (Değişken, fakat her bir eğri için sabit)
Topoloji	Simülasyon başlangıcında rastgele
ρ	50 nJ/bit
ϵ	100 pJ/bit/m ²
α	2

Şekil 5.11’de verilen grafiklerin elde edilmesi için; öncelikle kaynak-hedef sayısı sabit tutulmuş ve hareketlilik yarıçapı 10 m aralıklarla artırılarak 150 m ye kadar devam edilmiştir. Her bir hareketlilik yarıçapının değişiminde simülasyon 200 kere çalıştırılmış ve ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.11 $N_V=50, N_L=10, A_V=400\text{ m} \times 400\text{ m}$ için normalize enerji değerleri



Şekil 5.12 $N_V=50, N_L=10, A_V=400\text{ m} \times 400\text{ m}$ için normal enerji değerleri

5.7. Çoklu Kaynak-Hedef İçin Elde Edilen Analiz Grafiklerinin Yorumlanması

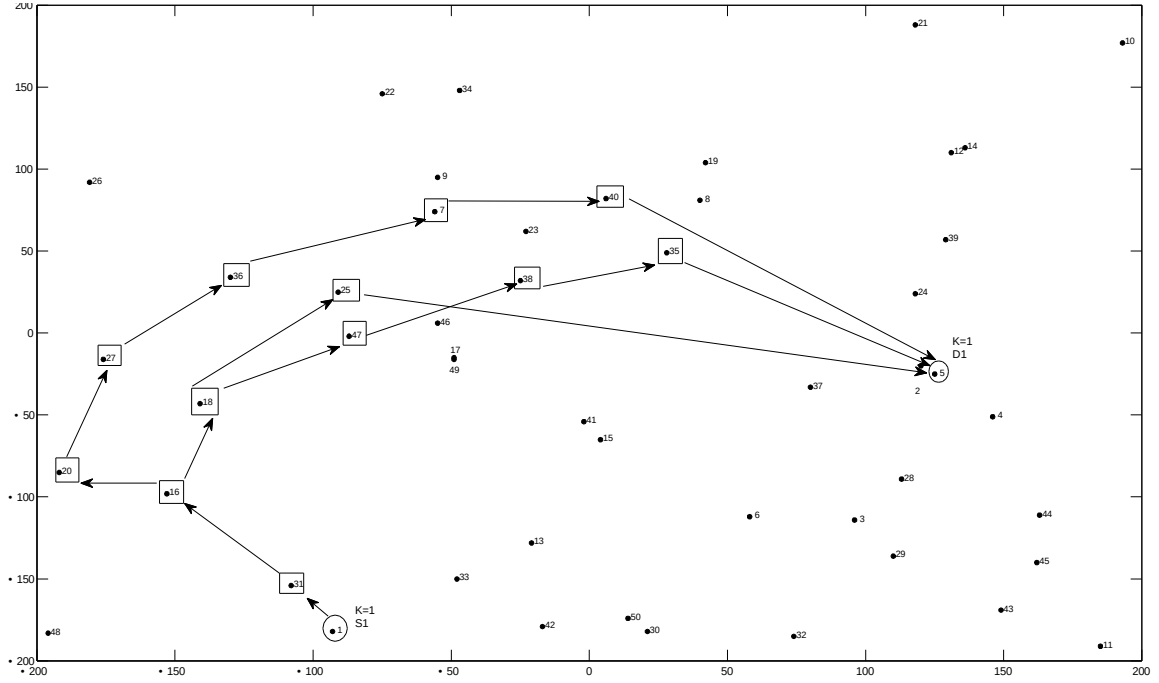
- 1- Grafiğe bakıldığında ilk göze çarpan şey çoklu iletim de N_K değeri ne olursa olsun hareketlilik için içerisine girdiği andan itibaren düğümlerin enerji tüketimlerinde bir düşüşün olmasıdır (Şekil 5.11).
- 2- N_K değeri artıkça harcanan enerji değerlerinde büyüme (Şekil 5.12), yük dengeleme de ise daha dengeli düşüşler gözlenmektedir (Şekil 5.11).
- 3- N_K parametresinin 4, 8 ve 12 değerlerinde yakın yük dengeleme sonuçları alınırken (Şekil 5.11) 4 değerinde ise harcanan enerji değerleri daha düşük olmaktadır (Şekil 5.12).
- 4- N_K değerine bağlı olarak kaynak-hedef çifti artırıldıkça tüketilen enerji değerleri daha büyük olmaktadır. Çünkü daha fazla veri transferi söz konusudur (Şekil 5.12).

5.8. Sabit Kaynak-Hedef Arasında Veri İletimi

Sabit kaynak-hedef arasındaki veri iletim modelinde N_K parametresi 4 olarak ve her L anı için sabit tutulmaktadır. Her L anı için kaynaklar sırasıyla 1, 2, 3, 4 nolu düğümlerden, hedefler ise 5, 6, 7, 8 nolu düğümlerden oluşurlar. Statik durumda her L anı için 4 kaynak-hedef çifti arasında topoloji aynı kalırken, L parametresinin farklı değerleri için topoloji de belirlenen hareketlilik yarıçapına bağlı olarak değişmektedir. R_{max} parametresinin değiştirilmesi hareketlilik modelinin değiştirilmesi anlamına gelmektedir. Her L anında kaynak ve hedeflerin konumları farklı olmasına rağmen kendileri sabittir.

N_K parametresinin 4 değeri için veri akışlarının nasıl gerçekleştiğini inceledik:

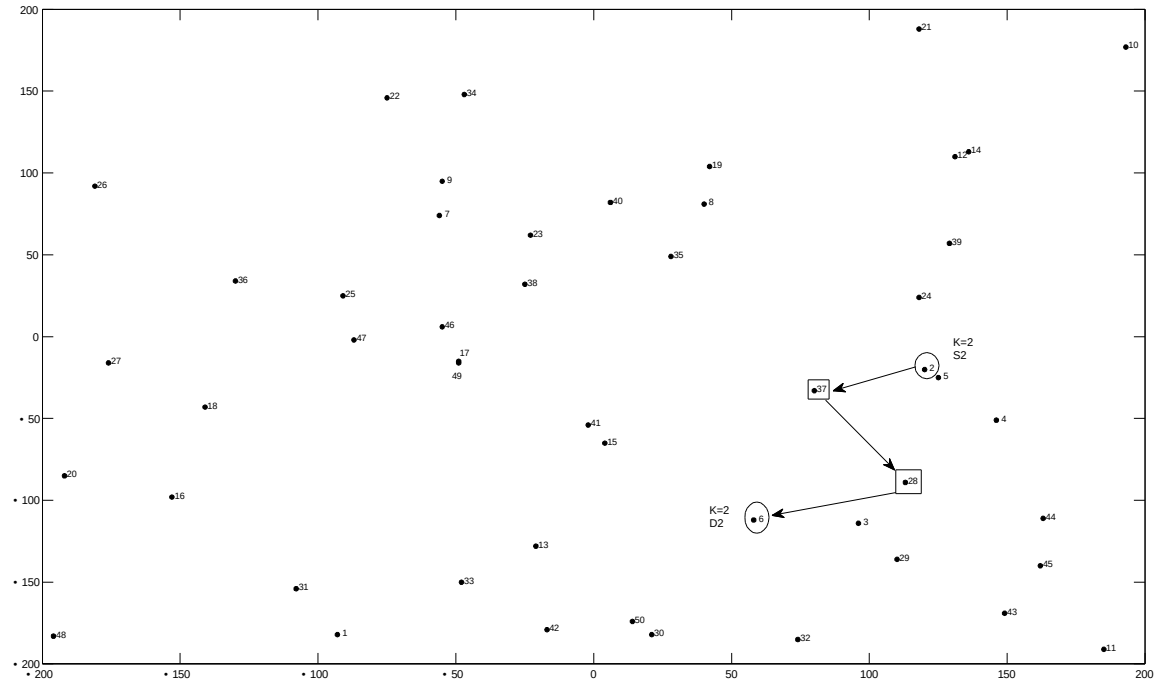
L_1 ve K_1 durumunda N_1 düğümü (S^1_1) 100 bitlik veriyi üreterek bir kısmını N_{31} , N_{16} , N_{20} , N_{27} , N_{36} , N_7 , N_{40} düğümleri üzerinden, bir kısmını N_{31} , N_{16} , N_{18} , N_{47} , N_{38} , N_{35} düğümleri üzerinden, bir kısmını da N_{31} , N_{16} , N_{18} , N_{25} düğümleri üzerinden N_5 düğümüne (D^1_5) gönderir (Şekil 5.13).



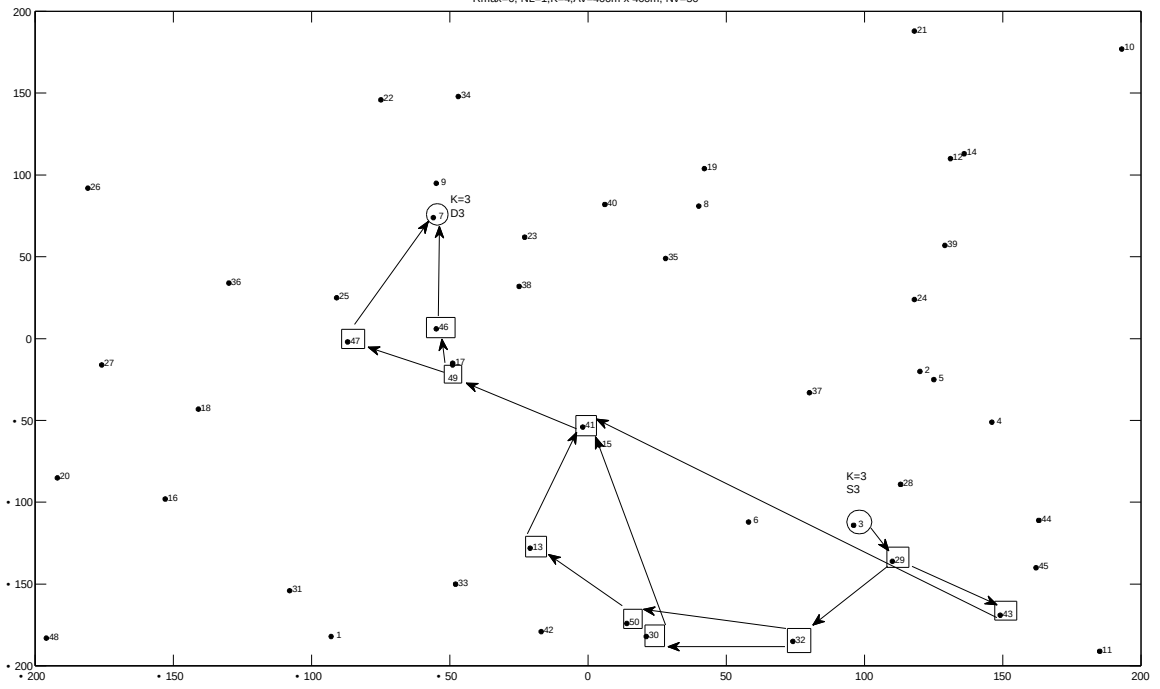
Şekil 5.13 $N_v=50$, $N_L=1$, K_1 , $A_v=400$ m x 400 m için S_{11} - D_{15} arasında veri iletimi

L_1 ve K_2 durumunda N_2 düğümü (S_2^2) 100 bitlik veriyi üreterek N_{37} , N_{28} düğümleri üzerinden N_6 düğümüne (D_6^2) gönderir (Şekil 5.14).

L_1 ve K_3 durumunda N_3 düğümü (S_3^3) 100 bitlik veriyi üreterek aradaki birçok düğüm üzerinden N_7 düğümüne (D_7^3) gönderir (Şekil 5.15).

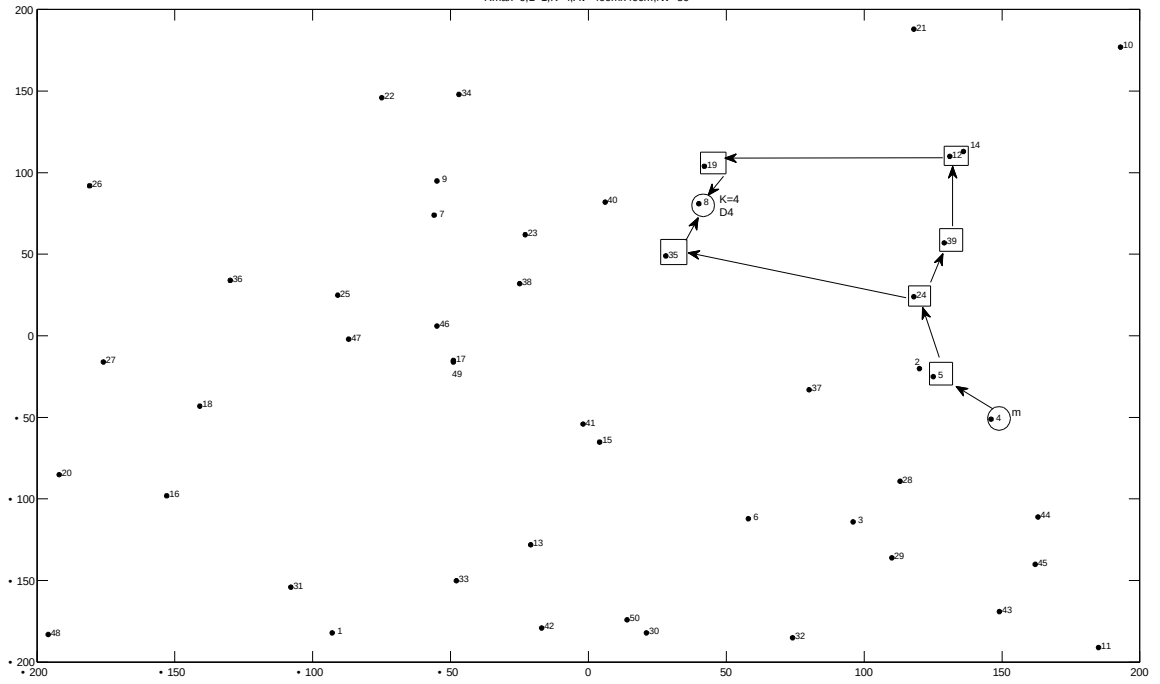


Şekil 5.14 $N_v=50$, $N_L=1$, K_2 , $A_v=400$ m x 400 m için S_{22} - D_{26} arasında veri iletimi



Şekil 5.15 $N_V=50$, $N_L=1$, K_3 , $A_V=400$ m x 400 m için S_{33} - D_{37} arasında veri iletimi

L_1 ve K_4 durumunda N_4 düğümü (S^4_4) 100 bitlik veriyi üreterek aradaki birçok düğüm üzerinden N_8 düğümüne (D^4_8) gönderir (Şekil 5.16).



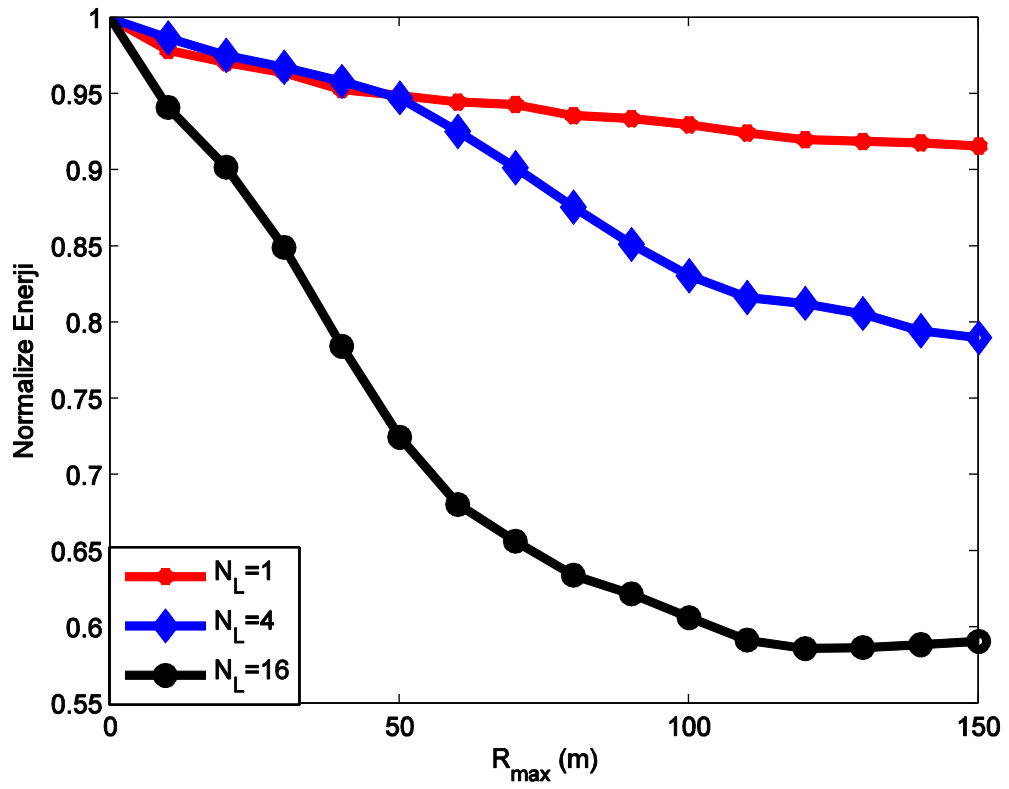
Şekil 5.16 $N_V=50$, $N_L=1$, K_4 , $A_V=400$ m x 400 m için S_{44} - D_{48} arasında veri iletimi

5.9. Sabit Kaynak-Hedef Arasında Veri İletimi için Harcanan Enerji Değerleri

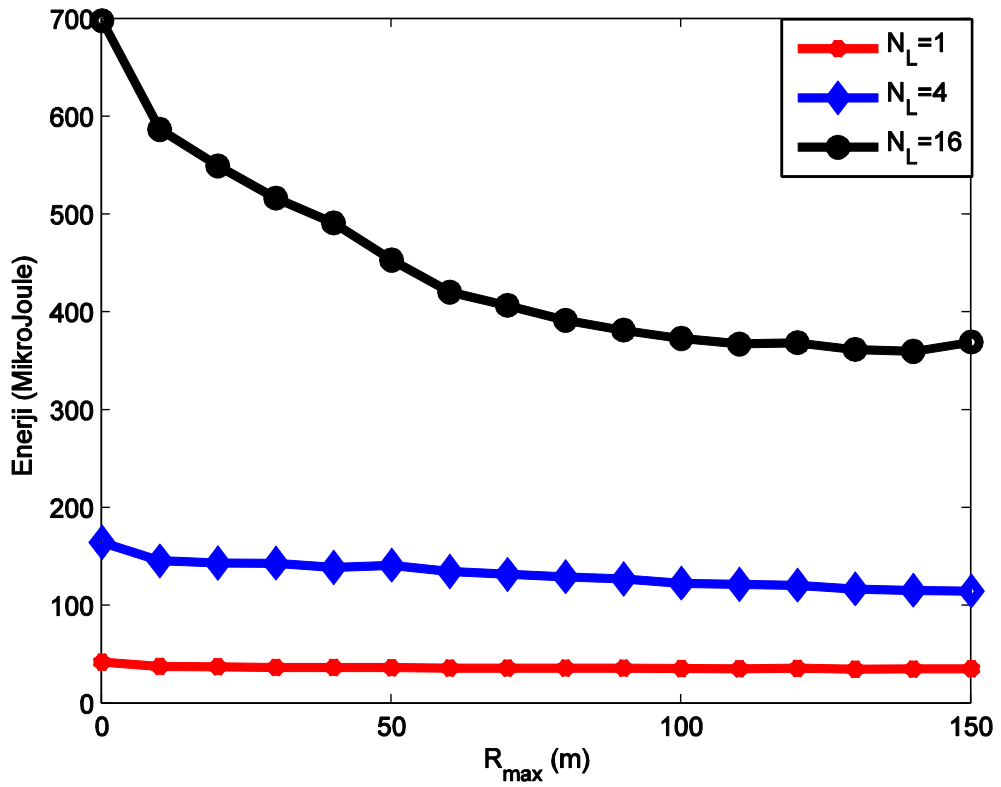
Yukarıda sabit olarak belirlenen 4 adet kaynak-hedef çifti ($N_K=4$) arasında veri iletim biçimini her K değeri için ayrıntılı olarak verdik. Sabit kaynak-hedef çiftleri (Tablo 5.6) için simülasyonun birden fazla çalıştırılması sonucunda elde edilen değerlerin görsel etkilerini grafikler üzerinde gözlemledik.

Tablo 5.6. Sabit kaynak-hedef arasında veri iletimini sağlayan model çalıştırma parametreleri

Model adı	Sabit Kaynak-Hedef Arasında Veri İletimi için Harcanan Enerji Değerleri
Modelin çalıştırma sayısı	100 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için)
N_L	10 (Her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için sabit)
A_v	400 m x 400 m (Her bir eğri için sabit)
N_v	50 (Her bir eğri için sabit)
R_{max}	0-150 m (Değişken)
N_K	4 (Her bir eğri için sabit)
$S^1-S^2-S^3-S^4$	$N_1-N_2-N_3-N_4$ (Kaynaklar her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için sabit)
$D^1-D^2-D^3-D^4$	$N_5-N_6-N_7-N_8$ (Hedefler her bir eğrideki her bir R_{max} değeri için sabit)
Topoloji	Simülasyon başlangıcında rastgele
ρ	50 nJ/bit
ε	100 pJ/bit/m ²
α	2



Şekil 5.17 $N_v=50$, $N_K=4$, $N_L=1$, $N_L=4$, $N_L=16$, $A_v=400$ m x 400 m için normalize enerji değerleri



Şekil 5.18 $N_v=50$, $N_K=4$, $N_L=1$, $N_L=4$, $N_L=16$, $A_v=400$ m x 400 m için normal enerji değerleri

5.10. Sabit Kaynak-Hedef için Elde Edilen Analiz Grafiklerinin Yorumlanması

- 1- Kaynaklar sabit olmasına rağmen hareketlilik ile beraber düğümlerin normalize enerjilerinde bir düşüş gözlemlenmiş, yük daha dengeli hale gelmiş (Şekil 5.17) ve enerji tüketimlerinde bir düşüş olmuştur (Şekil 5.18).
- 2- N_L parametresinin büyük değerlerinde yük dengeleme yüzdesi daha yüksektir (Şekil 5.17).
- 3- N_L parametresinin büyük değerlerinde harcanan enerji değerleri daha yüksektir (Şekil 5.18).
- 4- N_L parametresinin artmasıyla tekli kaynak-hedef arasındaki ilettime benzer yük dengeleme eğrileri elde edilmiştir.
- 5- Burada elde edilen sonuçlar tekli kaynak-hedef çifti için elde edilen sonuçlara benzerdir. Bu benzerlik gayet normaldir. Çoklu kaynaklarda tüketilen enerji değerlerindeki artış da normaldir.

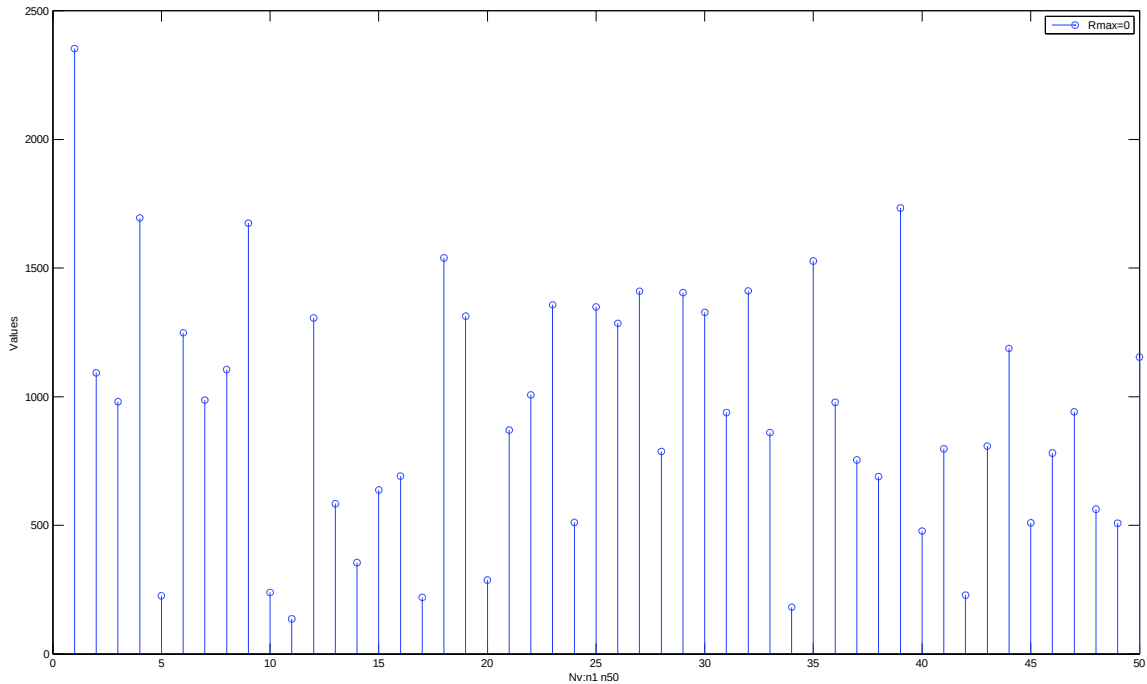
5.11. Yük Dengeleme ve Taşınan Veri İlişkisi

Dinamik ağ yapısına bağlı olarak değişen kaynak-hedef çiftlerinin arasındaki veri iletişimi birden fazla düğüm üzerinde gerçekleşir. Simülasyonun tüm evrelerinde iletişimde görev alan düğümler daha fazla veri transfer etmek durumunda kaldıklarından dolayı daha fazla enerji harcamaları da kaçınılmazdır. Bundan dolayı taşınan veri ile harcanan enerji arasında bir ilişki söz konusudur. Hareketliliğin olduğu ağ yapılarında yük dengeleme ile taşınan veri arasında da bir ilişki söz konusudur. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da sözkonusu ilişki grafiksel olarak gösterilmektedir.

Sözkonusu ilişki incelenirken simülasyonda yer alan tüm düğümlerin N_L an sayısına ulaşana kadar geçen her L anında gönderdikleri verilerin toplamı alınmıştır. Tekli kaynak-hedef çiftine ait bir simülasyonda N_L an sayısı kadar yani $N_L * 100$ bit veri taşınır. Taşınan bu veriler rastgele seçilen kaynak düğümden yine rastgele seçilen hedef düğüme gönderilir. Bu esnada aradaki birçok düğüm optimizasyon çerçevesinde görev alır. Hareketliliğin olmadığı statik durumda ($R_{max}=0$) düğümlerin yeri sabit olduğundan dolayı seçilen kaynak-hedef çiftine bağlı olarak aradaki düğümlerin aynı olmasının ihtimali daha yüksektir. Bu tür düğümler üzerinde daha fazla veri taşınmaktadır. Düğümlerin veri gönderirken daha fazla enerji harcadığı esasına bağlı olarak $N_v=50$, $N_L=100$, $A_v=400 \times 400 \text{ m}^2$, en fazla yer değiştirme yarıçapı $R_{max}=0$, $N_K=1$ parametrelerinin kullanıldığı bir

simülasyon çalıştırılmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen veriler Excel ortamına aktarılarak veri göndermedeki ağırlıkları hesaplanmıştır. Simülasyon boyunca her bir düğümün tüm L anları boyunca gönderdikleri verilerin toplamına ait şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Statik durumda yük dengeleme olmadığından, bazı düğümler çok daha fazla veri transfer etmek durumunda kalmışlardır. Örneğin N_1 , N_{39} ve N_4 düğümleri sırasıyla 2352.9766, 1733.0411 ve 1694.6715 bit transfer etmiştir. Toplam 50 olan düğümlerin yarısı ortalamanın altında veri transfer etmişlerdir (Şekil 5.19).
2. Yüksek bit transfer eden düğümlerin enerjisi çok daha erken bitecek ve ağırlı fonksiyonel çalışma durumu ortadan kalkacaktır. Ayrıca bazı düğümlerin transfer işleminde daha az yer almış olması enerji dengesizliğine neden olmaktadır.

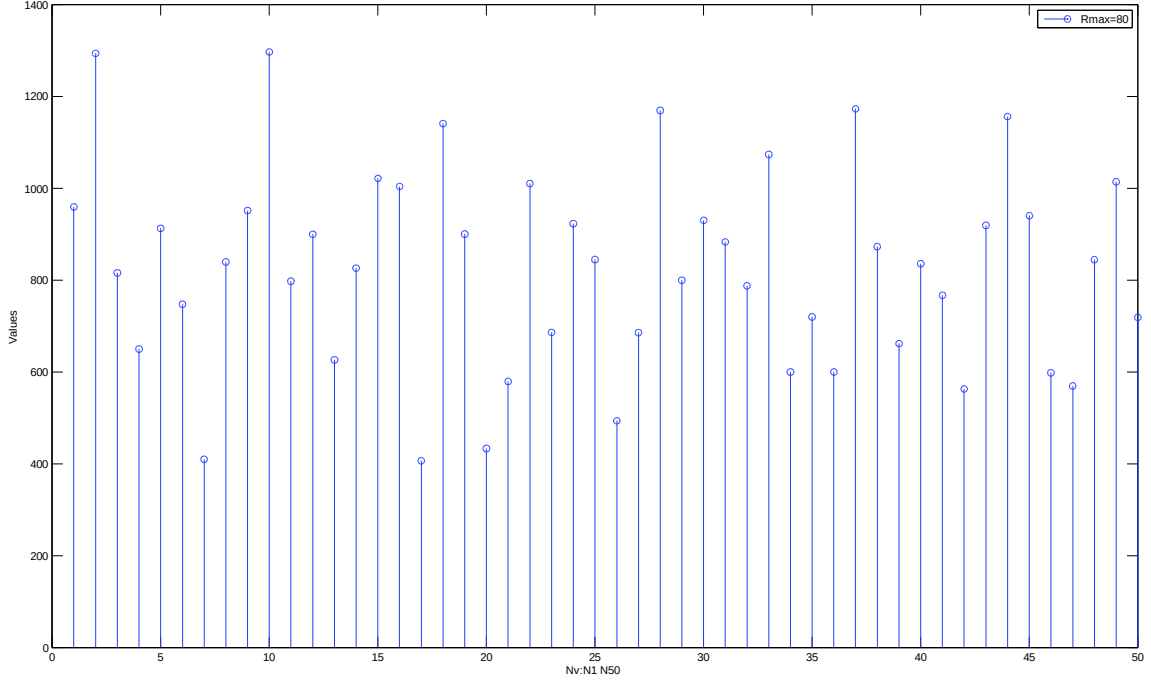


Şekil 5.19 $N_v=50$, $N_L=100$, $A_v=400$ m x 400 m, $R_{max}=0$, $N_K=1$ için bit transfer grafiği

Hareketliliğin olduğu bir durumda ($R_{max}=80$) aynı parametreler ile elde edilen veri transfer grafiği Şekil 5.20’de gösterilmiştir.

1. Hareketlilikten dolayı düğümler yük dengelemeden faydalanmışlardır. 50 adet düğümün tamamı veri transfer işleminde daha dengeli görev almışlardır. En fazla veriyi N_{10} , N_2 ve N_{37} nolu düğümler sırasıyla 1296.8247, 1293.8462 ve 1172.9507 bit olarak göndermişlerdir (Şekil 5.20).

2. Hareketliliğin bir sonucu olarak yük dengelemenin sağladığı bu fayda grafiğın daha düzgün dolayısıyla ağıın daha uzun ömürlü olmasına neden olmuştur.



Şekil 5.20 $N_v=50$, $N_L=100$, $A_v=400$ m x 400 m, $R_{max}=80$, $N_K=1$ için bit transfer grafiğı

5.12. Kaynak-Hedef Arasındaki Mesafeler

Bir simülasyon çalıştırıldığında verilen parametrelere bağlı olarak başlangıçta yapılan işlemlerden birisi de tüm sensörlerin birbirleri ile olan mesafe bilgileridir. Ağ ortamında iki sensör arasındaki mesafe hesaplanırken (3.9) denklemi kullanılmaktadır. Simülasyon sonunda elde edilen çıkış bilgileri ile bu mesafeleri görmek mümkündür. Yaptığımız çalışmada bu tür bilgileri kolaylıkla alabilmekteyiz.

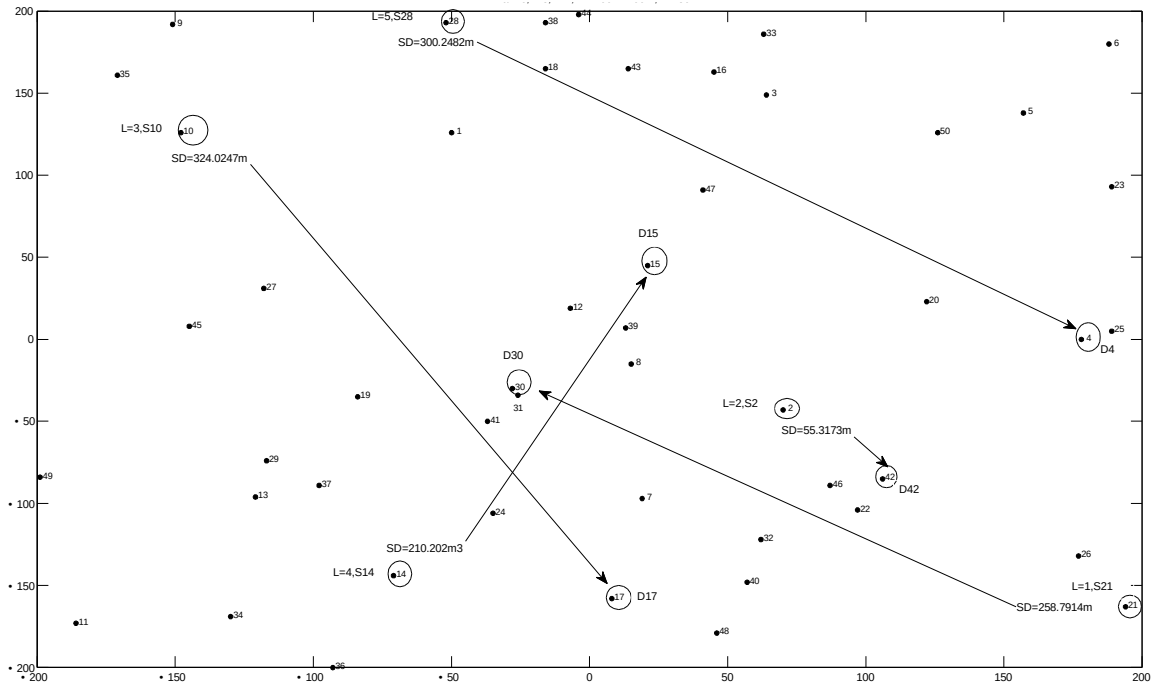
Hareketlilik yarıçapı ($R_{max}=0$), düğüm sayısı ($N_v=50$), ağ alanının büyüklüğü ($A_v=400 \times 400$ m²), kaynak-hedef çifti sayısı ($N_K=1$) ve an sayısı ($N_L=5$) için simülasyon çalıştırılarak Tablo 5.7'deki kaynak hedef çiftleri arasında veri iletimi gerçekleştirilmiştir. N_K parametresinin 1 olarak alınması her L anında tek bir kaynak-hedef çifti arasında iletişim yapılacağı anlamına gelmektedir. $N_L=5$ olarak alındığında simülasyon boyunca 5 adet kaynak-hedef çifti arasında 5*100 bit veri iletileceğini ve sonuçta tek bir enerji değeri üretileceğini ifade etmektedir. Aynı tabloda kaynak-hedef çiftlerinin arasındaki mesafeler de gösterilmiştir. Tablo 5.7'de L_1 için N_{21} düğümü kaynak (S_{21}^1), N_{30} düğümü ise hedef (D_{30}^1) olarak seçilmiştir. Kaynak ile hedef arasındaki direkt mesafe ise

258.7914 m olarak hesaplanmıştır. Tüm L anları için kaynak-hedef çiftleri mevcut düğümler arasında rastgele seçilmişlerdir.

Tablo 5.7. $R_{\max}=0$, $N_V=50$, K_1 ve $N_L=5$ için Kaynak-Hedef çiftleri ve aralarındaki mesafeler

L	K	S (Kaynak)	D (Hedef)	S(L,K) Bit	Mesafe_SD (m)
1	1	21	30	100	258.7914
2	1	2	42	100	55.3173
3	1	10	17	100	324.0247
4	1	14	15	100	210.2023
5	1	28	4	100	300.2482
Ortalama-SD (m)					229.7168

Tablo 5.7’de yer alan kaynak-hedef çiftlerinin sensör alanındaki görüntüleri ve her L anı için aralarındaki mesafeler Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Söz konusu şekilde 50 adet sensörün statik durumdaki ($R_{\max}=0$) yerleşimleri ve her L anı için seçilen kaynak-hedef çiftleri aynı grafikte işaretlenmiştir.



Şekil 5.21 $N_L=5$ için kaynak-hedef çiftlerinin konumları ve aralarındaki mesafeler

5.13. Ağırlıklı Mesafe Ortalaması

Veri iletiminde görev alan düğümlerin ağırlıklı mesafe ortalaması (5.7) deki gibi hesaplanmıştır.

$$A_{vg}-d_{ij}(L,K)=\text{sum}(f_{ij}(L,K)*d_{ij}(L,K)/100) \quad (5.7)$$

Buna göre hareketlilik yarıçapı ($R_{\max}=0-150$ m), düğüm sayısı ($N_v=50$), düğüm yerleşim alanı ($A_v=400 \times 400$ m²), kaynak sayısı ($N_K=1$) ve an sayısı ($N_L=100$) için oluşturulan simülasyon her bir $R_{\max}$ değeri için çalıştırılarak, her L anı için kaynak-hedef uzaklığı, her L anı için (5.7) ile ağırlıklı mesafe ortalaması hesaplanmış ve $N_L=100$ için enerjilerin ortalaması da alınarak elde edilen sonuçlar Tablo 5.8 'de verilmiştir.

Ayrıca her $R_{\max}$ değeri için çalıştırılan simülasyona ait enerji değerlerinin normalize karşılıkları da Tablo 5.9' da verilmiştir.

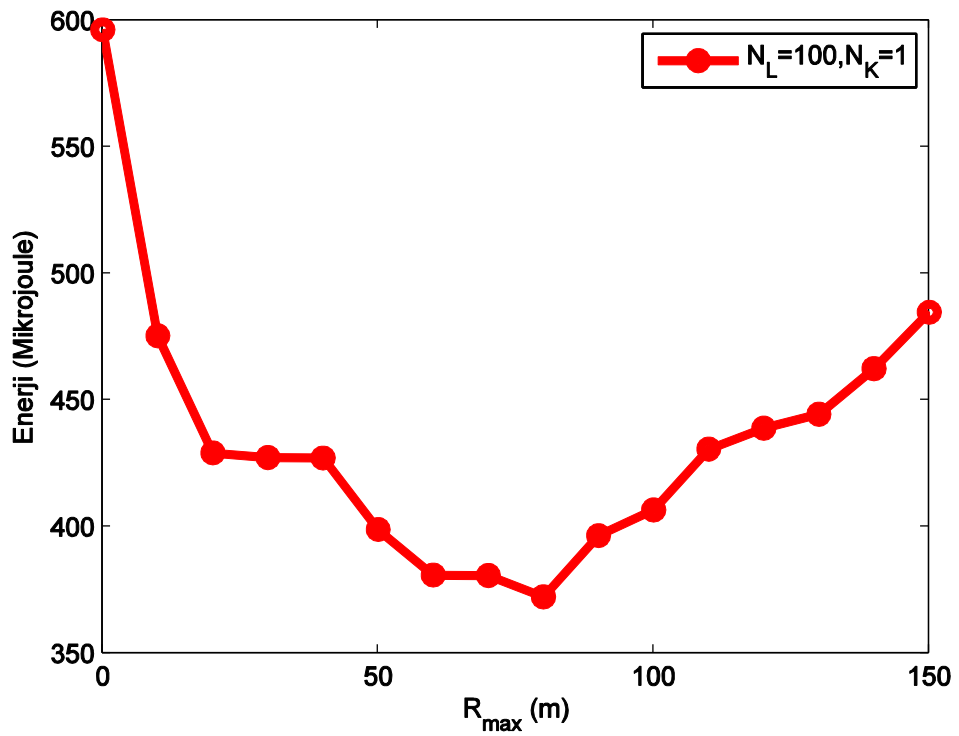
Tablo 5.8. $R_{\max}=0-150$ m, $N_v=50$, $N_K=1$ ve $N_L=100$ için Ağırlıklı mesafe ortalaması

$R_{\max}$ (m)	Enerji (Mikrojoule)	Avg-dij (m)	$f(i,j,L)$ bit	$d(i,j,L)$ (m)
0	596.31	845.47	2352.977	1307.931
10	475.43	668.6816	1618.04	997.2105
20	429.11	609.4375	1452.522	1037.82
30	427.3	611.7014	1392.656	1044.428
40	427.1	597.4832	1416.544	884.0433
50	398.84	544.7495	1182.354	913.6887
60	380.82	535.6977	1191.184	850.7535
70	380.72	531.2493	1102.93	851.3966
80	372.25	544.1828	1296.825	879.1461
90	396.5	560.3502	1276.36	809.7675
100	406.59	561.0454	1203.497	965.178
110	430.66	601.3733	1214.025	868.1492
120	438.91	593.7978	1348.944	900.9925
130	444.41	617.4278	1327.144	957.5544
140	462.4	618.9439	1350.226	958.2579
150	484.7	646.7411	1256.23	969.3615

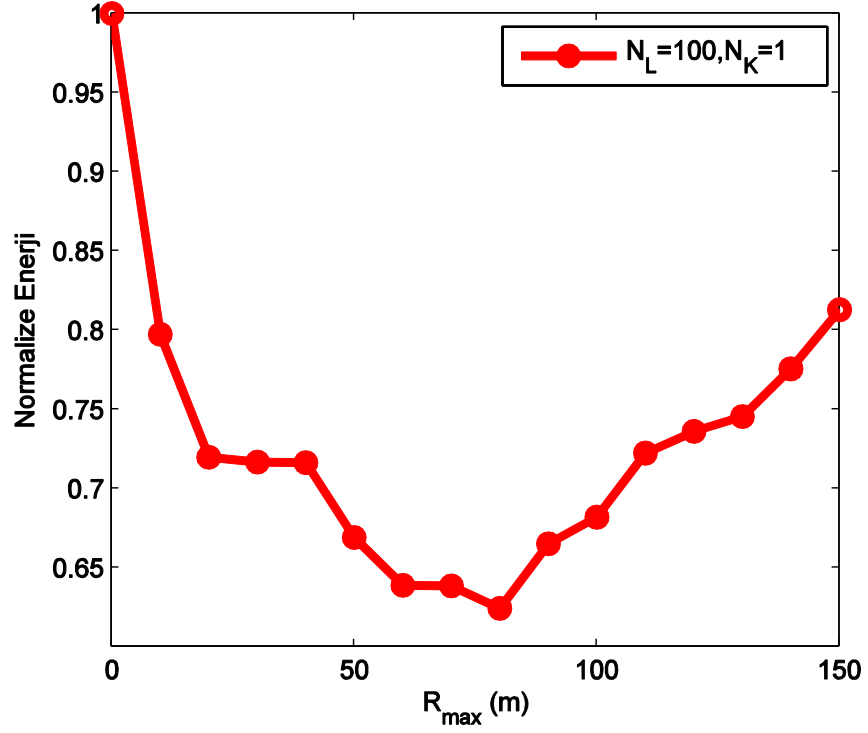
$R_{\max}=0-150$ m, $N_v=50$, $A_v=400$ m x 400 m, $N_K=1$ ve $N_L=100$ için çalıştırılan simülasyona ait; normal enerji değerleri- $R_{\max}$ grafiği Şekil 5.22 de, normalize enerji değerleri- $R_{\max}$ grafiği Şekil 5.23 te, normal enerjiler- $R_{\max}$ ve Ağırlıklı mesafe ortalaması- $R_{\max}$ grafiği Şekil 5.24' te, normal enerjiler- $R_{\max}$ ve d_{ij} mesafe ortalaması- $R_{\max}$ grafiği Şekil 5.25 te gösterilmiştir.

Tablo 5.9. $R_{\max}=0-150$ m, $N_K=1$ ve $N_L=100$ için normalize değerler

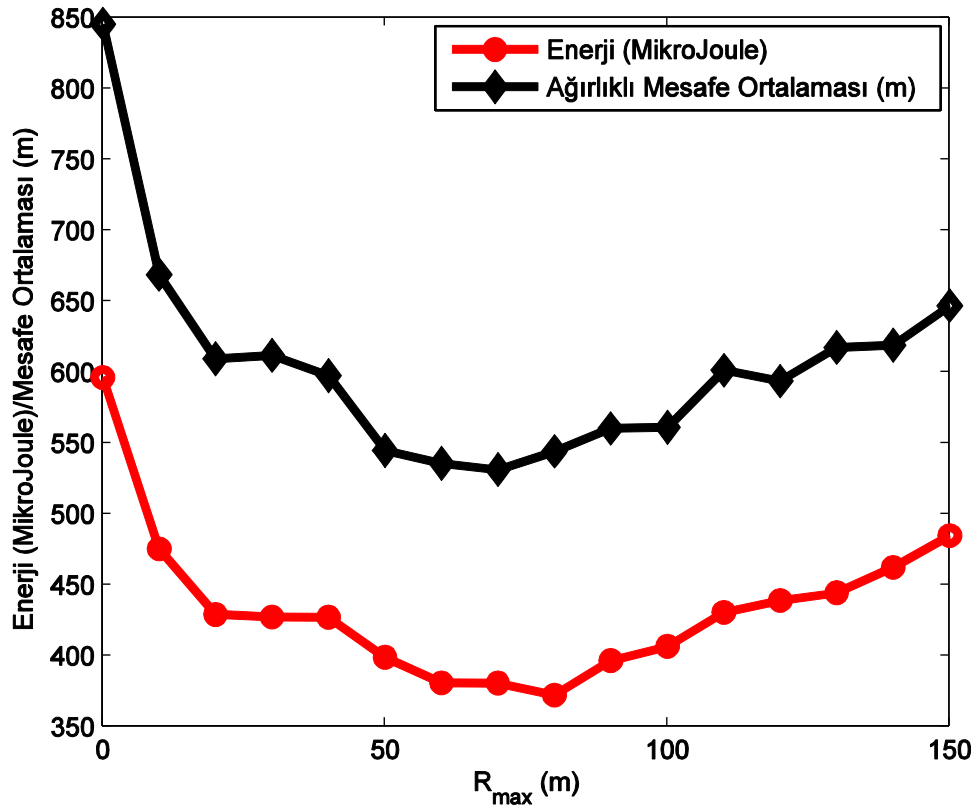
Hareketlilik Yarıçapı- $R_{\max}$ (m)	Normalize Enerji Değerleri
0	1
10	0.797287
20	0.719609
30	0.716574
40	0.716238
50	0.668847
60	0.638628
70	0.63846
80	0.624256
90	0.664923
100	0.681843
110	0.722208
120	0.736043
130	0.745267
140	0.775436
150	0.812832



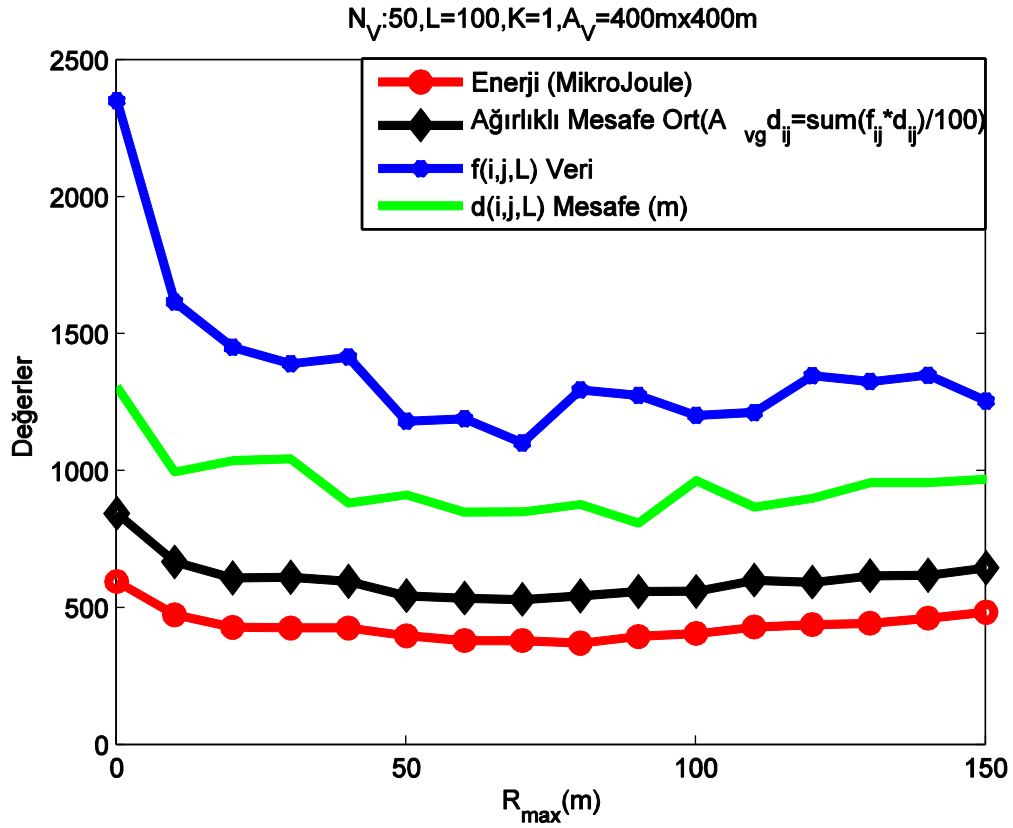
Şekil 5.22 $R_{\max}=0-150$ m, $N_v=50$, $A_v=400$ m x 400 m için normal enerji değerleri



Şekil 5.23 $R_{\max}=0-150\text{m}$, $N_v=50$, $A_v=400\text{ m} \times 400\text{ m}$ için normalize değerler



Şekil 5.24 $R_{\max}=0-150\text{m}$, $N_v=50$, $A_v=400\text{ m} \times 400\text{ m}$, $N_K=1$ ve $N_L=100$ için enerjiler-ağırlıklı mesafe ortalaması

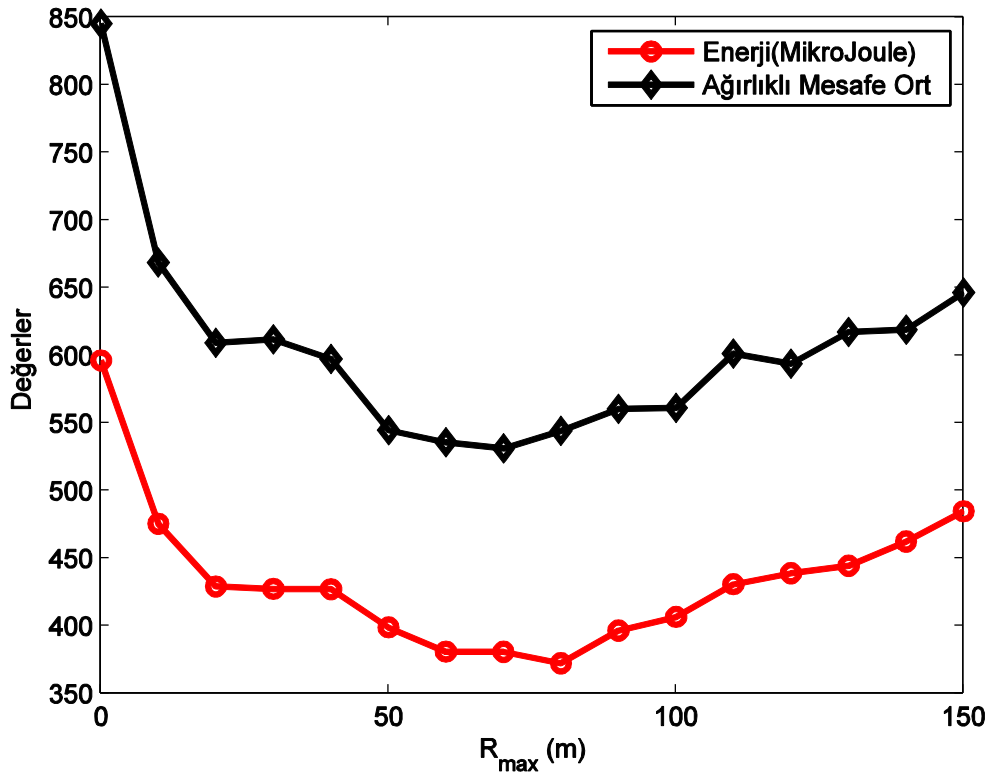


Şekil 5.25 $R_{max}=0-150m$, $N_v=50$, $A_v=400 m \times 400 m$, $N_K=1$ ve $N_L=100$

5.14. En Fazla Enerji Harcayan Düğümün Ağırlıklı Mesafe Ortalaması ile İlişkisi

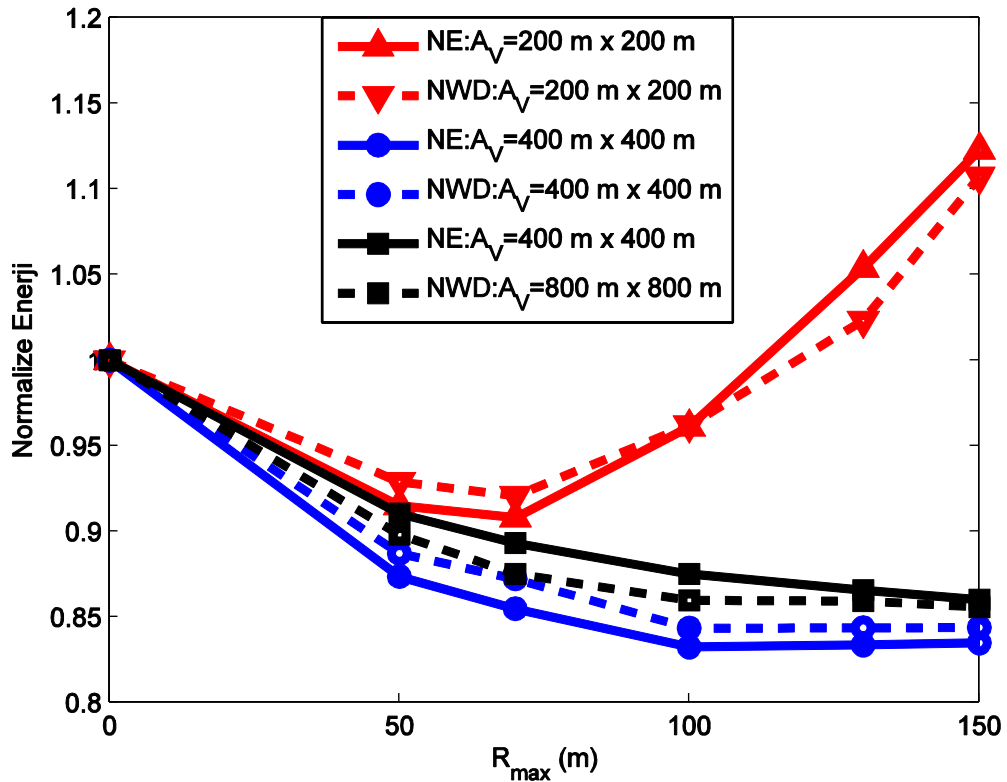
Optimizasyon problemi çözüldüğünde bulunan enerji, simülasyon boyunca en fazla enerji harcayan düğümün enerjisidir. $N_v=50$, $N_L=100$, $N_K=1$, $A_v=400 \times 400 m^2$ ve $R_{max}=0-150 m$ için çalıştırılan simülasyonda elde edilen en fazla enerji değeri ve bu enerji değerini tüketen düğümün R_{max} 'ın her bir değeri için ağırlıklı mesafe ortalaması Şekil 5.26' da gösterilmiştir.

Şekil 5.26' da gösterildiği gibi en fazla enerji harcayan düğüm enerjisi ile en fazla enerji harcayan düğümün ağırlıklı mesafe ortalaması arasındaki ilişki doğrusal olarak değişmektedir. Ağırlıklı mesafe ortalaması için (5.7) denklemi kullanıldı. Bu denkleme göre kaynaktan hedefe gönderilecek tüm verilerin ağırlıklı ortalaması alınmaktadır. İki düğüm arasındaki ağırlıklı mesafe şu şekilde hesaplandı: En fazla enerji harcayan i düğümünün j düğümüne göndereceği bit sayısı ile ij düğümleri arasındaki mesafe çarpımının 100'e bölümü. Simülasyonun tüm N_L anları boyunca en fazla enerji harcayan düğümün veri gönderdiği tüm diğer düğümlerin kendisine olan uzaklıkları dikkate alınır.



Şekil 5.26 $N_v=50$, $N_L=100$, $N_K=1$, $R_{max}=0-150$ için enerji-ağırlıklı mesafe ortalaması

Ayrıca farklı alanlar üzerinde analiz edilen normalize enerji-ağırlıklı mesafe ortalaması çiftleri Şekil 5.27 de gösterilmiştir.



Şekil 5.27 Farklı alanlar üzerinde analiz edilen enerji-ağırlıklı mesafe ortalaması

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, mobil kablosuz tasarsız sensör ağlarında hareketliliğin enerji tüketim karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırdık. Öncelikle sistem modelimizi tanımladık, kabullerimizi açıkça ifade ettik, optimizasyon problemini formüle ettik ve kablosuz mobil sensör ağlarında kurduğumuz lineer programlama çatısı altında; ortaklaşa veri yönlendirme, hareketlilik ve enerji tüketimini birleştirdik. Tasarım alanı geliştirilen lineer programlama çerçevesi ile çözülerek araştırıldı.

Optimizasyon probleminin çözümü için GAMS modelleme yazılımı ortamında ve matematiksel modeli çözecek kodu yazdık ve sonuçları sayısal olarak elde ettik. Elde ettiğimiz bu sayısal sonuçların grafik çizimleri için MATLAB yazılımını kullandık.

Yaptığımız çalışmada şu ana kadar çalışılmayan bir model kullandık. Modelimizde kablosuz sensör tasarsız ağlarda tekli kaynak-hedef ve çoklu kaynak-hedef çifti arasında ve simülasyonun tüm anları boyunca veri transferi gerçekleştirerek değişen enerji değerlerini araştırdık.

Yaptığımız çalışmada elde ettiğimiz analiz sonuçlarını şöyle sıralayabiliriz:

1. Tekli kaynak-hedef çiftinin kullanıldığı simülasyonlarda an sayısının yüksek tutulması yük dengelemeyi olumlu etkilemiş ve hareketlilik yarıçapı değerleri boyunca sürekli küçülen normalize enerji değerleri elde edilmiştir.
2. Benzer şekilde çoklu kaynak-hedef çiftinin kullanıldığı simülasyonlarda da an sayısının yüksek tutulması yük dengeleme üzerinde aynı olumlu etkiyi göstermiş ve tüketim enerjileri düşmüştür.
3. Çoklu kaynak-hedef çiftinin 4 olarak sabit tutulduğu ve kullanıldığı simülasyonlarda da an sayısının yüksek tutulması yük dengeleme üzerinde benzer olumlu etkiyi göstermiştir.
4. Çoklu kaynak-hedef çiftinin kullanıldığı simülasyonlarda an sayısının yüksek tutulduğu değerler için akım sayısının artırılması tüketilen enerjilerin artmasına neden olmakla beraber yük dengelemeyi olumlu bir şekilde etkilemiştir.
5. Bir simülasyon boyunca en fazla enerji harcayan düğümün ağırlıklı mesafe ortalaması ile tükettiği enerjisinin doğrusal olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

6. Çoklu kaynak-hedef çiftinin kullanıldığı simülasyonlarda akım sayısının 4 olarak sabit tutulması yük dengelemeyi olumsuz etkilememiştir. Aksine her an için değişen topolojiden dolayı normalize enerji değerleri hareketlilik yarıçapı değerleri boyunca küçülmüş ve ağ ortamında kaynaklardan hedeflere doğru dengeli bir şekilde verilerin taşınması sağlanmıştır.
7. Yük dengelemede rol alan önemli parametrelerden biri olan hareketlilik yarıçapının gereğinde fazla ya da daha az artırılması harcanan enerjiyi olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.
8. Belli bir alanda kullanılacak düğüm sayısının düşük tutulması (normalin altında olması) yük dengeleme üzerindeki etkisinin daha az olduğu, normal tutulması halinde ise daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.
9. Alanın olması gerekenden küçük tutulup hareketliliğin gereğinden fazla büyütülmesi de yük dengelemeyi olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.
10. Belli bir alanda düğüm sayısının yüksek tutulması ağın daha uzun ömürlü olmasını sağlamakta ve tüketilen enerjini düşük olmasına neden olmaktadır.
11. Ağın kendisi dinamik bir ağ olduğundan dolayı, mobilite değeri, düğümler arasındaki mesafe, veri taşıyan düğümler, farklı kaynak-hedef çiftleri ve alan büyüklüğü gibi birçok faktörün yük dengeleme üzerinde etkili olduğunu ifade edebiliriz.

Sonuçlarımız, hareketlilik seviyesinin mobil düğümlerin enerji tüketimleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir.

Gerçekten de, optimal koşullarda hareketlilik mobil kablosuz ağların enerji verimliliğini artırabilir. Ancak, aşırı hareketlilik ağın enerji verimliliğini düşürebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akyildiz, I. F and Vuran, M. C., 2010.** Wireless Sensor Networks, 2010 John Wiley & Sons Ltd.
- [2] **Sarkar, K., S., Basavaraju, T. and Puttamadappa, C., 2008.** Ad Hoc Mobile Wireless Networks Principles, Protocols, and Applications, 2008 by Taylor & Francis Group, LLC
- [3] **Jorge Sá Silva, Bhaskar Krishnamachari, Fernando Boavida, 2010.** Wireless Sensor Networks 7th European Conference, EWSN 2010 Coimbra, Portugal, February 17-19, 2010 Proceedings, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [4] **Çayırıcı, E. and Rong, C., 2009.** Security in wireless Ad Hoc and Sensor Networks, John Wiley & Sons , Ltd.
- [5] **Santi, P., 2005.** Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, John Wiley & Sons , Ltd.
- [6] **Jamalipour, A. and Ma, Y., 2011,** Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks from routing to content distribution, Springer New York, Dordrecht Heidelberg London
- [7] **Dvir, A. and Segal M., 2006,** Placing and Maintaining a Core Node in Wireless Ad Hoc Sensor Networks, 6th International IFIP-TC6 Networking Conference Proceedings Atlanta, GA, USA, May 14-18, 2007
- [8] **Bakht, H.,** Wireless Infrastructure Sensor networks and ad-hoc networking,
<http://www.computingunplugged.com/issues/issue200410/00001398001.html>, 15 Mart 2012.
- [9] **Wang, B. et al, 2009.** Energy Efficient Information Processing in Wireless Sensor Networks, pp 1-26. Eds. Misra, S, et al. Guide to Wireless Sensor Networks, Computer Communications and Networks, Springer-Verlag London Limited 2009.
- [10] **Ananthram Swami, Qing Zhao, Yao-Win Hong, Lang Tong, 2007.** Wireless Sensor Networks Signal Processing and Communications Perspectives, John Wiley & Sons Ltd.
- [11] **XiangYang Li, 2008.** Wireless Ad Hoc and Sensor Networks Theory and Applications, Cambridge University Press 2008.
- [12] **Gianluigi Ferrari, 2010.** Sensor Networks Where Theory Meets Practice, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [13] **Jagannathan Sarangapani, 2007.** Wireless Ad Hoc and Sensor Networks Protocols, Performance, and Control, Taylor & Francis Group, LLC
- [14] **B. Tavli, W.B. Heinzelman, 2006.** Mobile Ad Hoc Networks: Energy- Efficient Real-Time Group Communications, Springer, 2006, ISBN 1-4020-4632-4.
- [15] **Tavli, B., Akgun, M.B, Bicakci, K., 2011.** Impact of Limiting Number of Links on the Lifetime of Wireless Sensor Networks, IEEE Communications Letters, Vol.15, No.1.
- [16] **R. Madan, S. Lall, 2006.** Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks, IEEE Transactions and Wireless Communications 5 (2006) 2185–2193.

- [17] **Tavli, B., Kayaalp, M., Ceylan, O. and Bagci, İ., E.,** 2010. Data processing and communication strategies for lifetime optimization in wireless sensor Networks. *International Journal of Electronics and Communications* 64 (2010) 992–998.
- [18] **Bıçakçı, K. and Tavlı, B.,** 2009. Prolonging network lifetime with multi-domain cooperation strategies in wireless sensor Networks, *Ad Hoc Networks* 8 (2010)
- [19] **R. Ramanathan and R. Hain,** 2000. Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment, *Proc. IEEE INFOCOM*, 2000.
- [20] **V. Rodoplu and T. Meng,** 1998. Minimum Energy Mobile Wireless Networks, *Proc. IEEE Int'l Conf. Comm. (ICC)*.
- [21] **C. Efthymiou, S. Nikolettseas, and J. Rolim,** 2004. Energy Balanced Data Propagation in Wireless Sensor Networks, *Proc. 18th Int'l Parallel and Distributed Processing Symp. (IPDPS)*.
- [22] **Frye, L. and Cheng, L.,** 2009. Topology Management for Wireless Sensor Networks, pp 27-46. Eds. Misra, S, et al. *Guide to Wireless Sensor Networks, Computer Communications and Networks*, Springer-Verlag London Limited 2009.
- [23] **Frey H. et.al.,** 2009. Routing in Wireless Sensor Networks, pp 81-112. Eds. Misra, S, et al. *Guide to Wireless Sensor Networks, Computer Communications and Networks*, Springer-Verlag London Limited 2009.
- [24] **Yoon, J., Liu, M. and Noble, B.,** 2003. Sound Mobility Models, *Mobicom'03*, September, 14-19, 2003, San Diego, California, USA.
- [25] **Claussen, H.,** 2006. Distributed Algorithms for Robust Self-deployment and Load Balancing in Autonomous Wireless Access Networks, *Communications, ICC '06. IEEE International Conference*
- [26] **Gowrishankar, S., Basavaraju, TG. and Sarkar, SK.,** 2007, Effect of Random Mobility Models Pattern in Mobile Ad hoc Networks, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, VOL.7 No.6, June
- [27] **Schumacher, A., Haanp, H. and Schaeffer, SE., Orponen, P.,** Load Balancing by Distributed Optimisation in Ad Hoc Networks
- [28] **Zhu, Y., Zhong X., Shi, j.,** 2006, The Design of Wireless Sensor Network System Based on ZigBee Technology for Greenhouse, *Journal of Physics:Conference Series* 48 1195–1199
- [29] **M.A. Labrador, P.M. Wightman,** *Topology Control in Wireless Sensor Networks*, Springer Science Business Media B.V. 2009
- [30] <http://www.rfm.com/>
- [31] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf
- [32] **Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.,** 2002. A survey of mobility models for ad hoc network research, *Wireless Communications And Mobile Computing* 2:483–502
- [33] **Cho, H.K, ve ark,** 2005. A load-balancing routing considering power conservation in wireless ad hoc networks: In *Proc. of 16th international workshop on database and expert systems Applications*. 128-132.
- [34] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- [35] **Ba Vindra K. Ahuja, Thomas L. Magnant, James B. Orlin,** 1993. *Network Flows Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice-Hall, Inc.
- [36] <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>, 15 Mart 2012.

- [37] <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/mica2.html>, 15 Mart 2012.
- [38] **I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci.** Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, March 2002.
- [39] **Eiselt, H.A. and sandblom, C.,L.** 2007. *Linear Programming and its Applications*, spring-verlag Berlin Heidelberg 2007
- [40] **T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, L. Gu, G. Zhou, J. Hui, and B. Krogh.** VigilNet: an integrated sensor network system for energy-efficient surveillance. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2(1):1–38, February 2006.
- [41] **J. Agre and L. Clare.** An integrated architecture for cooperative sensing networks. *IEEE Computer Magazine*, 33(5):106–108, May 2000.
- [42] **E. A. Basha, S. Ravela, and D. Rus.** Model-based monitoring for early warning flood detection. In *Proceedings of ACM SenSys’08*, pp. 295–308, Raleigh, NC, USA, November 2008.
- [43] **M. Bhardwaj, T. Garnett, and A. P. Chandrakasan.** Upper bounds on the lifetime of sensor networks. In *Proceedings of IEEE ICC’01*, volume 3, pp. 785–790, Helsinki, Finland, June 2001.
- [44] **P. Bonnet, J. Gehrke, and P. Seshadri.** Querying the physical world. *IEEE Personal Communications*, 7(5):10–15, October 2000.
- [45] **A. Cerpa, J. Elson, M. Hamilton, and J. Zhao.** Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology. In *Proceedings of ACM SIGCOMM’01*, pp. 20–41, Costa Rica, April 2001.
- [46] **W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan.** Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *Proceedings of MobiCom’99*, pp. 174–185, Seattle, WA, USA, August 1999.
- [47] **C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin.** Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of MobiCom’00*, pp. 56–67, Boston, MA, USA, August 2000
- [48] **C. Jaikaeo, C. Srisathapornphat, and C. Shen.** Diagnosis of sensor networks. In *Proceedings of IEEE ICC’01*, volume 5, pp. 1627–1632, Helsinki, Finland, June 2001.
- [49] **P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. S. Peh, and D. Rubenstein.** Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 36(5): 96–107, 2002.
- [50] **J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister.** Next century challenges: mobile networking for “smart dust”. In *Proceedings of ACM MobiCom’99*, pp. 271–278, Seattle, WA, USA, August 1999.
- [51] **A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson.** Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of ACM WSN’02*, Atlanta, GA, USA, September 2002.
- [52] **S. Slijepcevic and M. Potkonjak.** Power efficient organization of wireless sensor networks. In *Proceedings of IEEE ICC’01*, Helsinki, Finland, June 2001.
- [53] **R. Szewczyk, E. Osterweil, J. Polastre, M. Hamilton, A. Mainwaring, and D. Estrin.** Application driven systems research: habitat monitoring with sensor networks. *Communications of the ACM Special Issue on Sensor Networks*, 47(6):34–40

- [54] **B. Warneke, B. Liebowitz, and K. S. J. Pister.** Smart Dust: communicating with a cubic-millimeter computer. *IEEE Computer*, 34(1):2–9, January 2001.
- [55] **G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Ruiz, O. Marcillo, J. Johnson, J. Lees, and M. Welsh.** Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE internet Computing*, 10(2):18–25, March/April 2006.
- [56] **P. Zhang, C. Sadler, S. Lyon, and M. Martonosi.** Hardware design experiences in ZebraNet. In *Proceedings of ACM SenSys’04*, Baltimore, MD, USA, November 2004.
- [57] **A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson.** Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of ACM WSNA’02*, Atlanta, GA, USA, September 2002.
- [58] **R. Szewczyk, E. Osterweil, J. Polastre, M. Hamilton, A. Mainwaring, and D. Estrin.** Application driven systems research: habitat monitoring with sensor networks. *Communications of the ACM Special Issue on Sensor Networks*, 47(6):34–40
- [59] **T. Gao, C. Pesto, L. Selavo, Y. Chen, J. G. Ko, J.H. Lim, A. Terzis, A. Watt, J. Jeng, B. r. Chen, K. Lorincz, and M. Welsh.** Wireless medical sensor networks in emergency response: implementation and pilot results. In *Proceedings of IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security*, pp. 187–192, Waltham, MA, USA, May 2008.
- [60] **D. Malan, T. Fulford-Jones, M. Welsh, and S. Moulton.** CodeBlue: an Ad Hoc sensor network infrastructure for emergency medical care. In *Proceedings of Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems (WAMES 2004)*, Boston, MA, USA, June 2004.
- [61] **M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi.** The flooding time synchronization protocol. In *Proceedings of ACM SenSys’04*, Baltimore, MD, USA
- [62] **I. Rhee, A. Warriier, M. Aia, and J. Min.** Z-mac: a hybrid mac for wireless sensor networks. In *Proceedings of ACM SenSys’05*, pp. 90–101, San Diego, CA, USA.
- [63] **A. Wood, G. Virone, T. Doan, Q. Cao, L. Selavo, Y. Wu, L. Fang, Z. He, S. Lin, and J. Stankovic.** ALARMNET: wireless sensor networks for assisted-living and residential monitoring. Technical report CS-2006-11, Department of Computer Science, University of Virginia, 2006.
- [64] **Y. Kim, T. Schmid, Z. M. Charbiwala, J. Friedman, and M. B. Srivastava.** NAWMS: Nonintrusive Autonomous Water Monitoring System. In *Proceedings of ACM SenSys’08*, pp. 309–322, Raleigh, NC, USA, November 2008.
- [65] **I.F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty.** Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, 50(13):2127–2159, September 2006.
- [66] **N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, and J. Heidemann.** Scalable coordination for less sensor networks: selfconfiguring localization systems. In *Proceedings of the International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA’01)*, Ambleside, UK, July 2001.
- [67] **K. Chintalapudi, J. Paek, O. Gnawali, T. Fu, K. Dantu, J. Caffrey, R. Govindan, and E. Johnson.** Structural damage detection and localization using In *Proceedings of IPSN/SPOTS’06*, pp. 475–482, Nashville, TN, USA, April 2006.
- [68] **D. Estrin, R. Govindan, and J. Heidemann.** Embedding the internet. *Communications of the ACM*, 43(5):38–41, May 2000.

- [69] **D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar.** Next century challenges: scalable coordination in sensor networks. In Proceedings of ACM/IEEE MobiCom'99, pp. 263–270, Seattle, WA, USA, August 1999.
- [70] **L. Krishnamurthy, R. Adler, P. Buonadonna, J. Chhabra, M. Flanigan, N. Kushalnagar, L. Nachman, and M. Yarvis.** 2005. Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the North Sea. In Proceedings of SenSys'05, pp. 64–75, San Diego, CA, USA, 2005.
- [71] **V. Fodor, I. Glaropoulos, and L. Pescosolido.** 2009. Detecting low-power primary signals via distributed sensing to support opportunistic spectrum access. In Proceedings of IEEE ICC'09, Dresden, Germany, June 2009.
- [72] <http://www.ccalmr.ogi.edu/corie/>, 13 Mart 2012.
- [73] **S.I. Gass,** 1985. Linear Programming Methods and Application, fifth e., McGraw- Hill.
- [74] **A. Alfieri, A. Bianco, P. Brandimarte, C.F. Chiasserini,** 2007. Maximizing system lifetime in wireless sensor networks, European Journal of Operational Research 181 (2007) 790–902.
- [75] **J.H. Chang, L. Tassiulas,** 2004. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks, IEEE/ACM Transactions on Networking 12 (2004) 609–619.
- [76] **S.C. Ergen, P. Varaiya,** 2005. On multi-hop routing for energy efficiency, IEEE Communications Letters 9 (2005) 880–881.
- [77] **H. Liu, X. Jia, P.-J. Wan, C.-W. Yi, K. Makki, N. Pissinou,** 2007. Maximizing lifetime of sensor surveillance systems, IEEE/ACM Transactions on Networking 15 (2007) 784–845.
- [78] **Shukla, D.,** 2001. Mobility models in ad hoc networks, Kresit-IIT Bombay
- [79] **B. K. Cetin, N. R. Prasad, R. Prasad,** 2011. A novel linear programming formulation of maximum lifetime routing in wireless sensor Networks, 2011, IEEE.
- [80] **B. Tavli, I.E. Bagci, O. Ceylan,** 2010. Optimal data compression and forwarding in wireless sensor networks, IEEE Communications Letters 14 (2010) 908–910.
- [81] **D. İncebacak, K. Bicakci, B. Tavli,** Investigating the Tradeoffs between Spatial Granularity and Energy Requirements in Wireless Sensor Networks, UKSim Fourth European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation.
- [82] **Roy, R.,** 2011. Handbook of mobile ad hoc Networks for mobility models. ISBN 978-1-4419-6048-1
- [83] **G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Welsh, O. Marcillo, J. Johnson, M. Ruiz, J. Lees,** 2006. Deploying a wireless sensor network on an active volcano, IEEE Internet Computing 10 (2006) 18–25.
- [84] **Bicakci, K., Gultekin, H., Tavli, B. and Bagci, İ.E.,** 2011. Maximizing lifetime of event-unobservable wireless sensor Networks, Computer Standards & Interfaces 73 901–910
- [85] **Bicakci, K., Gultekin, H. and Tavli, B.,** 2009. The Impact of One-Time Energy Costs on Network Lifetime in Wireless Sensor Networks, IEEE Communications Letters, Vol. 13, No. 12.
- [86] **Özçiloğlu, M. and Tavli, B.,** Life Time Optimization and Privacy For Wireless Sensor Networks
- [87] **N., Megiddo,** 1991. Linear programming.

- [88] **Cheng, Z., Perillo, M. and Heinzelman, W.,B**, 2008, General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies, IEEE Transactions on Mobile Computing. Vol. 7, No. 4
- [89] **Bicakci, K., Bagci, İ. E. and Tavli, B.**, 2011. Lifetime Bounds of Wireless Sensor Networks Preserving Perfect Sink Unobservability, IEEE Communications Letters, Vol. 15, No. 2.
- [90] **Tavli, B., Ozciloglu, M. and Bicakci, K.**, 2010. Mitigation of Compromising Privacy by Transmission Range Control in Wireless Sensor Networks, IEEE Communications Letters, Vol. 14, No. 12.
- [91] **Guerrero-Zapata, M., Zilan, R., Barcel'ó-Ordinas, J., Bicakci, K., and Tavli, B.**, 2010. The Future of Security in Wireless Multimedia Sensor Networks. Telecommunication Systems (2010) 77-91
- [92] **Bicakci, K., Bagci, İ. E. and Tavli, B.**, 2011. Communication/computation tradeoffs for prolonging network lifetime in wireless sensor networks: The case of digital signatures, (2011), doi:10.1016/j.ins.2011.11.018.
- [93] **Anna Ha'c**, 2003. Wireless Sensor Network Designs, John Wiley & Sons Ltd,
- [94] **Holger Karl, Andreas Willig**, 2005. ,Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks, John Wiley & Sons Ltd,
- [95] **Mauri Kuorilehto, Mikko Kohvakka, Jukka Suhonen**, 2007. Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice, John Wiley & Sons Ltd.
- [96] **H. Takagi and L. Kleinrock**, 1984. Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals, IEEE Trans. Comm., vol. 32, pp. 246-257
- [97] **G. Zussman and A. Segall**, 2003. Energy Efficient Routing in Ad Hoc Disaster Recovery Networks, Proc. IEEE INFOCOM.
- [99] **Bansal, M., Rajput, R. and Gupta, G.**, 1999. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations, ISCET 2010, ISBN : 978-81-910304-0-2
- [100] **Lou, J., Hubaux, j.**, 2005. Joint mobility and routing for lifetime elongation in Wireless Sensor Networks, IEEE.
- [101] **Ekici,E., Gu,Y. and Bozdag, D.**, 2006. Mobility-Based Communication in Wireless Sensor Networks, IEEE Communications Magazine
- [102] **Crosby, G. V. and Pissinou, N.**, 2007. Evolution of Cooperation in Multi-Class Wireless Sensor Networks, IEEE LCN (2007) 489–495.
- [103] **Miller, S. J**, An introduction to linear programming,2007.
- [104] **Robert J. Vanderbei**, 2008. Linear Programming Foundations and Extensions, 2008 by Robert J. Vanderbei
- [105] **Michael C. Ferris, Olvi L. Mangasarian, Stephen J. Wright**, 2007. Linear Programming With Matlab, by the Society for Industrial and Applied Mathematics and the Mathematical Programming Society
- [106] **M.,I., M., Saad, Zukarnain, Z., A.**, 2009. Performance Analysis of Random-Based Mobility Models in MANET Routing Protocol, European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.32 No.4 (2009), pp.444-454.
- [107] **Chiang, K., H.**, A 2D Random Walk Mobility Model for Location Management Studies in Wireless Networks

- [108] **Cordeiro, C. M and Agrawal. D. P**, 2005 Ad Hoc And Sensor Networks Theory and Applications, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [109] <http://www.stccmop.org/projects.html>, 15 Mart 2012.
- [110] <http://www.princeton.edu/~mrm/zebranet.html>, 15 Mart 2012.
- [111] <http://main.omanobserver.om/node/34002>, 15 Mart 2012.
- [112] **A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman**, GAMS: A User's Guide, The Scientific Press, 1998.
- [113] **Pala, Z.**, 2008. MS Office Excel 2007, Türkmen Kitabevi, ISBN:978-975-6392-84-3
- [114] <http://planetmath.org/encyclopedia/EuclideanDistance.html>, 15 Mart 2012.
- [115] MATLAB Reference Guide. The MathWorks, Inc., 2001.
- [116] <http://www.evaluationengineering.com/index.php>, 15 Mart 2012.
- [117] http://www.spacedaily.com/reports/Acoustic_Sensor_And_Netted_Combat_System_Linked_For_Enhanced_Counter_Sniper_Capability_999.html, 15/04/2012.
- [118] http://paginas.fe.up.pt/~ee03058/stat_art.html, 15 Mart 2012.
- [119] www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1827332&show=html, 15/04/2012.
- [120] <http://bbn.com/boomerang>, 15/04/2012.

ÖZGEÇMİŞ

Zeydin Pala 1993 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik mühendisliğinden mezun oldu. Aynı yıl Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ahlat Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. 1995 yılında “Basic Bilenler için Visual Basic “isimli ilk kitabını yayınladı. 2000’li yılların başında Özalp Meslek Yüksekokuluna geçiş yaptı. 2006 yılında YYÜ Elektrik-Elektronik mühendisliğinde başladığı yüksek lisansını 2007 yılında tamamladı. 1995-2008 yılları arasında başta bilgisayar donanımı, visual basic .NET, delphi, c++ builder, pascal, c#, veritabanları ve web programcılığı dalları olmak üzere 50 civarında kitap yayınladı. 2009 yılında Muş Alparslan Üniversitesine geçiş yaptı. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde doktora başladı.

Kablosuz iletişim, kablosuz sensör ağları, kablosuz tasarsız ağlar, lineer programlama, GAMS ile model yazma ve RFID teknolojisi konularında araştırmalarını sürdüren Zeydin Pala ingilizce bilmektedir, evli ve üç çocuk babasıdır.