

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

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA AĞ YAŞAM SÜRESİ  
VE  $k$ -BAĞLILIK ARASINDAKİ İLİŞKİNİN  
MODELLENMESİ VE İRDELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Muhammed ÇOBANLAR**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent TAVLI**

**ARALIK 2022**

## TEZ BİLDİRİMİ

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

Muhammed ÇOBANLAR

İMZA

## ÖZET

Doktora Tezi

### KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA AĞ YAŞAM SÜRESİ VE $k$ -BAĞLILIK ARASINDAKİ İLİŞKİNİN MODELLENMESİ VE İRDELENMESİ

Muhammed ÇOBANLAR

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

Danışman: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Tarih: ARALIK 2022

Genel olarak Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) ve daha özelinde Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlar (SKAA) bir çok izleme ve gözetim uygulamalarında sıklıkla ve geniş alanlarda kullanılmakta olan çözümlerdendir. Her iki uygulama için de ağ yaşam süresinin enbüyüklenmesinin ve ağ güvenilirliğinin artırılmasının dikkate alınması gereken en önemli parametrelerden olduğu unutulmamalıdır. Özellikle kritik görevlerde kullanılan KAA'ların hem yaşam sürelerinin çok yüksek olması hem de ilgili ağın kesintiye uğramadan verileri ilgili baz istasyonlarına ulaştırabiliyor olması çok önem arz etmektedir. Ağın güvenilirliği bir çok parametre ile tanımlanabilir. Bu tez çalışmasında ağ güvenilirliği için daha gürbüz bir parametre olan  $k$ -bağlılık açısından güvenilirlik incelenirken, yaşam süresinin enbüyüklenmesi amaçlanmıştır. Ancak KAA'nın düğümlerinden baz istasyonuna kadar  $k$  farklı yolun oluşturulması ve ayakta tutulması için enerji tüketiminin artacak olması yani ağın yaşam süresinin kısalacak olmasından dolayı büyük bir ödünleşme meydana gelmektedir. Bu tezde ağ yaşam süresi ile ağın güvenilirliği arasındaki ödünleşme analizi ortaya konulan matematiksel programlama çerçevesinde incelenmiştir. Çok sayıda belirgin parametre için önerilen eniyileme modelinin optimal çözümleri aracılığıyla elde edilen sonuçlar ortaya koymaktadır ki  $k$ -bağlılık değerinin yüksek

tutulmaya çalışılması halinde yaşam süresinde kayda değer azalmalar meydana gelmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz algılayıcı ağlar, Suatlı kablosuz algılayıcı ağlar,  $k$ -bağlılık, Ağ yaşam süresi, Karma tamsayılı doğrusal programlama, Ödünleşme analizi.



## ABSTRACT

Doctor of Philosophy

ANALYSIS OF THE TRADE-OFF BETWEEN NETWORK LIFETIME  
AND  $k$ -CONNECTIVITY IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Muhammed ÇOBANLAR

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

Supervisor: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Date: DECEMBER 2022

Wireless Sensor Networks (WSNs) in general and Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) in particular are solutions that are used frequently and in large areas in many monitoring and surveillance applications. While realizing both solutions, it should be noted that maximizing lifetime and increasing network reliability are the most important parameters to consider. It is very important that WSNs used especially in critical missions have a very high network lifetime and that the relevant network can deliver data to the relevant base stations without interruption. The reliability of the network can be defined by many parameters. In this thesis, it is aimed to maximize the lifetime while examining the reliability in terms of  $k$ -connectivity, which is a more robust parameter for network reliability. However, the creation and maintenance of  $k$  different paths from the nodes of the WSN to the base station creates a big handicap in terms of energy consumption, that is, shortening the lifetime of the network. In this thesis, the trad-eoff analysis between network lifetime and network reliability is examined within the framework of mathematical programming. The results obtained through the optimal solutions of the proposed optimization model for many significant parameters reveal that if the  $k$ -connectivity value is tried to be high can affect the network lifetime significantly.

**Keywords:** Wireless sensor networks, Underwater wireless sensor networks,  $k$ -connectivity, Network lifetime, Mixed-integer linear programming, Trade-off analysis.



## TEŞEKKÜR

Öncelikle ve ilk olarak doktora eğitimim boyunca yaptığı yardım ve katkılarıyla beni sonuca yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Bülent TAVLI'ya, eş danışmanım olduktan sonra yaptığı katkılardan dolayı kıymetli hocam Doç. Dr. H. Uğur YILDIZ'a, tez izleme komitesinde bulunan ve tecrübelerinden faydalandığım sayın Prof. Dr. Tolga GİRİCİ'ye ve doktora eğitimim boyunca bana araştırma bursu sağlayarak eğitimime destek olan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu uzun ve meşakkatli süreçte desteğini benden esirgemeyen eşim Zehra'ya, her zaman yanımda olan annem ile babama ve zamanlarından çaldığım canım kızlarıma çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	3
1.2 Problem Tanımı .....	3
1.3 Katkılar .....	4
1.4 Tezin Organizasyonu .....	5
<b>2.LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>7</b>
<b>3.KAVRAMSAL ÇERÇEVE</b> .....	<b>11</b>
3.1 Genel Bilgiler .....	11
3.2 Algılayıcılar .....	12
3.2.1 Algılayıcıların sınıflandırılması .....	13
3.3 Kablosuz Algılayıcı Ağlar .....	13
3.3.1 KAA'ların tarihçesi .....	15
3.3.2 KAA'ların haberleşmesi .....	17
3.3.3 KAA'ların tasarsız ağlara göre avantajları .....	17
3.3.4 KAA'lar ile geleneksel ağların karşılaştırılması.....	18
3.3.5 KAA mimarisi .....	19
3.3.5.1 Algılayıcı ünitesi .....	20
3.3.5.2 Mikroişlemci ünitesi.....	21
3.3.5.3 Hafıza & depolama ünitesi.....	22
3.3.5.4 Alıcı-verici ünitesi.....	22
3.3.5.5 Güç ünitesi.....	23
3.3.5.6 Yer belirleme ünitesi (GPS).....	23
3.3.5.7 Mobilize ünitesi.....	24
3.3.6 KAA platformları .....	24
3.3.7 KAA tipleri.....	25
3.3.7.1 Mobil KAA'lar.....	26
3.3.7.2 Karasal KAA'lar .....	26
3.3.7.3 Yeraltı KAA'lar .....	27
3.3.7.4 Çoklu medya KAA'lar .....	27
3.3.7.5 Sualtı KAA'lar .....	27
3.3.8 KAA'ların uygulama alanları .....	31
3.3.9 KAA'ların avantajları.....	32
3.3.10 KAA'ların dezavantajları .....	33
3.3.11 KAA'ların topolojileri.....	34
3.3.12 KAA'ların protokol yığını.....	36
3.3.13 KAA'ların güvenliği .....	38



3.3.14 KAA'ların ağ yaşam süresi tanımı .....	39
3.4 Matematiksel Programlama ve Eniyileme.....	39
3.4.1 Matematiksel programlamanın tarihçesi ve özellikleri .....	40
3.4.2 Doğrusal programlama .....	42
3.4.2.1 DP çözüm yöntemleri .....	44
3.4.3 Tamsayılı doğrusal programlama .....	45
3.4.3.1 Tamsayılı programlama çözüm yöntemleri.....	47
3.5 Faydalanılan Uygulamalar ve Analiz Yöntemleri .....	47
<b>4. SİSTEM MODELİ-1.....</b>	<b>51</b>
4.1 Özet.....	51
4.2 Model Tanımı .....	51
4.3 Analizler .....	55
4.4 Sonuçlar .....	59
<b>5. SİSTEM MODELİ-2.....</b>	<b>61</b>
5.1 Özet.....	61
5.2 Model Tanımı .....	63
5.2.1 Ağ modeli .....	64
5.2.1 Enerji modeli .....	65
5.2.1 Minimum enerji tüketimi için KTDP modeli .....	67
5.3 Analizler .....	72
5.3.1 Senaryo-I .....	75
5.3.1 Senaryo-II.....	82
5.3.1 Senaryo-III.....	88
5.4 Sonuçlar .....	94
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>97</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>101</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>113</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1: Veri toplama ve çalıştırma. . . . .	13
Şekil 3.2: Kablosuz algılayıcı ağlar. . . . .	14
Şekil 3.3: Algılayıcı ağlarda tek atlamalı ve çok atlamalı iletişimin karşılaştırılması. . . . .	18
Şekil 3.4: Algılayıcı düğümün bileşenleri. . . . .	20
Şekil 3.5: Örnek bir Mica2 Mote düğümü. . . . .	25
Şekil 3.6: SKAA uygulamalarına ait sınıflandırma tablosu. . . . .	28
Şekil 3.7: Genel bir SKAA topolojisi. . . . .	30
Şekil 3.8: Temsili KAA topolojileri. . . . .	35
Şekil 3.9: KAA protokol yığı. . . . .	36
Şekil 3.10: DP modellerinin genel biçimi. . . . .	42
Şekil 3.11: DP örneği. . . . .	43
Şekil 3.12: Bir DP örneği için tüm çözüm bölgesi ve eniyilenmiş sonuç. . . . .	44
Şekil 3.13: TDP örneği. . . . .	46
Şekil 3.14: DP ve TDP çözüm karşılaştırması. . . . .	46
Şekil 4.1: AYS'yi enbüyükleme için kullanılan KTDP çerçevesi. . . . .	54
Şekil 4.2: Maksimum İGS için bağlılık grafiği. Vurgulanan düğümler, $k=5$ kritik düğümlerdir. . . . .	55
Şekil 4.3: Optimal İGS için bağlılık grafiği. Vurgulanan düğümler, $k=2$ kritik düğümlerdir. . . . .	56
Şekil 4.4: Maksimum İGS ve Optimal İGS rejimleri için $ W $ 'ye bağlı olarak AYS grafiği. . . . .	57
Şekil 4.5: Maksimum İGS ve Optimal İGS rejimleri için $ W $ 'ye bağlı olarak $k$ grafiği. . . . .	57
Şekil 5.1: $d_y = 1\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için $\kappa-\rho$ grafiği. . . . .	75
Şekil 5.2: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için $\kappa-\rho$ grafiği. . . . .	76
Şekil 5.3: $d_y = 3\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için $\kappa-\rho$ grafiği. . . . .	76
Şekil 5.4: $d_y = 1\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAA grafiği. . . . .	77
Şekil 5.5: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAA grafiği. . . . .	77
Şekil 5.6: $d_y = 3\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAA grafiği. . . . .	78
Şekil 5.7: $d_y = 1\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAM grafiği. . . . .	78
Şekil 5.8: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAM grafiği. . . . .	79
Şekil 5.9: $d_y = 3\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAM grafiği. . . . .	79
Şekil 5.10: $d_y = 1\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAS grafiği. . . . .	80
Şekil 5.11: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAS grafiği. . . . .	80
Şekil 5.12: $d_y = 3\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAS grafiği. . . . .	80
Şekil 5.13: $d_y = 1\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAE grafiği. . . . .	81
Şekil 5.14: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAE grafiği. . . . .	81
Şekil 5.15: $d_y = 3\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAE grafiği. . . . .	81
Şekil 5.16: $ V  = 20$ , $d_y = 2\text{km}$ ve $\mu = 0.10$ için $\kappa-\rho$ grafiği. . . . .	82

Şekil 5.17: $ V  = 25$ , $d_y = 2\text{km}$ ve $\mu = 0.10$ için $\kappa$ - $\rho$ grafiği. . . . .	82
Şekil 5.18: $ V  = 30$ , $d_y = 2\text{km}$ ve $\mu = 0.10$ için $\kappa$ - $\rho$ grafiği. . . . .	83
Şekil 5.19: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAA grafiği. . . . .	84
Şekil 5.20: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 25$ ve $\mu = 0.10$ için OAA grafiği. . . . .	84
Şekil 5.21: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 30$ ve $\mu = 0.10$ için OAA grafiği. . . . .	84
Şekil 5.22: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAM grafiği. . . . .	85
Şekil 5.23: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 25$ ve $\mu = 0.10$ için OAM grafiği. . . . .	85
Şekil 5.24: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 30$ ve $\mu = 0.10$ için OAM grafiği. . . . .	85
Şekil 5.25: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAS grafiği. . . . .	86
Şekil 5.26: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 25$ ve $\mu = 0.10$ için OAS grafiği. . . . .	86
Şekil 5.27: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 30$ ve $\mu = 0.10$ için OAS grafiği. . . . .	86
Şekil 5.28: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAE grafiği. . . . .	87
Şekil 5.29: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 25$ ve $\mu = 0.10$ için OAE grafiği. . . . .	87
Şekil 5.30: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 30$ ve $\mu = 0.10$ için OAE grafiği. . . . .	87
Şekil 5.31: $\mu = 0.05$ , $ V  = 20$ ve $d_y = 2\text{km}$ için $\kappa$ - $\rho$ grafiği. . . . .	88
Şekil 5.32: $\mu = 0.10$ , $ V  = 20$ ve $d_y = 2\text{km}$ için $\kappa$ - $\rho$ grafiği. . . . .	89
Şekil 5.33: $\mu = 0.20$ , $ V  = 20$ ve $d_y = 2\text{km}$ için $\kappa$ - $\rho$ grafiği. . . . .	89
Şekil 5.34: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.05$ için OAA grafiği. . . . .	90
Şekil 5.35: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAA grafiği. . . . .	90
Şekil 5.36: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.20$ için OAA grafiği. . . . .	90
Şekil 5.37: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.05$ için OAM grafiği. . . . .	91
Şekil 5.38: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAM grafiği. . . . .	91
Şekil 5.39: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.20$ için OAM grafiği. . . . .	91
Şekil 5.40: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.05$ için OAS grafiği. . . . .	92
Şekil 5.41: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAS grafiği. . . . .	92
Şekil 5.42: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.20$ için OAS grafiği. . . . .	93
Şekil 5.43: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.05$ için OAE grafiği. . . . .	93
Şekil 5.44: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.10$ için OAE grafiği. . . . .	93
Şekil 5.45: $d_y = 2\text{km}$ , $ V  = 20$ ve $\mu = 0.20$ için OAE grafiği. . . . .	94

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Algılayıcıların sınıflandırılması ve örnekleri. . . . .	14
Çizelge 3.2: Ticari amaçlı kullanılan KAA'ların tarihçesi ve özellikleri. . . . .	16
Çizelge 3.3: Kablosuz algılayıcı ağlar ile geleneksel ağların karşılaştırılması. . .	19
Çizelge 3.4: KAA'larda kullanılan çeşitli mikroişlemci ünitelerinin karşılaştırması.	22
Çizelge 3.5: Algılayıcı düğüm platformları ve işlemcileri. . . . .	24
Çizelge 3.6: Bazı önemli algılayıcı düğüm platformlarının karşılaştırması. . . .	26
Çizelge 3.7: KAA tiplerinin karşılaştırılması. . . . .	30
Çizelge 3.8: GAMS kodunun genel formatı. . . . .	48
Çizelge 4.1: Mica2 Motes modeli için güç seviyelerine göre, her güç seviye- sindeki ( $l$ ) iletim enerji tüketimi [ $E_{tx}(l)$ -nJ/bit] ve iletim mesafesi ( $R_{max}(l)$ -m). Veri alımı için enerji tüketimi sabiti ( $E_{rx}=922$ nJ/bit).	52
Çizelge 5.1: Bölüm 5.2'de kullanılan sembollerin ve notasyonların listesi. . . .	64
Çizelge 5.2: Güç seviyesi- $\ell$ iken, $f=25$ kHz ve $k_s=1.5$ olduğunda iletim enerji maliyeti ( $E_T(\ell)$ – nJ/bit) ve iletişim aralığı ( $R_{max}(\ell) – m$ ). . . . .	66



## KISALTMALAR

<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>ADC</b>	: Analog Dijital Dönüştürücü (İng. Analog-to-Digital Converter)
<b>AYS</b>	: Ağ Yaşam Süresi
<b>Bİ</b>	: Baz İstasyonu (İng. Base Station)
<b>BWRC</b>	: Berkeley Kablosuz Araştırma Merkezi (İng. Berkeley Wireless Research Center)
<b>CSMA/CA</b>	: Taşıyıcı Sezmelili Çoklu Erişim ile Çarpışmadan Kaçınma (İng. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
<b>DARPA</b>	: Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı (İng. United States Defense Advanced Research Projects Agency)
<b>DOP</b>	: Doğrusal Olmayan Programlama (İng. Non-Linear Programming)
<b>DP</b>	: Doğrusal Programlama (İng. Linear Programming)
<b>DP</b>	: Doğrusal Programlama (İng. Linear Programming)
<b>DSN</b>	: Dağıtık Algılayıcı Ağlar (İng. Distributed Sensor Networks)
<b>EEPROM</b>	: Elektriksel Silinebilir Programlanabilir Salt Okunur Bellekler (İng. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
<b>EYETD</b>	: En Yüksek Enerji Tüketen Düğüm
<b>GAMS</b>	: Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (İng. The General Algebraic Modeling System)
<b>GPLD</b>	: Global Güç Seviye Karar (İng. Global Power Level Decisions) Stratejisi
<b>GPLD-SPLA</b>	: Tek Güç Atamalı Global Güç Seviye Karar (İng. Global Power Level Decisions with Single Power Level Assignment) Stratejisi
<b>GPS</b>	: Yer Belirleme Ünitesi (İng. Global Positioning System)
<b>IEEE</b>	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (İng. (Institute of Electrical and Electronics Engineers))
<b>IP</b>	: İnternet Protokolü (İng. Internet Protocol)

<b>İGS</b>	: İletim Güç Seviyesi
<b>İKTDP</b>	: İkili Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (İng. Binary Mixed Integer Linear Programming)
<b>İTDP</b>	: İkili Tamsayılı Doğrusal Programlama (İng. Binary Integer Linear Programming)
<b>KAA</b>	: Kablosuz Algılayıcı Ağlar (İng. Wireless Sensor Networks (WSN))
<b>KB</b>	: Kilobyte
<b>KTDOP</b>	: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (İng. Mixed Integer Non-Linear Programming)
<b>KTDP</b>	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (İng. Mixed Integer Linear Programming)
<b>LWIM</b>	: Düşük Güçlü Kablosuz Entegre Mikroalgılayıcılar (İng. Low Power Wireless Integrated Microsensors)
<b>MAC</b>	: Ortam Erişim Kontrolü (İng. Media Access Control)
<b>mAMPS</b>	: MicroAdaptive Multidomain Power-aware Sensors)
<b>MATLAB</b>	: MATris LABoratuvarı (İng. Matrix Laboratory)
<b>MEMS</b>	: Mikroelektromekanik Sistemler
<b>MIT</b>	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (İng. Massachusetts Institute of Technology)
<b>MP</b>	: Matematiksel Programlama (İng. Mathematical Programming)
<b>NI</b>	: Nesnelerin İnterneti (İng. Internet of Things)
<b>O2</b>	: Oksijen
<b>OAA</b>	: Ortalama Ağırlıklı Akış (İng. Average Weighted Flow)
<b>OAE</b>	: Ortalama Ağırlıklı Enerji Tüketimi (İng. Average Weighted Energy Dissipation)
<b>OAM</b>	: Ortalama Ağırlıklı Mesafe (İng. Average Weighted Distance)
<b>OAS</b>	: Ortalama Ağırlıklı Atlama Sayısı (İng. Average Weighted Hop Count)
<b>OSI</b>	: Açık Sistem Ara Bağlantıları (İng. Open Systems Interconnection)
<b>QoS</b>	: Hizmet Kalitesi (İng. Quality of Service)
<b>RAM</b>	: Rastgele Erişim Hafızası (İng. Random Access Memory)
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı (İng. Radio Frequency)
<b>SKAA</b>	: Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlar (İng. Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN))
<b>SNR</b>	: Sinyal Gürültü Oranı (İng. Signal-to-Noise Ratio)

<b>SOSUS</b>	: Ses Gözetleme Sistemi (İng. Sound Surveillance System)
<b>TCP</b>	: İletim Kontrol Protokolü (İng. Transmission Control Protocol)
<b>TDMA</b>	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (İng. Time Division Multiple Access)
<b>TDP</b>	: Tamsayılı Doğrusal Programlama (İng. Integer Linear Programming)
<b>UC Berkeley</b>	: Kaliforniya Üniversitesi Berkeley (İng. University of California: Berkeley) Kampüsü
<b>UCLA</b>	: Kaliforniya Üniversitesi Los Angeles (İng. University of California: Los Angeles) Kampüsü
<b>VLSI</b>	: Çok Geniş Ölçekli Tümlleşim (İng. Very Large Scale Integration)
<b>WINS</b>	: Kablosuz Entegre Ağ Algılayıcılar (İng. Wireless Integrated Network Sensors)
<b>YA</b>	: Yöneylem Araştırma (İng. Operations Research)





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$a_{ij}^{kl}$	$l$ yolu üzerinde düğüm- $k$ tarafından oluşturulan verinin $(i, j)$ bağlantısı üzerinden akıp akmadığını gösteren ikili değişken
$b_k^l$	$l$ yolu üzerindeki kaynak düğüm- $k$ tarafından ağa enjekte edilen toplam paket sayısı
$\mathcal{D}_l$	$l$ yolunun ortalama ağırlıklı kaynak-Bİ mesafesi (km)
$d_{ij}$	düğüm- $i$ ve düğüm- $j$ arasındaki mesafe (m)
$d_x$	Ağ genişliği (km)
$d_y$	Ağın uzunluğu (km)
$d_z$	Ağın derinliği (km)
$e_i$	$i$ düğümünün enerjisi
$\mathcal{E}_l$	$l$ yolunda bit başına harcanan ortalama ağırlıklı enerji (mJ)
$E_{rx}$	1 bit verinin alınması için gereken enerji (J)
$E_R = P_r$	Alım sabiti (J/bit)
$E_{tx}(l)$	Bir bit veriyi $l$ güç seviyesinde iletmek için gereken enerji (J)
$E_{tx,ij}^{opt}$	Bir bit veriyi optimal İGS'ye göre $l$ güç seviyesinde iletmek için gerekli enerji kaybı (J)
$E_T(\ell)$	$\ell$ -Güç seviyesinde iletimin enerji maliyeti (J/bit)
$E_{T,ij}^*$	Bağlantı- $(i, j)$ üzerinden iletim için eniyilenmiş iletim enerjisi (J/bit)
$f$	Çalışma frekansı merkezi (kHz)
$\mathcal{F}_l$	$l$ yolundan geçen ortalama ağırlıklı paket sayısı- $l$ (paket)
$f_{ij}^k$	$k$ düğümünde üretilerek, $i$ düğümünden, $j$ düğümüne akan trafik
$G = (V, A)$	Ağ topolojisini temsil eden yönlü graf
$\mathcal{H}_l$	$l$ yolunda kaynaktan Bİ'ye ortalama ağırlıklı atlama sayısı
$I_{jm}^i$	Girişim matrisi
$k_s$	Yayıma faktörü
$k$	Güvenirlilik Parametresi
$k_{max}$	Maksimum İGS için hesaplanan güvenirlilik parametresi
$k_{min}$	Optimal İGS için hesaplanan güvenirlilik parametresi
$\mathcal{L}$	Ayrık güç seviyeleri seti
$L_p$	Paket boyutu (1024 bits)
$l_{opt-ij}$	$d_{ij}$ mesafesine veri iletilirken kullanılacak optimum güç seviyesi

$l_{max}$	Maksimum güç seviyesi (seviye-26)
$l_{min}$	Minimum güç seviyesi (seviye-1)
$M$	Yeterince büyük sayı ( $10^7$ )
$N_l$	Toplam yol sayısı
$N_R$	Ağ işletimi için toplam tur sayısı (3600)
$P_0$	Alıcıya girişte istenen güç seviyesi (J/bit)
$R_b$	Veri hızı (2500 bps)
$R_{max}(\ell)$	$\ell$ -Güç seviyesinde maksimum iletim aralığı (m)
$R_{max}(l)$	$l$ güç seviyesinde iletebilecek en fazla mesafe (m)
$s_k$	Her turda düğüm- $k$ tarafından üretilen paket sayısı
$S_L$	İletim gücü belirlenirken kullanılan sonlu küme
$TL(R_{max}(\ell))$	$R_{max}(\ell)$ mesafesi üzerinden iletim kaybı
$T_R$	Tur süresi (60 s)
$V$	Bİ dahil tüm düğümlerin kümesi
$ V $	Ağdaki tüm düğümlerin toplam sayısı
$W$	Tüm algılayıcı düğümlerin kümesi
$ W $	Ağdaki toplam algılayıcı düğümü sayısı
$x_{ij}^{kl}$	$k$ düğümü tarafından oluşturulan ve yol- $(i, j)$ yolu üzerindeki $l$ bağlantısı üzerinden akan paketlerin sayısı ( $L_P$ bit boyutunda)
$\alpha(f)$	Emilim katsayısı (dB/km)
$\gamma$	Girişim aralığı çarpanı (1.7)
$\kappa$	Güvenilirlik parametresi (gerekli minimum ayrık yol sayısı) (1–5)
$\mu$	Yol koruma parametresi (yani, gerekli her yol üzerinden iletilecek minimum veri oranı)
$\xi$	Batarya limiti
$\nu$	İletim kaybının hesaplanması için frekansa bağlı bileşen
$\rho$	Enerjiye en aç düğüm tarafından harcanan toplam enerji (J)

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda gerçekleşen teknolojik gelişmeler sayesinde düşük ve basit kurulum maliyetlerine ulaşması, düşük enerji tüketimi, yüksek mobilite ve kablolama ihtiyacının olmaması gibi avantajları göz önüne alındığında Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) hızla büyüyen ve uygulama sahaları genişleyen bir araştırma alanı olmuştur. KAA'lar büyük uzun vadeli bir ekonomik potansiyele, yaşamlarımızı dönüştürme yeteneğine sahip olmakla birlikte birçok yeni sistem kurma imkanı ve hedefi ortaya koymaktadırlar. Her algılayıcı düğümü bir algılama cihazı, düşük hesaplama kapasiteli işlemci, kısa menzilli kablosuz verici-alıcı ve sınırlı pille sağlanan enerji ile donatılmaktadır.

KAA'lar, etraftaki bazı çevresel olayları izler, elde edilen verileri işler ve bu verileri algılayıcı ağının çevresinde bulunan bir baz istasyonuna iletir. Bir algılayıcı ağı, genellikle bu baz istasyonunun etrafında yoğun bir şekilde konuşlandırılmış çok sayıda algılayıcı düğümünden oluşur. İlgili algılayıcı düğümlerinin buldukları pozisyonlar önceden belirlenmek zorunda değildir, çoğunlukla da zorlu saha şartlarında ve afet durumlarında rastgele olarak yerleştirilmektedir [1].

Genel maksatla ısı, nem, ışık şiddeti ve hareket algılayıcı gibi çözümlerle kullanılsa da [2] KAA'lar akıllı altyapı çözümleri için de ilgi çekici bir teknoloji haline gelmektedir. Bu alandaki uygulamalara nesnelerin internetine (İng. Internet of Things) bağlı çözümler [3, 4], bina, fabrika ve süreç kontrol uygulamaları örnek verilebilir [5]. Ayrıca KAA'ların Nesnelerin İnterneti (Nİ) fenomeni için önemli bir teknolojik altyapı tesis ettiği bilinmektedir [6, 7]. Sağlık [8–10], akıllı ev [11–13], askeri [14–16] ve tarım [17–19] çözümleri KAA'lar için en geniş uygulama alanlarındandır. Örneğin askeri alanda, algılayıcı ağlarının hızlı konuşlandırılabilmesi, kendi kendine organize olabilmesi ve hata toleransına karşı güçlü olması gibi özellikleri, onları askeri komuta-kontrol, iletişim, bilgi işlem, istihbarat, gözetleme, keşif ve hedefleme sistemleri için çok önemli bir algılama tekniği haline getirmektedir. Sağlıkta, hastaları izlemek ve engelli hastalara yardımcı olmak için algılayıcı düğümleri kullanılabilir. Diğer bazı ticari uygulamalar arasında envanter yönetimi, ürün kalitesinin ve afet bölgelerinin izlenmesi yer alır [1].

Yeryüzünün %70'inden fazlası su ile kaplıdır. Bu nedenle, su kütlelerinin izlenmesi, deniz kıyısına ait araştırmalar, askeri ve istihbari amaçlı sualtı gözetimi, su ürünleri yetiştiriciliği ve uzun vadeli kirlilik izleme gibi birçok uygulama için pratik bir gerekliliktir [20]. Haberleşme teknolojisindeki (özellikle su altı akustik haberleşme) teknolojik gelişmeler belli bir olgunluk düzeyine ulaştığı için; Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlarının (SKAA) uygulanabilirliği ve verimliliği, yirmi yılı aşkın bir süredir bilimsel, endüstriyel ve askeri uygulamalar için bir gerçeklik haline gelmiştir [21]. Bir SKAA, sıcaklık, basınç, nem gibi fiziksel olayları izlemek için bir coğrafi alan üzerine yerleştirilmiş çok sayıda yüzer batık algılayıcı düğümünden oluşur. Ayrıca, bir SKAA'da kendisi de su yüzeyinin altında belirli bir derinlikte yüzebilen veya su yüzeyinde yüzebilen en az bir baz istasyonu vardır.

Kısıtlı enerjiye sahip algılayıcı düğümler topladıkları veriyi ya direk olarak baz istasyonuna (İng. single-hop) ya da kendisi haricindeki düğümlerden röle (İng. relay) olarak faydalanarak çoklu atlamalı şekilde (İng. multi-hop) Bİ'ye gönderirler. Böylece, tipik olarak, bir KAA'da bulunan algılayıcı düğümlerin çoğu çift işlevsellik (yani veri toplama ve iletişim rölesi) gösterirler [22]. Teknolojik gelişmelerin sonucu olarak ağ alanın genişletilme ihtiyacı, enerji verimliliği ve güvenilirlik perspektifleri ile çoklu atlamalı çözümlerin arttığı görölmektedir [23].

Ağ Yaşam Süresinin (AYS) enbüyüklenmesinin en önemli hizmet kalitesi (İng. Quality of Service) parametrelerinden biri olduğu söylenebilir [24]. Enerji verimliliği ve güvenilirliği, KAA'larda olduğu gibi SKAA'larda da en önemli performans ölçütleri arasındadır. Algılayıcı düğümlerin sınırlı pil enerjileri olduğundan ve pilleri yenilemek zor veya bazı durumlarda imkansız olduğundan, KAA'ların enerji israfını önlemesi büyük önem taşımaktadır [25, 26]. Bu nedenle, şebeke operasyonları gereksiz enerji yayılımını önleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Çok fazla enerji harcayarak çok daha iyi hizmet seviyesi sağlamak için gerekli operasyonlar tasarlansa bile, bataryadaki enerji tükendiğinde sağlanan işlevsellik hızla kullanılamaz hale gelecektir (yani bir düğüm enerjisiz olduğunda hiçbir hizmet veremez) [27]. AYS'nin enbüyüklenmesi için literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [28–31]. Yapılan çalışmalar genellikle verilmesi gereken kararların basitleştirilmesi için yapılan varsayımlar üzerinden, problemin basit modeller ile tanımlanması ile elde edilen sonuçlardan oluşmaktadır.

Öte yandan güvenilirlik (İng. reliability), KAA'larda enerji verimliliği kadar önemlidir çünkü dağıtım ortamları genellikle zorlu ortamlardır. Döğümler ve bağlantılar ise arızaya oldukça eğilimlidir. KAA'ların güvenilirliği de sağlanan hizmet kalitesinin (İng. QoS) önemli parametrelerinden biridir [32]. Literatürde KAA'lar için birçok güvenilirlik tanımı olmasına rağmen,  $k$ -bağlılık parametresi KAA'lar için yaygın olarak kabul edilen güvenilirlik rejimlerinden biridir [33].

$k$  bağlantılı bir ağda her bir algılayıcı döğümünden baz istasyonuna en az  $k$  ayrık yol vardır. Bu nedenle, belirli bir algılayıcı döğümünün ilgili ağda  $k - 1$ 'a kadar yolu çalışmaz halde bırakılsa bile, algılayıcı döğümünün hala baz istasyonuna bağlı kalması garanti edilir. Bu nedenle  $k$ -bağlılık, özellikle  $k$  değeri yüksekse, yüksek derecede ağ güvenilirliği sağlar.

$k$  bağlantılı bir KAA'nın bakımı, her bir algılayıcı döğümünden kaynaklanan en az  $k$  ayrık yolları korumak için harcanacak fazladan enerji gerektirir. Bu nedenle,  $k$  bağlantılı bir KAA'da  $k$  değeri açısından güvenilirlik düzeyi ve ağ yaşam süresi (AYS) arasında bir değiş tokuş vardır. SKAA'larda  $k$ -bağlılık, nadiren araştırılan bir konudur ve bu konu hakkında yalnızca bir çalışma yapılmıştır [34]. Ayrıca  $k$  değerinin KAA'larda AYS üzerindeki etkisi de literatürde araştırılmamıştır.

## 1.1 Çalışmanın Amacı

Ele aldığımız bu tez çalışmasıyla  $k$  bağlantılı bir KAA veya SKAA'nın sürdürülebilmesinin, ağ yaşam süresine ve enerji tüketimine etkisi sistematik olarak araştırılmıştır.  $k$  değerinin KAA'nın AYS'si üzerindeki etkilerini modellemek için bir eniyileme çerçevesi oluşturulmuş ve bu çerçeve  $k$ -bağlılık ile AYS arasındaki değiş tokuşun karakterize edilmesi için kullanılmıştır.

## 1.2 Problem Tanımı

$k$ -bağlılık, güvenilirliği güçlendirmek için sağlam bir yaklaşımdır. Bununla birlikte, her bir algılayıcı döğümünden Bİ'ye  $k$  ayrık yol sağlamak, kaçınılmaz olarak, ağ yaşam süresinin (AYS) azalmasına neden olan ekstra enerji tüketimine neden olur. Ancak literatürde bildiğimiz kadarıyla  $k$  değerindeki artışa bağlı olarak AYS'deki azalmanın

boyutunu belirlemeye yönelik sistematik bir araştırma bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında, bu sorun temelinde aşağıdaki araştırma sorularına cevap verilmeye çalışılmıştır.

1.  $k$  bağıllığının artmasının AYS üzerindeki etkileri nelerdir?
2. KAA'da maksimum İletim Güç Seviyesi (İGS)'nin seçilmesi ile optimum İGS'nin seçilmesinin AYS'ye etkileri nedir?
3.  $k$  değerinin bir ile beş arasında artırılması AYS'de ne büyüklükte bir sonuca neden olmaktadır?
4. KAA'lardaki enerji tüketim modeliyle, SKAA'da enerji tüketim modelleri arasındaki farklar  $k$  bağıllıkta nasıl sonuçlara neden olmaktadır?
5. Düğüm sayısının sabit kalması ya da topolojiye ait alanın değişmesinin sonuçlara etkisi nedir?
6.  $k$  bağıllığının sağlanabilmesi için en optimum Yol Bakım Parametresi ( $\mu$ ) ne olmalıdır?
7. Ortalama paket boyutları, baz istasyonuna olan mesafe, uçtan-uça atlama sayısı ve enerji tüketim değerlerindeki değişimler nasıl olmaktadır?

### 1.3 Katkılar

Literatürde KAA'larda Ağ Yaşam Sürelerinin eniyilenmesi amacıyla hazırlanmış birçok çalışma bulunmaktadır. Aynı zamanda güvenilirlik bağlamında  $k$ -bağıllığın da çalışıldığı çalışmalar görülmektedir. Bu tez çalışması, literatürdeki AYS ile  $k$ -bağıllık arasındaki ilişkinin irdelenmesine dair tespit edilen bu boşluğun doldurulması amacıyla hazırlanmıştır. Çalışmanın analizlerinin kuvvetli olması amacıyla tasarlanan detaylı bir Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP) (İng. Mixed Integer Linear Programming (MILP)) yöntemini kullanan bir çerçeve programlama üzerinden bir eniyileme çalışması yapılmıştır.

Oldukça kritik olan araştırma soruları bölüm 1.2'de verilmiştir. Bahsi geçen araştırma soruları literatürde daha önce sorulup cevaplanmadığı için bu tez çalışmasına özgünlük

katan en önemli katkıları göstermektedir. Ortaya konulan eniyileme amaçlı çerçeve program hem KAA'larda hem de SKAA'larda çeşitli sorunlar için çözüm olarak değerlendirilebilir. Oluşturulan eniyileme çerçevesini kullanarak, bilgimiz dahilinde literatürde hiç yapılmamış olan SKAA'larda  $k$ -bağlılık ve AYS arasındaki ödünleşmeyi nicel ve sistematik olarak incelemek için geniş bir parametre alanında çalışmalar yaparak sonuçlar ortaya konulmuştur.

#### **1.4 Tezin Organizasyonu**

Bu tez çalışmasının organizasyonu şu şekilde gerçekleştirilmiştir: KAA'larda  $k$ -bağlılık ve Ağ Yaşam Süresi konuları ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar Bölüm 2'de sunulmuştur. Bölüm 3'te detaylı olarak KAA'lar, matematiksel programlama ve eniyileme problemleri için kuramsal temeller anlatılmıştır. Bölüm 4'te KAA'larda, Bölüm 5'te ise SKAA'larda bu tez çalışmasına konu olan sistem modelleri (varsayımlar, enerji harcama modelleri ve matematiksel programlama problemi) ayrıntıları ile birlikte sunulmuş ve detaylı analizleri yapılmıştır. Bölüm 6'da ise bu tez çalışmasının sonuçları özetlenmiş ve ileriki çalışmalara öncülük edebilecek önerilere değinilmiştir.





## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (KAA)  $k$ -bağlılığın korunması farklı perspektiflerden kapsamlı bir şekilde incelenen ana araştırma alanlarından biridir. [35]'te, Ağ Yaşam Süresinin (AYS) enbüyüklenmesi için rastgele yerleştirilmiş KAA düğümlerinin belirli bir ızgara (grid) olarak düzenlenmiş bir dizi ilgi noktasını (İng. points of interest) kapsamı için olasılıksal  $k$ -kapsama (İng. probabilistic  $k$ -coverage) algoritması önerilmiştir.  $k$ -kapsama, her ilgi noktasının en az  $k$  aktif düğüm (yani uyku modunda olmayan düğümler) tarafından algılanması olarak tanımlanır. Ayrıca, aktif algılayıcı düğümler bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak, bu çalışmada amaç, genel  $k$ -bağlılığın (yani,  $k > 1$ ) aksine yalnızca 1-bağlantıyı kurmaktır (yani,  $k = 1$ ).

Genel olarak, KAA'ların bağlantı sağlamlığı üzerine araştırmalar, düğüm konuşlandırması, bağlantı restorasyonu ve bağlantı algılama sınıfları olarak kategorize edilebilir. Düğüm konuşlandırması üzerine araştırmalar çoğunlukla, Sheikhi ve ark. ile Yun ve ark. tarafından düğümler arasında bağlantı kurmak [36, 37], Zrelli ve ark. ile Tripathi ve ark. tarafından kapsanan alanı [38, 39] veya Navarro ve ark. tarafından AYS'yi [40] enbüyüklemek için yöntemler veya modeller tasarlamakla ilgilenmektedir. Düğümlerin önceden tanımlanmış konumlara konuşlandırılması Yun ve ark. ve Singh ve ark. tarafından [37, 41] ve bunların iletim güçlerinin belirlenmesi Panda ve ark. ile Bagci ve ark. tarafından [42, 43],  $k$ -bağlılığı başarmak için göze çarpan dağıtım yöntemleri olarak çalışılmıştır. Düğümlerin önceden tanımlanmış konumlara konuşlandırılması, potansiyel olarak verimli bir  $k$  bağlantılı ağ oluşturabilmesine rağmen, bazı uygulamalarda, özellikle düzensiz ve zorlu ortamlarda düğümleri belirli konumlara yerleştirmek her zaman mümkün değildir [44]. Algılayıcı düğümlerin iletim güç seviyelerinin artırılması ek bağlantıların oluşturulmasına yol açabilir ve bu da istenen  $k$  değerine sahip  $k$  bağlantılı bir ağın kurulmasını kolaylaştırır, ancak daha yüksek iletim güç seviyesinin kullanılmasının enerji tüketimini artıracığı ve AYS'si kısıltacağı aşikardır [45].

Herhangi bir ağın kaç  $k$ -bağlı olduğunu belirlemek veya tahmin etmek üzere geliştiri-

len ve  $k$ -bağlılık analiziyle ilgilenen ilk algoritma tasarımları [46, 47]'de sunulmuştur. Belirli bir ağın  $k$  değerini bulmak, çok sayıda sıralı [48] ve dağıtılmış algoritma [49–51] tarafından ele alınan iyi bilinen bir çizge teorisi (İng. graph theory) problemidir. Belirli bir ağın  $k$  değerinin saptanması, potansiyel olarak, ağın hata toleransı ve güvenilirliği hakkında değerli bilgiler ortaya çıkarabilir. Sualtı optik kablosuz ağlarının  $k$ -bağlılık tabanlı güvenilirliğinin bir analizi, veri hızı, dalga boyu, hata olasılığı, iletim gücü ve diğerlerinin yanı sıra düğüm yoğunluğunun etkileri dikkate alınarak [34]'te sunulmaktadır. Restorasyon problemi üzerine yapılan çalışmaların çoğu, bazı düğümlerde veya bağlantılarda yaşanan arızalardan veya sorunlardan sonra kaybolan veya zayıflayan bağlantının restorasyonu için verimli çözümler önermektedir [52, 53]. Belirli bir ağın  $k$  değerini azaltan bir arızadan sonra, yeni algılayıcı düğümlerini uygun konumlara yerleştirerek veya mevcut düğümleri uygun yeni konumlara taşıyarak ağın  $k$  değeri istenen değere geri getirilebilir.

AYS, tartışmasız, KAA'lardaki en önemli hizmet kalite ölçüm metriklerinden birisidir [24, 31, 54]. Öte yandan, KAA'ların güvenilir şekilde çalışması da özellikle sualtı ağları için önemli bir amaçtır [23].  $k$ -bağlılığı sürdürmek, özellikle yüksek  $k$  değerleri için ağ bağlantısı güvenilirliğini sağlamanın sağlam bir yöntemidir. Bununla birlikte,  $k$ -bağlantı dağıtımı, algılama ve yeniden konuşlandırma sorunlarıyla ilgili mevcut çalışmaların çoğu 1-bağlantıya (yani,  $k = 1$ ) odaklanmaktadır.

KAA'larda iletim güç seviyesi (İGS) birçok perspektiften incelenmektedir [55–58]. Bu perspektiflerin analiz edilmesi amacıyla Pantazis ve Vergados [56] bir çalışma yayınlamıştır. İletim güç kontrol yaklaşımları olarak KAA'larda üç ayrı ana kategori olduğu söylenebilir. Bunlar ağ seviye stratejileri [59], düğüm seviye stratejileri [60, 61] ve link seviye stratejileri [55, 62–65]'tir. Tek bir iletim güç seviyesinin kullanıldığı çözümler ağ seviye stratejilerini oluşturmaktadır. Bu stratejilerde herhangi bir eniyileme yapılmamaktadır. Kullanılacak iletim güç seviyesinin eniyilendiği ve düğümlerin komşu düğümlere veri iletirken kullandığı değerlerin buna göre belirlendiği stratejiler ise düğüm seviye stratejilerini oluşturur. Her linkin kullanacağı iletim güç seviyesinin ayrı ayrı eniyilendiği çözümler ise link seviye stratejileridir. Bu üç stratejiden enerji verimliliği açısından en iyi çözümün link seviye temelli iletim güç seviye yaklaşımının olduğu gösterilmiştir [55].

[45]'te, iki özel durum için  $k$  değeri ile AYS arasındaki ilişki araştırılmaktadır. İlk durumda, her bir algılayıcı düğüm, bağlantıda taşınacak veri miktarının yanı sıra veri iletmek için (belirli bağlantıdaki akış sıfır değilse) giden bağlantılarının her biri için en optimum iletim güç seviyesini (İGS) kullanır. Bu İGS'nin kullanılması, elde edilebilecek maksimum AYS'nin elde edilmesini sağlar. İkinci durumda, her bir algılayıcı düğüm, verilerini göndermek için kullanılabilir en yüksek İGS'yi seçerek ağın mümkün olan en yüksek  $k$  değeriyle sonuçlanmasını hedefler. İlk durum, ikinci duruma kıyasla %35 daha fazla AYS'ye sahip olur. Bununla birlikte, ikinci durum %20 daha fazla  $k$  değerleriyle sonuçlanır, çünkü iletim güç seviyesinin artması bağlantı sayısını artırır ve bu da ağın  $k$  değerini artırır.

KAA'ların modellemeleri ve analizlerinin son zamanlarda önem kazanmasıyla beraber literatürde bu sorunu çözmek için genellikle matematiksel programlamanın kullanımının giderek arttığı görülmektedir. KAA'ların matematiksel modelleme için kullanım alanlarına dair özet bilgilerin [66, 67] yayınlarında bulunabileceği söylenebilir. İGS'lerin eniyelenmesi amacıyla KAA'ları matematiksel programlama araçlarıyla tasarlayan çalışmalar iki ayrı gruba ayrılabilir. Bunlardan ilki olan sürekli iletim güç seviyesi varsayımını kullanır ve bu varsayım her link için uygulanarak AYS'lerin eniyelenmesi hedeflenir [31, 68–71]. İkinci gruptakiler ise ayrık iletim güç seviyesi varsayımıyla İGS'ler eniyelenerek AYS'lerin uzatılması hedeflenmiştir [72–75].

KAA'ların AYS'leri, trafik yönlendirme, paket boyutu, yoğunluk, bağlantı ve kapalı alan gibi farklı parametrelerden etkilenebilir. Bu faktörlerin KAA'ların AYS'leri üzerindeki etkisi farklı araştırmalarda incelenmiştir. Örneğin, KAA'larda kullanım ömrünü (AYS) uzatmak ve  $k$  kapsamını (her konumun en az  $k$  düğümü tarafından kapsadığı durumlarda) korumak için farklı çok amaçlı dağıtım yöntemleri önerilmiştir [76–78]. Paket boyutu optimizasyonu, AYS'yi artırmak için kullanılacak iyi çalışılmış başka bir yöntemdir [26, 79]. Enerji farkında trafik yönlendirme algoritmaları da AYS üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [80]. Bununla birlikte, AYS ile ilgili mevcut araştırmalar, esas olarak SKAA'lar için güvenilir olmayan 1-bağlılık üzerine odaklanmıştır.

Ancak yukarıda bahsi geçen çalışmalardan hiçbiri  $k$ -bağlılık ile Ağ Yaşam Süresi arasındaki ilişkiyi tam anlamıyla modelleyememiştir. Yani ilgili  $k$ -bağlılık değerleri için

harcanması gereken ilave enerji maliyetleri çalışılmamıştır. AYS ile  $k$ -bağlılık arasındaki ödünleşmenin spesifik çözümler için hangi tercihlere bağlı kılınacağına dair çözüm bu tez çalışması ile elde edilmiştir.



### 3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

#### 3.1 Genel Bilgiler

Algılayıcılar, fiziksel dünya ile sayısal dünya arasındaki bağlantının kurulmasında büyük rol oynarlar. Bu bağlantı sayesinde, fiziksel dünyada oluşan değişiklikler yakalanarak ortaya çıkarılabilir, işlenebilir, saklanabilir ve üzerinde günümüzde bilinen tüm yöntemlerle işlem yapılabilir. Bu algılayıcıların bir çok cihaza, makineye ve ortama entegre edilmesi, muazzam bir toplumsal faydaya dönüşebilir. Birçok kritik altyapıda oluşabilecek sorunların felaketle sonuçlanabilmesine engel olması, değerli doğal kaynakların korunması, üretkenliğin artırılması, güvenlik bağlamındaki katkıları ve bağlama duyarlı sistemler ve akıllı ev teknolojileri gibi yeni uygulamaları etkinleştirmeye yardımcı olması bu faydalardan birkaç tanesi olarak sayılabilir.

Çok Geniş Ölçekli Tümeleşim (İng. Very Large Scale Integration (VLSI)), mikroeletromekanik sistemler (MEMS) ve kablosuz iletişim gibi teknolojilerdeki olağanüstü gelişmeler, algılayıcı sistemlerin yaygın kullanımının artmasındaki en büyük etkenlerdir [81–86]. Yarı iletken teknolojisindeki etkileyici gelişmeler sayesinde mikroişlemciler boyut olarak küçülmeye devam ederken, işlemci kapasiteleri anlamında büyümektedirler. Bilgi işlem ve algılama teknolojilerinin giderek küçülmesiyle, boyut olarak küçük, güç tüketimi azalan ve maliyet olarak ucuz algılayıcıların geliştirilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu algılayıcılardan belirli bir alanda çok sayıda kullanılması ile Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) oluşmaktadır.

Savunma ve havacılık sektörleri hala KAA'ların gelişmesinin ana sebebi olsa da, sivil altyapıyı (köprüler ve tüneller gibi), ulusal elektrik şebekesini ve boru hattı altyapısını izlemek ve korumak için de bu alana odaklanmanın arttığı söylenebilir [29]. Yüzlerce algılayıcı düğümden oluşan ağlar, çevre kirliliğini ve taşkınları modellemek ve tahmin etmek, titreşim algılayıcılarını kullanarak köprülerde yapısal sağlık bilgisi toplamak ve mahsul sağlığını ve miktarını iyileştirmek için su, gübre ve böcek ilacı kullanımını

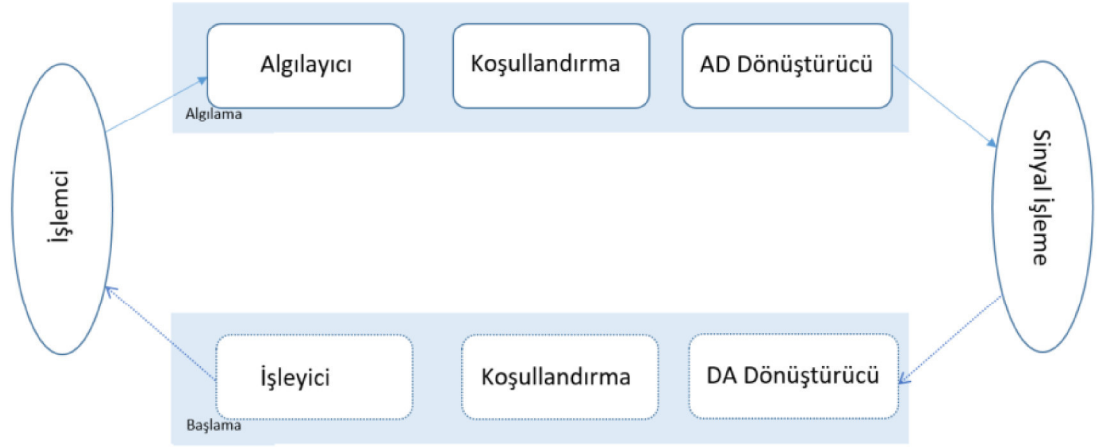
kontrol etmek için geniş coğrafi alanları izlemek için halihazırda kullanılmaktadır.

Ancak gelinen bu noktada dahi enerji kaynağının kısıtlı olmasından dolayı -çoğunlukla iki adet kalem pille çalışmaktadır- haberleşme menzillerinin kısa olması, yapılacak çalışmalar enerji eniyilemesinin ne kadar önemli hale geldiğinin büyük bir göstergesidir. Çünkü KAA düğümleri genellikle tekrar ulaşılması zor ve maliyetli olan yerlere kondukları için pillerinin değiştirilmesi genellikle mümkün olmamaktadır.

### 3.2 Algılayıcılar

Algılayıcılar, etrafta oluşan değişikliklerden (sıcaklık veya basınçtaki düşüş gibi durum değişiklikleri), fiziksel bir nesne veya süreç hakkında bilgi toplamak için kullanılan cisimlerdir. Örneğin, insan vücudu çevreden optik bilgileri alabilmesi için gözlerle, ses ve koku gibi akustik bilgileri alabilmesi içinse kulak ve burun gibi algılayıcılarla yaratılmıştır. Bu örnekteki algılayıcıların izlenen nesneye dokunmasına gerek olmadığı için bunlara uzak algılayıcılar denmektedir. Teknik açıdan algılayıcılar, fiziksel dünyadaki parametreleri veya olayları ölçülebilen ve analiz edilebilen sinyallere çeviren bir cihazdır. Yaygın olarak kullanılan diğer bir terim ise, enerjiyi bir formdan diğerine dönüştüren bir cihazı tanımlamak için sıklıkla kullanılan dönüştürücüdür. Öyleyse bir algılayıcı, fiziksel dünyadaki enerjiyi bir bilgisayar sistemine veya kontrolöre iletebilen elektrik enerjisine dönüştüren bir dönüştürücü türüdür. Bir algılama (veya veri toplama) görevinde gerçekleştirilen adımların bir örneği Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Fiziksel dünyadaki olaylar (genellikle süreç, sistem veya tesis olarak adlandırılır) bir algılayıcı cihazı tarafından gözlemlenir.

Birçok KAA, fiziksel dünyayı doğrudan kontrol etmelerine izin veren eyleyici (İng. actuators) de içerir. Örneğin, bir eyleyici, sıcak su akışını kontrol eden bir valf, bir kapı veya pencereyi açan veya kapatan bir motor veya bir motora enjekte edilen yakıt miktarını kontrol eden bir pompa olabilir. Böyle bir kablosuz algılayıcı ve eyleyici ağı (WSAN), işlem cihazından (kontrolör) komutları alır ve bu komutları eyleyici için giriş sinyallerine dönüştürür, bu daha sonra fiziksel bir işlemle etkileşime girerek kapalı bir kontrol döngüsü oluşturur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Veri toplama ve çalıştırma.

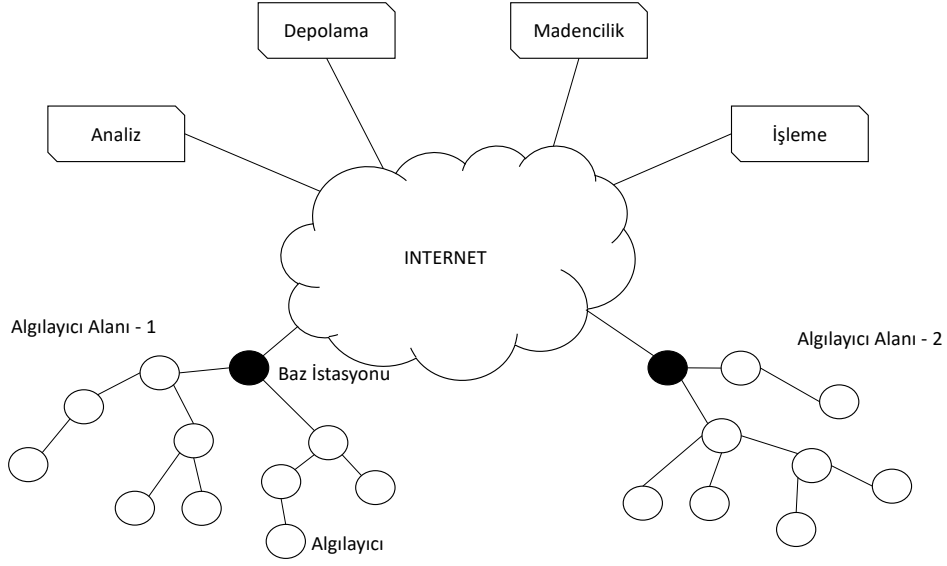
### 3.2.1 Algılayıcıların sınıflandırılması

Hangi algılayıcının kullanılması gerektiği ilgili uygulamanın fiziksel özelliklerine (sıcaklık, basınç, ışık, nem vb) bağlıdır. Çizelge 3.1’de, hangi algılayıcı tipinin hangi örnekler için kullanılmasının uygun olacağına dair özet bir bilgi verilmiştir.

### 3.3 Kablosuz Algılayıcı Ağlar

Birçok algılayıcı kontrolcüye ve işlem istasyonlarına doğrudan bağlanırken (yerel alan ağlarını kullanarak), algılayıcı sayılarının artmasıyla elde edilen veriler kablosuz olarak haberleşme yoluyla merkezi bir işleme istasyonuna iletir. Çoğu senaryoda yüzlerce hatta binlerce algılayıcı düğümü olması ve bu düğümlerin genellikle uzak ve erişilmez yerlerde olması bu konunun önemini ortaya koymaktadır. Yani, kablosuz algılayıcılar sadece etraftaki verileri algılayan cihazlar olmasının ötesinde elde edilen verilerin işlenmesi, iletilmesi ve bazen bellekte kaydedilmesine imkan sağlayacak ölçüde tasarlanmışlardır. Birçok algılayıcının ortak bir amaca hizmet ederek büyük bir alan hakkında bilgi toplamasıyla Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) oluşmaktadır. Algılayıcı düğümler yalnızca düğümler arası haberleşmezler. Elde edilen verilerin uzaktan işlenmesi, görselleştirilebilmesi, analiz edilmesi ve kalıcı olarak saklanması amacıyla nihai hedefi bir Baz İstasyonudur (Bİ). Örneğin, Şekil 3.2’de görüldüğü üzere iki ayrı KAA farklı iki ayrı coğrafi bölgeyi izlemekte ve Bİ’leri kullanarak internete erişmektedirler.





Şekil 3.2: Kablosuz algılayıcı ağlar.

Çizelge 3.1: Algılayıcıların sınıflandırılması ve örnekleri.

Algılayıcı Tipi	Örnek
Sıcaklık	Termistörler, termokupllar
Basınç	Basınç göstergeleri, barometreler, iyonizasyon göstergeleri
Optik	Fotodiyotlar, fototransistörler, kızılötesi algılayıcılar, CCD algılayıcıları
Akustik	Piezoelektrik rezonatörler, mikrofonlar
Mekanik	Gerinim ölçerler, dokunsal algılayıcılar, kapasitif diyaframlar, piezodirençli hücreler
Hareket, Titreşim	İvmeölçerler, jiroskoplar, foto algılayıcılar
Akış	Anemometreler, kütle hava akış algılayıcıları
Pozisyon	GPS, ultrason tabanlı algılayıcılar, kızılötesi tabanlı algılayıcılar, eğim ölçerler
Elektromanyetik	Hall etkisi algılayıcıları, manyetometreler
Kimyasal	pH algılayıcıları, elektrokimyasal algılayıcılar, kızılötesi gaz algılayıcıları
Nem	Kapasitif ve dirençli algılayıcılar, higrometreler, MEMS tabanlı nem algılayıcıları
Radyasyon	İyonizasyon dedektörleri, Geiger–Mueller sayacı

### 3.3.1 KAA'ların tarihçesi

Diğer birçok teknolojiye olduğu gibi, askeri ve savunma alanındaki ihtiyaçlar, kablosuz algılayıcı ağlarının (KAA) geliştirilmesinin arkasındaki itici güç olmuştur. Modern KAA'ların atası olan ilk kablosuz ağ örneği Amerika Birleşik Devletleri (ABD) tarafından II. Dünya Savaşı sonrası Sovyet denizaltılarını incelemek için tasarlanan Ses Gözetleme Sistemi (İng. Sound Surveillance System – SOSUS) [87] olmuştur. Bu ağ akustik algılayıcıların ve hidroforların Atlantik ve Pasifik okyanuslarına bırakılmasıyla oluşmaktadır. Bu algılama tekniği halen aktif bir şekilde çalışmakta olup artık deniz altındaki hayatın ve volkanik aktivitelerin incelenmesi için kullanılmaktadır. Aynı zamanda, 1978'de, ABD Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı (İng. United States Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA), ağ teknolojileri, sinyal işleme teknikleri ve dağıtılmış algoritmalar gibi algılayıcı ağı araştırma zorluklarına odaklanan Dağıtılmış Algılayıcı Ağları Çalıştayı (DAR 1978) düzenledi. DARPA, 1980'lerin başında Dağıtılmış algılayıcı Ağları (DSN) programını da işletti ve ardından algılayıcı Bilgi Teknolojisi (SensIT) programı açıldı.

Kalifornia Üniversitesi Los Angeles Kampüsünde yapılan çalışmalarda Kablosuz Entegre Ağ algılayıcıları veya WINS kavramını önerilmiştir [88]. WINS projesinin bir sonucu olarak 1996'da üretilen Düşük Güçlü Kablosuz Entegre Mikroalgılayıcı (LWIM) projesi ortaya çıkmıştır [89]. Bu akıllı algılama sistemi, çoklu algılayıcıları, arayüz devrelerini, dijital sinyal işleme devrelerini, kablosuz radyoyu ve mikro denetleyiciyi tek bir yonga (İng. chip) üzerine entegre eden CMOS yongasına dayanıyordu. Kalifornia Üniversitesi Berkeley Kampüsündeki Smart Dust projesiyle [90], zerre adı verilen son derece küçük algılayıcı düğümlerinin tasarımına odaklandı. Bu projenin amacı, eksiksiz bir algılayıcı sisteminin, muhtemelen bir kum tanesi veya hatta bir toz partikülü büyüklüğündeki küçük cihazlara entegre edilebileceğini göstermekti. Berkeley Kablosuz Araştırma Merkezi (BWRC) tarafından yürütülen PicoRadio projesi [91], güç tüketimi çok küçük olan ve kendilerine çalışma ortamının enerji kaynaklarından güç sağlayabilen (güneş ya da titreşim enerjisinden) düşük güçlü algılayıcı cihazlarının geliştirilmesine odaklandı. MIT üniversitesi tarafından geliştirilen  $\mu$ AMPS (micro Adaptive Multidomain Poweraware Sensors) projesi, aynı zamanda, yazılım düzeyinde güç gereksinimlerini azaltmak için veri işleme algoritmalarını yeniden yapılandırma

teknikleri ve dinamik voltaj ölçekleme yapabilen mikro denetleyicilerin kullanımı da dahil olmak üzere algılayıcı düğümleri için düşük güçlü donanım ve yazılım bileşenlerine üretmeye odaklanmıştır [92].

Akademik çalışmaların yanı sıra ticari olarak da birçok KAA uygulaması için çözümler üretilmiştir. Bunlar arasında Crossbow [93], Sensoria [94], Worldsens [95], Dust Networks [96], Ember Corporation [97], ZigBee [98] ve WirelessHART [99] bulunmaktadır [100]. Çizelge 3.2’de 1980’lerden bu yana KAA’larda gelişen önemli özellikler listelenmiştir.

Çizelge 3.2: Ticari amaçlı kullanılan KAA’ların tarihçesi ve özellikleri.

Özellik	İlk Nesil (1980–1990)	İkinci Nesil (2000’lerin başı)	Üçüncü Nesil (2000’lerin sonu)
Boyut	Büyük	Kitap boyutunda	Toz parçası boyutlarında
Ağırlık	Pound	Ounce	Gram
Kurulum Tipi	Fiziksel kurulum veya havadan bırakma	Elle yerleştirme	Serpiştirme
Düğüm Mimarisi	Ayrık algılama, haberleşme, işlemci üniteleri	Entegre algılama, haberleşme, işlemci üniteleri	Tamamen algılama, haberleşme, işlemci üniteleri
Protokol	Tescilli	Tescilli	Standart: WiFi, ZigBee, WirelessHART vb.
Topoloji	Noktadan noktaya, yıldız, çok atlamalı	İstemci-Sunucu, eşler arası (İng. peer-to-peer)	Tamamen eşler arası
Güç Kaynağı	Büyük batarya, kablo beslemeli	Kalem pil	Güneş enerjisi veya nanoteknoloji destekli batarya
Ağ Yaşam Süresi	Saat, gün ve daha fazla	Günler, haftalar	Aylar, yıllar

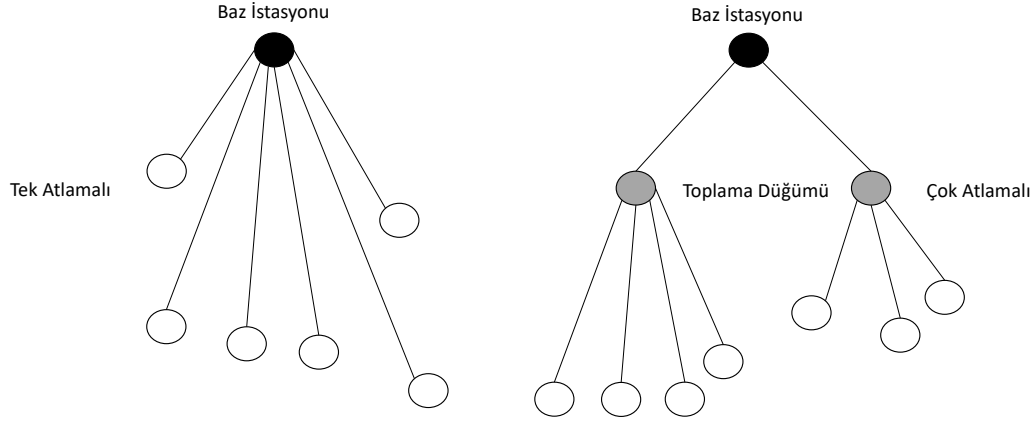
### 3.3.2 KAA'ların haberleşmesi

1997 yılında tanıtılan ve mobil sistemler için en yaygın olarak kullanılan kablosuz ağ teknolojisi olan IEEE 802.11 standardı ilk KAA uygulamalarında da sıkça kullanılmaktaydı. Bant genişliği yüksek KAA uygulamalarında (multimedya servisleri gibi) hala daha kullanılsa da güçlü enerji giderlerinden dolayı bu standart düşük güçlü KAA'lar için uygun olmaktan çıkmaktadır. KAA'ların düşük güç tüketimi ve düşük veri hızları ihtiyacını daha iyi karşılaması için çeşitli protokoller geliştirilmiştir. Örneğin, IEEE 802.15.4 protokolü [101], özellikle düşük güçlü algılayıcı ağlarında kısa mesafeli iletişim için tasarlanmıştır ve çoğu akademik ve ticari algılayıcı düğümü tarafından desteklenmektedir.

Tüm algılayıcı düğümlerinin telsizlerinin iletim menzilleri yeterince geniş olduğunda ve algılayıcılar verilerini doğrudan baz istasyonuna iletebildiğinde, Şekil 3.3'te solda gösterildiği gibi bir yıldız topolojisi oluşturabilirler. Bu topolojide, her bir algılayıcı düğüm, tek bir sekme kullanarak doğrudan baz istasyonu ile iletişim kurar. Ancak, algılayıcı ağları genellikle geniş coğrafi alanları kapsar ve enerji tasarrufu için radyo iletim gücü minimumda tutulmalıdır; sonuç olarak, çok sekmeli (İng. Multi-hop) iletişim, algılayıcı ağları için daha yaygın bir durumdur (Şekil 3.3'te sağda gösterilmiştir). Bu ağ topolojisinde, algılayıcı düğümler yalnızca kendi verilerini yakalayıp yaymakla kalmamalı, aynı zamanda diğer algılayıcı düğümler için röle görevi görmelidir, yani algılayıcı verilerini baz istasyonuna yaymak için işbirliği yapmalıdırlar. Bu yönlendirme problemi, yani bir algılayıcı düğümden baz istasyonuna çok sekmeli bir yol bulma görevi, en önemli zorluklardan biridir ve araştırma topluluğu tarafından büyük ilgi görmüştür. Bir düğüm birden fazla rota için bir röle görevi gördüğünde, genellikle ağdaki algılayıcı verilerini analiz etme ve önceden işleme fırsatına sahiptir, bu da fazlalık bilgilerin ortadan kaldırılmasına veya orijinal verilerden daha küçük olabilecek verilerin toplanmasına yol açabilir.

### 3.3.3 KAA'ların tasarsız ağlara göre avantajları

KAA'ların tasarsız ağlara göre avantajları aşağıdaki gibi listelenmiştir [1]:



Şekil 3.3: Algılayıcı ağlarda tek atlamalı ve çok atlamalı iletişimin karşılaştırılması.

- KAA'lardaki toplam döğüm sayısı genellikle tasarsız ağdakinden fazladır.
- KAA'lardaki döğümler tasarsız ağlara göre daha sık bir şekilde konumlandırılmaktadır.
- KAA'ların topolojisi çok sık değişir.
- Algılayıcı döğümler bozulmaya yatkındır.
- Genel olarak KAA'larda döğümler radyo yayını (İng. broadcast) ile haberleşmeyi sağlarken tasarsız ağlar noktadan noktaya haberleşme teknolojisini kullanırlar.
- Algılayıcı döğümler kısıtlı batarya gücüne, hesaplama kapasitesine ve hafızaya sahiptir.
- Algılayıcı döğümlerdeki trafik yükü fazla olduğu için her döğümün belirleyici bir kimliği olmayabilir.

### 3.3.4 KAA'lar ile geleneksel ağların karşılaştırılması

Geleneksel Ağlar ile Kablosuz Algılayıcı Ağlar arasındaki farklar Çizelge 3.3'te özetlenmeye çalışılmıştır.

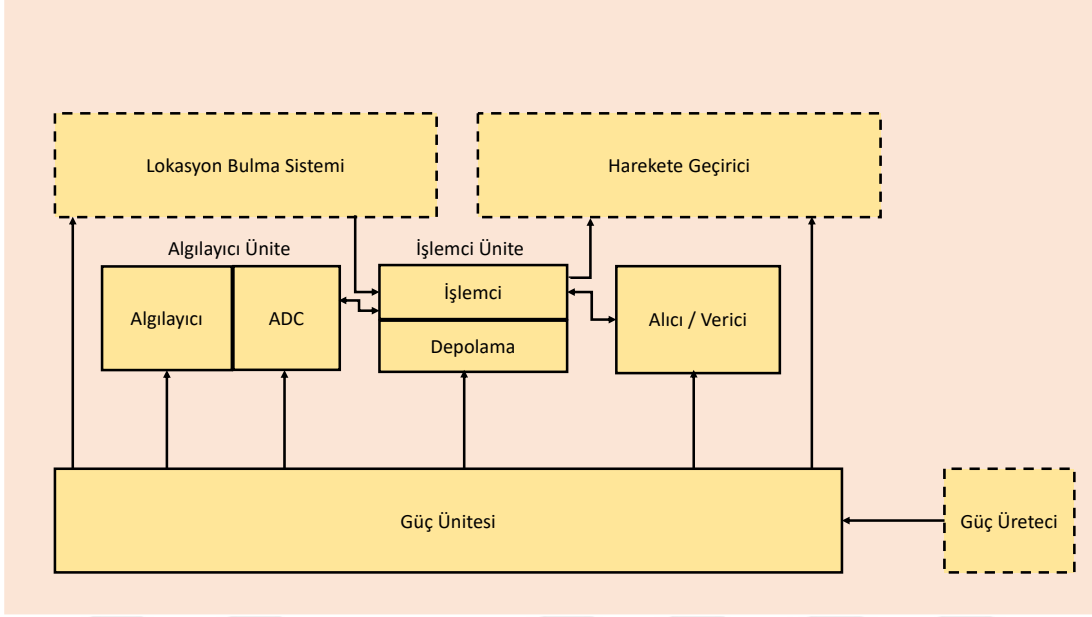
Çizelge 3.3: Kablosuz algılayıcı ağlar ile geleneksel ağların karşılaştırılması.

Geleneksel Ağlar	Kablosuz Algılayıcı Ağlar
Bir çok uygulamaya hizmet vermesi amacıyla genel amaçlı olarak tasarlanır	Belirli bir uygulamaya yönelik tek amaçlı olarak tasarlanır
Ağ performansı ve gecikmeler önceliklidir, enerji eniyilemesi ilk amaç değildir	Tüm tasarımda ve ağ cihazlarında enerji eniyilemesi en önemli hedeftir
Belirli bir plana göre bir ağ tasarımı ve işletimi yapılır	Kurulum, ağ mimarisi ve kaynaklar genellikle tasarsızdır
Cihazlar ve ağlar kontrollü ve hafif ortamlarda çalışır	Algılayıcı ağlar genellikle zorlu koşullara sahip ortamlarda çalışır
Bakım-onarım yaygındır ve ağlara erişim genellikle kolaydır	Algılayıcı düğümlere fiziksel erişim genellikle zordur, çoğunlukla imkansızdır.
Küresel ağ bilgisi elde etmek genellikle mümkündür ve merkezi yönetim mümkündür	Kararların çoğu, merkezi bir yöneticinin desteği olmadan yerel olarak alınır.

### 3.3.5 KAA mimarisi

Bir kablosuz algılayıcı düğümü Şekil 3.4’te görüleceği üzere yedi ana bölümden oluşmaktadır:

1. Algılayıcı ünitesi,
2. Düşük güç tüketimine sahip gömülü bir mikroişlemci ünitesi,
3. Hafıza, bellek,
4. Alıcı-verici çifti (radyo) ünitesi,
5. Her algılayıcı düğüme ait güç (batarya) ünitesi,
6. Yer belirleme sistemi (GPS),
7. Mobilize ünitesi.



Şekil 3.4: Algılayıcı düğümün bileşenleri.

### 3.3.5.1 Algılayıcı ünitesi

Algılayıcı ünitesi, bir veya daha fazla fiziksel algılayıcıyı entegre ederken bir veya daha fazla analogdan dijitale dönüştürücünün (İng. analog-to-digital converter – ADC) yanı sıra bunları paylaşmak için çoğullama mekanizması sağlar. Algılayıcılar sayısal dünya ile fiziksel dünya arasında arayüz oluştururlar. Algılayıcı ünitesi aşağıda belirtilen fiziksel değişimleri gözlemleyebilecek yapıdadır:

- Sıcaklık,
- Nem,
- pH değeri,
- Taşıt hareketi (örneğin, hız ve yön gibi),
- Titreşim,
- Aydınlanma durumu,
- Kirlilik seviyesi,
- Elektromanyetik alan,

- Basınç,
- Fiziksel aktivite
- Toprak kalitesi,
- Nesne takibi,
- Kandaki O2 miktarı
- Gürültü seviyesi.

Sayısal biçime dönüştürülen bu sinyaller mikroişlemci ünitesine iletilir.

### **3.3.5.2 Mikroişlemci ünitesi**

Bir KAA cihazındaki mikroişlemci tarafından yapılan hesaplama görevleri, hem yerel olarak algılanan bilgilerin hem de diğer algılayıcılar tarafından iletilen bilgilerin işlenmesini içerir. Enerji tasarrufu sağlamak için uyku modları ve dinamik voltaj ölçeklendirme gibi gelişmiş düşük güç tasarım tekniklerini birleştirirler [102].

Günümüzde, öncelikle ekonomik nedenlerden dolayı, gömülü işlemciler genellikle hesaplama gücü (küçük MHz alanı) açısından büyük ölçüde sınırlıdır. Bu tür işlemcilerin kısıtlamaları nedeniyle, cihazlar tipik olarak TinyOS gibi özel bileşen tabanlı gömülü işletim sistemleri çalıştırır. KAA düğümlerinde sıklıkla kullanılan mikroişlemciler aşağıda listelenmiştir.

- Intel Strong ARM SA1100 [103],
- Texas Instruments MSP 430 [104],
- Atmel ATmega 128L [105],

Çizelge 3.4'te bu üç mikroişlemciye ait bazı önemli parametreler listelenmiştir.



Çizelge 3.4: KAA’larda kullanılan çeşitli mikroişlemci ünitelerinin karşılaştırması.

Parametre	Intel Strong ARM SA1100	TI MSP430	Atmel ATmega 128L
Çekirdek	32-bit	16-bit RISC	8-bit RISC
Saat Hızı	59-206 MHz	8/16 MHz	8 MHz
Gerçek Zamanlı Saat Hızı	32.768 kHz	32 kHz	32 kHz
Depolama	4 MB	48 KB	128 KB
Bellek	1 MB	4 KB	4 KB
Aktif Mod Güç Tüketimi	1-200 mW	1.2mW	6-15mW

### 3.3.5.3 Hafıza & depolama ünitesi

Depolama ünitesinde hem KAA’da çalışan program hafızası (işlemcinin talimat seti hafızası) hem de veri hafızası (ölçülen verileri ve diğer yerel bilgileri, örneğin düğümün konumu) tutulmaktadır. Belleğin / Depolama Ünitesinin boyutu genellikle ekonomik nedenlerle sınırlıdır. Depolama ürünlerinin maliyetlerindeki azalmanın etkisiyle, algılayıcı düğümlerinde kullanılan depolama ve bellek miktarlarının zamanla artacağı beklenebilir.

### 3.3.5.4 Alıcı-verici ünitesi

KAA’larda optik iletişim (lazer), kızılötesi ve radyo frekansı (RF) olmak üzere üç ayrı iletişim imkanı vardır. Lazer, radyodan daha az enerji tüketir ve yüksek güvenlik sağlar ancak görüş hattı gerektirir ve atmosfer koşullarına duyarlıdır. Kızılötesi, lazer gibi, antene ihtiyaç duymaz, ancak yayın kapasitesi sınırlıdır. RF kullanımı en kolay olanıdır ancak anten gerektirir.

Modülasyon, filtreleme ve demodülasyon gibi çeşitli enerji tüketimini azaltma stratejileri geliştirilmiştir. Genlik ve frekans modülasyonları standart mekanizmalardır. Genlik modülasyonu basittir ancak gürültüye karşı hassastır [106]. RF Monolitik TR1000 ve Chipcon 1000 ticari telsizlerdir ve çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [106, 107]. Chipcon 1000, 300 ve 1000 MHz [107] arasındaki frekanslarda çalışmak üzere daha kolay programlanır.

### **3.3.5.5 Güç ünitesi**

Güç kaynağı bloğu bir pil ve bir DC-DC dönüştürücüden oluşur ve algılayıcı düğümü çevreyi izlemek, iletişimi sağlamak ve hesaplama yapmak için enerjiye ihtiyaç duyduğundan düğüme güç sağlama amacına sahiptir.

Genellikle iki adet kalem pilin kullanıldığı algılayıcı düğümlerde, pillerin 2.0 V ve 3.2 V aralığında gerilimle algılayıcılara güç sağladığı söylenebilir. Algılayıcı düğümünün tasarımını etkileyebileceğinden pil tipini seçmek önemlidir. Aşırı şarj ve/veya aşırı deşarj sorununu önlemek için Akü Koruma Devresi, güç voltaj regülatörü ve diğer bileşenler algılayıcı düğümlerine eklenebilir. Genellikle KAA'lardaki darboğazın sebebi pillerdir.

Çeşitli uygulamalarda kullanılan birçok pil türü vardır. Piller, birincil (şarj edilemez) ve ikincil (şarj edilebilir) olarak ayrılabilir. Ayrıca elektrot için kullanılan elektrokimyasal malzemeye göre NiCd, NiZn, AgZn, NiMh ve Lityum-İyon gibi sınıflandırılabilirler.

Her ne kadar algılama ve veri işleme gibi durumlarda işlemcilerin harcadığı enerji olsa da enerji tüketiminin ana sebebi elde edilen verinin Baz İstasyonuna doğru gönderilmesi amacıyla yapılan iletişimidir [30]. Örneğin, 1 KB boyutunda bir veriyi 100 metre uzakta bulunan bir düğüme iletmek için harcanacak enerji, saniyede 100 milyon komut işleyen bir mikroişlemcide 3 milyon komut işlemek için gereken enerjiye eşittir [108].

### **3.3.5.6 Yer belirleme ünitesi (GPS)**

Ölçülen verileri analiz etmek için birçok KAA'da verilerin hangi konumda izlendiğini bilmek önemlidir. Ancak ne yazık ki, yalnızca birkaç uygulama tasarımcısının algılayıcı

düğümünün konumunu önceden yapılandırmasına izin verir. Özellikle, dış mekan operasyonları için kullanılan rastgele dağıtılan KAA'lar için, GPS'e dayalı konum bulma sistemleri sayesinde gerektiğinde yerleri bulunması için kullanılır [109].

### 3.3.5.7 Mobilize ünitesi

Düğümün algılama işlevini yerine getirmesi için hareket etmesi gereken senaryolarda kullanılan birimdir. Her KAA'da olmak zorunda değildir.

### 3.3.6 KAA platformları

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda genellikle kullanılan algılayıcı düğüm platformları ve bunlara ait işlemciler Çizelge 3.5'te listelenmiştir.

Çizelge 3.5: Algılayıcı düğüm platformları ve işlemcileri.

Algılayıcı Düğüm Platformları	İşlemciler
Imote	ARM 7TDMI
SunSPOT	Atmel AT91SAM9G20
Rene	Atmel AT90LS8535
Cricket, IRIS, FireFly, Waspote, Mica2, MicaZ, BTnode, eko, Medusa MK-2	Atmel ATmega 128L
Dot	Atmel ATmega 163
WeC	Atmel AT90S2313
Netbridge NB-100, Stargate, Imote2	Intel XScale
WINS RockWell, PicoRadio, AMPS	StrongARM SA-1100
Telos, EyesIFX, TelosB/Tmote, Tinynode, SHIMMER	TI MSP430F1611

Bu işlemcilerden Mica [110] düğüm ailesi tez çalışmamızda kullanılmaktadır. Bu aile 2001 yılında üretilmeye başlanmış olup; Mica, Mica2 (Şekil 3.5), Mica2dot ve MicaZ



Şekil 3.5: Örnek bir Mica2 Mote düğümü.

platformlarından oluşmaktadır. Bu cihazlar, CrossBow Technology'nin iki ve üçüncü nesil zerre teknolojileridir. Mica2/MicaZ nem, sıcaklık ve ışık sensörleri ile doğrudan zerreye bağlanan sensörleri bağlamak için arayüz desteği ile donatılmıştır. Bu zerreler, barometrik basıncı, ivmeyi/sismik aktiviteyi vb. ölçebilir. Mica zerrelerinin olası kullanımları, basınç izleme, yapısal sağlık izleme vb. alanlardadır. Zerreler, 2,1 ila 3,6 V DC çalışma aralığına sahip harici 2 adet AA pille çalışır. Ailenin en son üyesi ise detayları Çizelge 3.5'te verilen ve 2004 yılında üretilen Telos/Tmote Sky'dır [111].

Bazı önemli algılayıcı düğüm platformlarına dair daha detaylı karşılaştırma ise Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

### 3.3.7 KAA tipleri

Kullanım alanlarına göre Kablosuz Algılayıcı Ağlar beş farklı alanda kategorize edilebilir. Bunlar mobil, karasal, yeraltı, çoklu medya ve sualtı KAA'lardır [112].

Çizelge 3.6: Bazı önemli algılayıcı düğüm platformlarının karşılaştırması.

Parametre	MICA2	MICAz	TelosB/Tmote Sky	IRIS
Mikroişlemci	Atmel AT-mega128L	Atmel AT-mega128L	TI MSP430F149	Atmel AT-mega1281
Radyo	CC1000	CC2420	CC2420	RF230
RAM	4 KB	4 KB	10 KB	8 KB
EEPROM	512 KB	512 KB	256 B	4 KB
FLASH	512 KB	512 KB	48 B	640 KB
İşletim Sistemi	TinyOS	TinyOS-SOS-MantisOS	TinyOS-SOS-MantisOS	MoteWorks
Yıl	2002	2002	2005	2011
Üretici	Crossbow	Crossbow	Crossbow-Moteiv-UC Berkeley	Memsic

### 3.3.7.1 Mobil KAA'lar

Mobil KAA'lar mobil algılayıcı düğümlerine sahipken, genellikle KAA'lar sabit algılayıcı düğümlere sahiptir. MKAA'lar, sabit KAA'lara göre daha fazla uyarlanabilirliğe sahiptir, çünkü MKAA'lar her durum için kurulabilir ve ani topoloji değişikliklerine göre yer değişikliği gösterebilirler.

### 3.3.7.2 Karasal KAA'lar

Karasal KAA'lar, coğrafi bir alana yerleştirilmiş yüzlerce düğüm içerir. Bu düğümler planlı bir şekilde yerleştirilebileceği gibi tasarsız halde de olabilir ve yerin üstünde oldukları için güneş pilleri kullanılabilir. Enerji tüketiminde, gecikmelerin azaltılması ve düşük görev döngülerini çalıştırılması ile tasarruf sağlanabilir.

### 3.3.7.3 Yeraltı KAA'lar

Yeraltı KAA'lar, toprak bileşimi ve toprak nemi gibi çeşitli yeraltı koşullarını izlemek için kullanıldıkları için tüm ağ düğümleri yeraltındadır. Ancak bilgileri yerin üzerindeki bir baz istasyonuna iletirler. Genellikle önceden tasarlanarak oluşturulan ağlara örnek olarak gösterilebilir.

### 3.3.7.4 Çoklu medya KAA'lar

Çoklu medya KAA'ların farklı uygulamaları arasında trafik yönetimi, hava durumu izleme gibi olayları izlemek için ses, video ve görüntü gibi çoklu medya (İng. multimedia) biçiminde yüksek bant genişliği ihtiyacı olan iletişimi içerir. ÇMKAA'lar, yüksek bant genişliği ve yüksek güç tüketimi gibi daha fazla kaynak gerektirir. ÇMKAA'larda ileri veri sıkıştırma ve iletim tekniklerine ihtiyaç vardır.

### 3.3.7.5 Sualtı KAA'lar

Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlar (SKAA) tezimizde önemli bir odak noktası olduğu için biraz daha detaylı olarak anlatılacaktır.

Dünya yüzeyinin %70'inden fazlası nehirler, kanallar, denizler ve okyanuslar şeklinde sularla kaplıdır. Keşfedilmesi gereken çok sayıda değerli kaynak su altında yatmaktadır. Başarılı keşiflerin anahtarı her zaman teknolojiye bağımlı olmuştur. Teknolojilerdeki son gelişmeler, daha önce mümkün olmayan tüm seviyelerde algılayıcılar kullanılarak sualtı keşiflerinin yapılmasına olanak sağlamıştır. Buna bağlı olarak, sualtı kablosuz algılayıcı ağı (SKAA), su altı keşiflerini kolaylaştıran bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. SKAA, akıllı algılama, akıllı bilgi işlem ve iletişim yeteneklerine sahip son derece küçük mikromekanik algılayıcı teknolojisi ile kablosuz teknolojinin bir birleşimidir. SKAA, kalite, sıcaklık ve basınç gibi suyla ilgili özellikleri algılamak için su altında uzamsal olarak dağıtılan otonom algılayıcı düğümleri ağıdır [113]. Algılanan veriler, insan yararına kullanılacak çeşitli uygulamalar tarafından kullanılabilir. Sabit veya mobil algılayıcı düğümleri, çeşitli ilgi olaylarını aktarmak için iletişim modülleri aracılığıyla kablosuz olarak birbirlerine bağlanır [114]. Sualtı iletişimi esas

olarak, verilerini uzak istasyon olarak da adlandırılan en yakın kıyı izleme ve kontrol istasyonuna ileten yüzer ağ geçidi düğümlerine ileten bir dizi düğüm ile yapılır [115]. Genel olarak, SKAA'lar da iletişim için akustik alıcı-vericiler kullanılır. Akustik dalgalar, küçük bant genişliği sunan ancak uzun dalga boylarına sahip düşük frekanslı dalgalardır. Böylece akustik dalgalar uzun mesafeler kat edebilir ve kilometrelerce bilgi aktarımı için kullanılır [116].

SKAA'lar, bilimsel keşif için deniz ortamının izlenmesi, ticari kullanım ve kıyı şeridinin korunmasından su altı kirliliğinin izlenmesine, su bazlı afet önlemeden su bazlı sporların kolaylaştırılmasına kadar çok çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır. Potansiyel SKAA uygulamalarının kapsamlı bir sınıflandırması Şekil 3.6'da gösterilmektedir [117].

SKAA, zorlu uygulamalar için umut verici bir çözüm sunmaktadır. Ancak, SKAA uygulamaları heyecan verici olduğu kadar zorlayıcıdır. Bunun nedeni, bu tür ağların tasarımında ve konuşlandırılmasında ciddi kısıtlamalar yaratan su ortamının öngörülemeyen koşullarında yatmaktadır.



Şekil 3.6: SKAA uygulamalarına ait sınıflandırma tablosu.

*Öngörülemeyen Sualtı Ortamı* Sualtı koşulları son derece öngörülemezdir. Beklenmedik yüksek su basıncı, öngörülemeyen sualtı faaliyetleri ve sualtı yüzeyinin düzensiz derinlikleri, SKAA'ları tasarlamayı ve yerleştirmeyi zorlaştırır.

*Karmaşık Ağ Tasarımı ve Dağıtım* Öngörülemeyen sualtı ortamı nedeniyle, güvenilir ve kablosuz olarak çalışan ağın sualtına yerleştirilmesi son derece zordur. Mevcut bağlı teknoloji, kısıtlı iletişime izin verir, ancak değişken denizaltı koşullarıyla başa çıkmak için önemli dağıtım, bakım ve cihaz kurtarma maliyetleri gerektirir.

*Ölçeklenemezlik* Geleneksel sualtı keşfi, ya tek bir yüksek maliyetli sualtı cihazına ya da küçük ölçekli bir sualtı ağına dayanır. Mevcut teknolojilerin hiçbiri geniş bir alanı kapsayan uygulamalar için uygun değildir. Ölçeklenebilir bir SKAA teknolojisini etkinleştirmek, devasa bir sualtı alanını keşfetmek için çok önemlidir.

*Güvenilmez Bilgi* Sualtı düğümleri, su akıntıları nedeniyle sürekli hareket halindedir; böylece su altındaki düğümleri bulmak çok daha önemli hale gelmektedir. Geleneksel konumlandırma ve konum belirleme sistemleri su altında çalışmaz. Bu nedenle, su altı koşulları, düğümlerin konumunu ve ağ topolojisini ortadan kaldırır ve bu da bilgi iletimini nihayetinde güvenilir hale getirir.

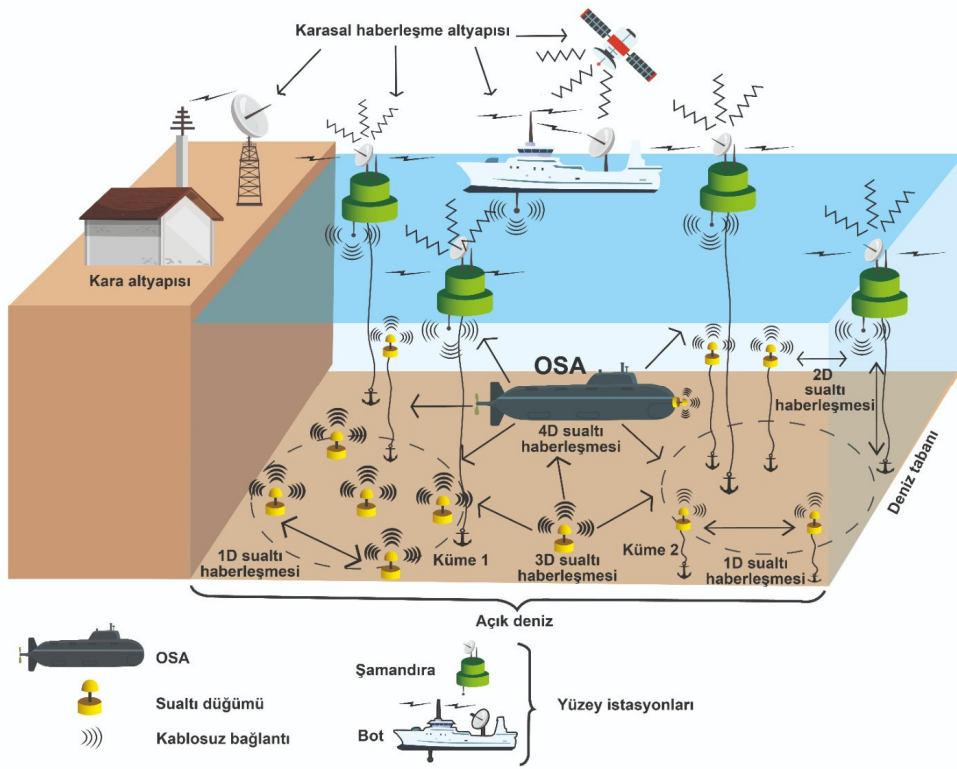
*Düşük Veri Hızları* Radyo frekansı (RF) haberleşmesi su altı haberleşmesinde etkili değildir. Su, RF enerjisinin çoğunu emer ve bu nedenle RF [116] kullanılarak yalnızca çok kısa mesafeli iletişime izin verilir. Bunun yerine, düşük bant genişliği nedeniyle darbe sinyallerini ve düşük doğruluklu bilgileri su altında iletmek için akustik iletişim kullanılmaktadır. Deniz tabanındaki bir balık avı çiftliğinden kaynaklanan kirlilik miktarını ölçmek gibi potansiyel SKAA uygulamaları [118] çok sayıda veri iletilmesini gerektirir. Ancak, bu kadar düşük frekanslarda, bu tür dinamik verileri göndermek için çok zaman gerekir.

*Ekipmanda Fiziksel Hasar* Sualtı cihazlarında kullanılan algılayıcılar, örneğin kamera merceğinde yosun toplanması [119] ve tuz birikmesi, algılayıcıların etkinliğinin azalması vb. gibi rutin su altı zorluklarına karşı hassastır.

*Maliyet* Son olarak, SKAA'ların enerji gereksinimleri ve maliyeti, daha yüksek güce kıyasla yüksektir ve pil yenileme yöntemleri oldukça maliyetlidir.

SKAA'lara ait genel bir topoloji örneğine Şekil 3.7'den, farklı tiplerdeki KAA'ların karşılaştırılması hakkında özet bilgilere ise Çizelge 3.7'den ulaşılabilir.





Şekil 3.7: Genel bir SKAA topolojisi.

Çizelge 3.7: KAA tiplerinin karşılaştırılması.

Mobil KAA	Karasal KAA	Yeraltı KAA	Çoklu Medya KAA	Sualtı KAA
MKAA'nın sabit algılayıcı ağlarına kıyasla avantajları arasında daha iyi kapsama alanı, daha iyi enerji verimliliği ve daha iyi kanal kapasitesi sayılabilir.	Karasal KAA'lar, baz istasyonlarıyla etkin bir şekilde iletişim kurabilir ve dünya üzerinde konuşlandırılmış yüzlerce düğümünden oluşur. Sınırlı güç nedeniyle, pil, ikincil bir güç kaynağı olduğunu gören güneş pilleri ile donatılabilir.	Yeraltı KAA'ları, bakım, dağıtım ve ekipman maliyeti hususları açısından karasal KAA'lardan daha maliyetlidir. Yeraltı ortamı, yüksek düzeyde sinyal kaybı ve zayıflaması nedeniyle kablosuz iletişimi zorlaştırır.	Bu algılayıcı düğümleri, kablosuz bir iletişim yoluyla birbirine bağlanır. Çoklu Medya KAA, yüksek bant genişliği gereksinimleri, yüksek enerji tüketimi, veri sıkıştırma ve işleme tekniklerini içerir.	Sualtı KAA'lar, güvenlik uygulamaları ve sismik izleme için kullanılabilir. Dünyanın 70%'inden fazlasının suyla dolu olması nedeniyle, Sualtı KAA'ları çok önemlidir. Sualtı KAA'ları için enerji tasarrufu sorunu, sualtı kablosuz iletişim ve ağ şemalarının büyümesini içerir.

### 3.3.8 KAA'ların uygulama alanları

Kablosuz Algılayıcı Ağlar üzerine araştırmalar başlarda askeri gözetleme amaçları, hedef takibi, sismik izleme veya radyasyon algılama sistemleri gibi üst düzey uygulamalara odaklanmıştı. Son zamanlarda, ulusal güvenlik uygulamaları için ağ bağlantılı biyolojik ve kimyasal algılayıcılara olan ilgi arttı ve bu alandaki kazanımlar hala ön planda. Ayrıca, hesaplamadaki ilerlemeler ve normal yaşamın yükselen teknolojikleşmesiyle birlikte, yüksek kar marjı vaat eden tüketici uygulamalarına ilgi de artmaktadır. KAA uygulamaları hakkında geniş kapsamlı bir fikir vermek için kısa bir liste aşağıda sunulmuştur [120]:

#### 1. Çevresel uygulamalar

- (a) Orman yangını algılama
- (b) Sismik izleme
- (c) Sel algılama
- (d) Otomatik tarım
- (e) Ekolojik habitat izleme

#### 2. Askeri uygulamalar

- (a) Görüntüleme ekipmanı
- (b) Savaş alanı gözetimi
- (c) Nükleer, biyolojik ve kimyasal saldırı tespiti
- (d) Hedef izleme
- (e) Düşman kuvvetlerinin izlenmesi

#### 3. Sağlık uygulamaları

- (a) Fizyolojik verilerin uzaktan takibi
- (b) Hastalık önleme

#### 4. Ev uygulamaları

- (a) Ev otomasyonu

- (b) Ev güvenliği
- (c) Yangın algılama

## 5. Ticari uygulamalar

- (a) Endüstriyel ve ofis binalarında çevre kontrolü
- (b) Araç takibi
- (c) Endüstriyel ve ticari ağ bağlantılı algılama
- (d) Trafik akışı gözetimi

### 3.3.9 KAA'ların avantajları

KAA'ların kullanılmasındaki avantajları gösteren güçlü yönleri aşağıda listelenmiştir.

1. **Sağamlık/zorlu çevre koşullarına dayanma yeteneği:** Küçülen boyutları, birçok malzeme aracılığıyla iletişim kurma yetenekleri ve sağlam durumlarda belirli düğümleri kapsama olasılığı nedeniyle, KAA'lar çok çeşitli ortamlarda kullanılabilir. Sert hava koşullarına meydan okumak için tasarlanmıştır. Orman yangını algılama veya sismik izleme gibi durumlar için kullanılmalarının ana sebebi de bu özellikleridir.
2. **Geniş ve tehlikeli alanları kapsama yeteneği:** Birçok alanda altyapı sorunları ve ekonomik kaygılar kablolu ağların kullanılmasını hem çok zorlu hem de çok maliyetli hale getirmektedir. Örneğin, bir savaş alanında kablolu bir ağ kurmak gerçekleştirilmesi imkansız bir senaryodur. KAA'lar, kablolu altyapı ihtiyaç duymamaları ve düşük kurulum maliyetleri nedeniyle bu boşluğu doldurabilir.
3. **Kendi kendini organize eden:** Ağ keşfi ve çok sekmeli yayın yetenekleriyle, KAA'lar kurulum sırasında küçük miktarlarda da olsa kendi kendini organize edebilir. Ağı birkaç düğümü dağıtarak kuran birinin ağı nasıl kurması konusunda eğitilmesine gerek yoktur. Sadece sistemi açması yeterli olacaktır ve gerisi ağın kendisi tarafından organize edilebilir.

4. **Ana düğüm arızalarını çözme yeteneği:** KAA'lar, başka bir yönlendirme yolu kullanarak, yok edilen veya ölü düğümlerden kaynaklanan düğüm hatalarının üstesinden gelebilir. Örneğin, savaş sırasında bir düşman bir gözetleme algılayıcı düğümünü yok ederse, bu sorun tüm ağı etkilemeyecektir.
5. **Düğümlerin hareketliliği:** Düğümlerin hareketliliği, son birkaç yılda büyük bir araştırma alanı olmuştur. Örneğin araçları izlemek için kullanılan Algılayıcı Düğümler kalıcı olarak yer değiştirmektedir. Modern KAA protokolleri ve mimarileri, bu alan kaymalarını yönetebilir ve yönlendirmeyi sürdürebilir.
6. **Dinamik ağ topolojisi:** KAA'lar dinamik bir ağ topolojisine sahip olabilir; bu, topolojinin değişken olduğu ve düğümler tarafından sürdürülecek komşu ilişkilerini belirlediği anlamına gelir. Örneğin, topolojideki bir küme başı düşerse, başka bir algılayıcı devreye girebilir ve küme başının yerini alabilir, bu da topolojinin değişmesine yol açar.
7. **Düğümlerin heterojenliği:** Algılayıcılar tarafından izlenen verilerinin önce dijital sinyallere dönüştürülmesi ve daha sonra iletilmesi gerçeği, özel bir KAA'nın bir ağda çeşitli farklı algılayıcıları içerebilmesi gerçeğine fayda sağlar. Ayrıca her düğüm üzerinde uygulanan birden fazla farklı algılayıcıya sahip olabilir.
8. **Refakatsiz çalışma:** Doğru tasarlanmış ve yapılandırılmış KAA'lar refakatsiz çalışabilir. Bu, kurulum süresinden tasarruf sağlar ve sistemleri yönetmek için yapılması gereken çabayı en aza indirir. Bu avantaj muhtemelen ev uygulamaları için eğitimsiz müşterilerden faydalanmak açısından büyük bir kazançtır.

### 3.3.10 KAA'ların dezavantajları

KAA'ların kullanılmasındaki dezavantajlarını gösteren zayıf yönleri aşağıda listelenmiştir.

1. **Sınırlı enerji kaynakları:** Sabit bir altyapının yokluğunda, kablosuz algılayıcı düğümleri, sahip oldukları az miktarda pille sağlanan gücü dikkatli bir şekilde yönetmek zorunda kalırlar. Bu onların hesaplama gücünü ve bellek boyutunu

sınırlar ve daha yüksek enerji maliyetleri nedeniyle tam bant genişliği kullanmalarını engeller. Yalnızca pil gücüyle çalışmak, belirli bir kullanım ömründen sonra pil boş olduğu için bir algılayıcı düğümünün öleceği anlamına da gelir. Diğer şeylerin yanı sıra, bu gerçek, göz önünde bulundurulması gereken ciddi güvenlik sorunlarına (4. maddeye bakınız) yol açmaktadır.

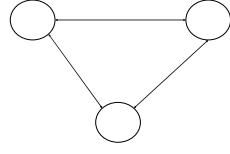
- 2. Daha düşük veri hızları:** Genel olarak kablosuz ağların en büyük sorunlarından biri düşük veri hızlarıdır. Bir zaman periyodunda iletilebilecek veri miktarı, kullanılan frekansa bağlıdır. Daha yüksek bir frekans, daha yüksek veri hızlarıyla sonuçlanır, ancak aynı zamanda daha fazla parazit sorununa neden olur. Bu, kablosuz ağların kablolu alternatifleri kadar hızlı olamayacağı gerçeğine yol açar.
- 3. İletişim hataları:** Kablosuz Ağlar, kablolu ağlara göre daha yüksek hata oranına sahiptir. Paketleri iletmek için elektronik dalgalar kullanılır ve bu dalgalar yansıma, kırılma, kırınım veya saçılma gibi olaylardan etkilenebilir. Bu fenomenler paketi parçalayabilir veya bozabilir ve bu şekilde iletimde hata üretebilir.
- 4. Güvenlik sorunları:** Genel olarak Kablosuz Ağlara dışarıdan saldırmak kablolu sistemlere göre çok daha kolaydır. Kablosuz kanal, istenmeyen dinleyiciler tarafından erişilebilir durumdadır, birkaç pasif ve aktif saldırı gerçekleştirilebilir. Şifreleme gibi yöntemlerin de enerji kaynakları tarafından kısıtlanmasından dolayı KAA'larda zayıf olma eğiliminde olmasından dolayı güvenlik sorunlarını büyümesine neden olmaktadır.

### 3.3.11 KAA'ların topolojileri

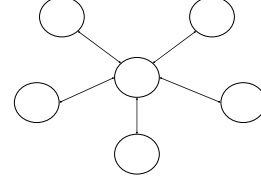
Şekil 3.2'de standart bir KAA mimarisi verilmiştir. Çalışma alanındaki düğümlere ait veriler direk ya da röle düğümler üzerinden baz istasyonuna gelmekte ve bulut hizmetleri kullanılarak merkezde bulunan sunucularda saklanmaktadır. Kullanıcı arayüzü sayesinde veriler üzerinde çalışma yapılabilmektedir.

Düğümelerin rastgele ya da belirli şekilde yerleştirilmesi ile farklı tipte topoloji örnekleri oluşmaktadır. KAA'larda oluşan topolojilere ait çizimlerden bazıları Şekil 3.8'de

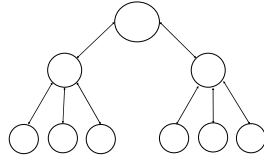
gösterilmiştir. Bunlardan Noktadan Noktaya (İng. Point to Point), Yıldız (İng. star), ağaç (İng. tree) ve örgü (İng. mesh) gibi topolojiler KAA araştırmalarında kullanılmaktadır [121].



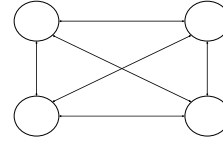
(a) Noktadan  
Noktaya



(b) Yıldız



(c) Ağaç



(d) Örgü

Şekil 3.8: Temsili KAA topolojileri.

Noktadan noktaya kurulmuş topolojilerde merkezi bir yönlendiriciye ihtiyaç duyulmaz. Düğümler, diğer düğümlerle direk iletişim kurabilir. Bu oldukça kullanılan bir topoloji olmakla beraber tek kanala sahiptir. Her düğüm sunucu veya kullanıcı olarak tanımlanabilir [122]. Doğrusal topolojiler de art arda bağlanmış noktadan noktaya topoloji örneklerinden sayılabilir.

Yıldız topolojilerde ise noktadan noktaya kurulan topolojilerin aksine merkezi bir yönlendiriciye ihtiyaç duyulur. Düğümler birbirleriyle direk iletişim kurmak yerine bu yönlendiriciyi kullanmak zorundadırlar [123].

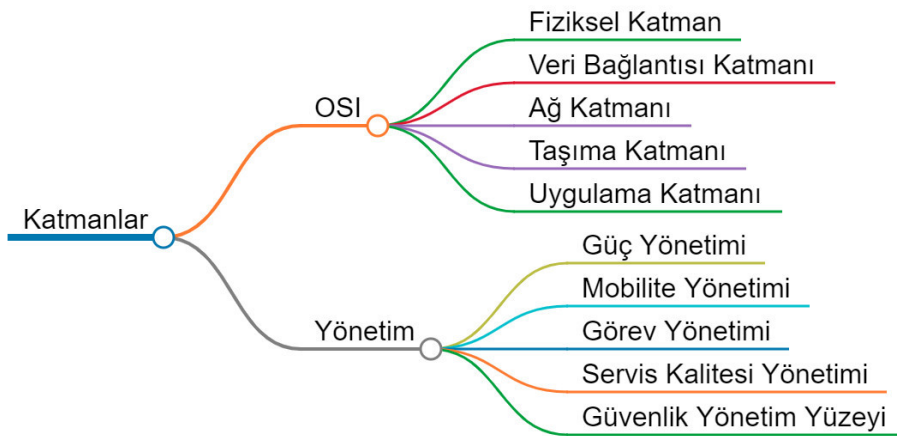
Ağaç topolojileri ise noktadan noktaya topolojiler ile yıldız topolojilerinin birleşiminden oluşmaktadır. Elde edilen veri bir düğüme iletilirken nihai hedef her zaman merkezi yönlendirici olmaktadır. Bu topolojilerin çoğunlukla diğerlerine göre daha az enerji tükettiği söylenebilir [122].

Örgü topolojisinde veriler bir düğümden diğerine aktarılabilir. Tüm düğümler, iletişim

merkezi kullanmadan doğrudan birbirleriyle iletişim kurabilir. Örgü topolojisi yedeklilik anlamında en güvenilir ağ topolojisi olsa da diğerlerine göre daha karmaşıktır ve çok fazla güç tüketir [123].

### 3.3.12 KAA'ların protokol yığını

Algılayıcı düğümler daha önce bahsedildiği üzere hem kendi ürettikleri veriyi hem de kendilerine gelen başka düğümlere ait verileri iletmekle görevlidirler. Bunu yaparken kullandıkları güç ve yönlendirme amaçlarını içeren protokol yığını Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Bahsi geçen veriler güç yönetimine dikkat edilerek kablosuz kanallar vasıtasıyla ağ içine enjekte edilerek gönderilirler.



Şekil 3.9: KAA protokol yığını.

Standart OSI (İng. Open Systems Interconnection) katmanlarının tamamı KAA'lar için kullanılmaktadır. Bunlar; (*fiziksel, veri link, ağ, taşıma ve uygulama*)'dır. İlave olarak *güç, mobilite, görev, kalite servisi ve güvenlik* yönetim yüzeyleri de tüm bu katmanlar için geçerlidir. İlgili katmanlar ve yüzeyler için detaylı bilgiler aşağıda sunulmuştur;

- 1. Fiziksel Katman (İng. Physical Layer):** En alttaki katman olan Fiziksel Katman'ın ana amacı ortam üzerinden bit akışını iletmek için arayüz sağlamaktadır.

Frekans seçimi, taşıyıcı frekans üretimi, sinyal algılama, modülasyon ve veri şifrelemeden sorumlu olan katmandır.

2. **Veri Bağlantısı Katmanı (İng. Data Link Layer):** Veri akışlarının çoğullanmasından, veri çerçevesi (İng. frame) algılamasından, ortam erişim ve hata kontrolünden sorumlu olup, nokta-nokta veya nokta-çok noktali güvenilirliği sağlayan katmandır.
3. **Ağ Katmanı (İng. Network Layer):** Bu katmanın işlevi yönlendirmedir (İng. routing). Güç tasarrufu, sınırlı bellek ve arabellek yönetimi başlıca zorluklardır.
4. **Taşıma Katmanı (İng. Transport Layer):** KAA'ların İnternet veya diğer dış ağlara bağlantısının gerçekleştirildiği katmandır. TCP bağlantısının gerçekleştiği katmandır.
5. **Uygulama Katmanı (İng. Application Layer):** Verileri anlaşılır bir biçimde kullanıcılara sunan ve belirli bilgileri elde etmek için sorgular gönderilebilmesi için arayüz sunan yazılımların çalıştığı katmandır.
6. **Güç Yönetimi (İng. Power Management):** Algılama, işleme ve iletişim için bir algılayıcı düğümünün güç seviyesinin yönetilmesinden sorumludur. Gerektiği durumlar alıcı-verici modülünün kapatılmasını ya da uyutulmasını sağlayan katmandır.
7. **Mobilite Yönetimi (İng. Mobility Management):** Algılayıcı düğümlerin hareketleri için var olan bu yüzey, yeni rotaların üretilmesinden sorumludur.
8. **Görev Yönetimi (İng. Task Management):** Bu tez çalışmasının ana odak noktası olan enerjiyi iyileştirmek ve ağ yaşam süresini uzatmak için algılayıcı düğümleri arasında görev dağılımından sorumludur.
9. **Servis Kalitesi Yönetimi (İng. QoS Management):** KAA'larda servis kalitesi (İng. Quality of Service), veri hizmetleriyle ilgili gerçek zamanlı bir gereksinim varsa çok önemli olabilir. Kalite yönetimi ayrıca belirli kalite metrikleri açısından hata toleransı, hata kontrolü ve performans eniyelenmesi ile ilgilendir.



**10. Güvenlik Yönetim Yüzeyi (İng. Security Management):** Güvenlik yönetimi, bir ağın güvenlikle ilgili davranışını yönetme, izleme ve kontrol etme sürecidir. Güvenlik yönetiminin birincil işlevi, kritik veya hassas verilere erişim noktalarını kontrol etmektir. Güvenlik yönetimi ayrıca şifreleme, kimlik doğrulama ve izinsiz giriş algılama dahil olmak üzere farklı güvenlik işlevi modüllerinin sorunsuz entegrasyonunu da içerir.

### 3.3.13 KAA'ların güvenliği

Özellikle askeri, sağlık gibi konular için oluşturulmuş KAA uygulamaları için gizlilik ve güvenlik oldukça önemli bir husustur. Örneğin, hasta sağlık kaydının gizliliği ya da askeri bir uygulama esnasında elde edilen verilerin gizliliğinin üçüncü şahıslara ifşa edilmesi çok ciddi sonuçlara sebep olabilir [124, 125].

KAA'ların güvenliğini ihlal etmek için yapılan saldırılar aktif saldırılar ve pasif saldırılar olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Aktif ataklarda saldırgan genellikle hedeflenen ağdaki operasyonu ciddi şekilde etkileyebilir. Pasif ataklara kıyasla çok çabuk fark edileceği için saldırganın ana amacının bu etki olduğu söylenebilir.

Aktif saldırılara örnek olarak, delik saldırıları (kara delik, lavabo deliği, solucan deliği vb.), Hizmeti engelleme (DoS) saldırıları, sıkışma saldırıları, sel saldırıları ve son olarak Sybil saldırıları verilebilir. Pasif saldırılarda, saldırganlar genellikle fiziksel olarak gizlenir ve veri toplamak için veri bağlantısını kopyalar veya ağın herhangi bir işletim birimini yok eder. Pasif saldırılar, gizli dinleme saldırısı, düğüm kurcalama saldırısı, düğüm arızalı saldırı, düğüm imha saldırısı ve son olarak trafik analizi saldırısı olarak gruplandırılabilir [126].

Ancak KAA'larda limitli enerji olması ve düğüm sayısının kimi zaman çok olmasından dolayı güvenlik önlemleri için alınacak aksiyonlar maliyetli olmaktadır. Yine de güvenli bir KAA için veri bütünlüğünü, veri doğrulamasını, veri gizliliğini ve veri tazelikliğini garanti altına alan çözümlerle bir topoloji oluşturmak çok önemlidir.

### 3.3.14 KAA’larda ağ yaşam süresi tanımı

KAA’larda ağ yaşam süresi (AYS) için literatürde birden fazla tanımlama bulunmaktadır. AYS bir ağın ne kadar süre canlı olduğunu ve görevlerini yerine getirebildiğini ifade eder. Hem ağın sağlayacağı maksimum fayda süresini hem de ağın ne kadar güvenilir ve gürbüz olduğunu da tanım altına alabilir.

AYS için ilk düğümün ölmesini (İng. first-node-dies) referans alanlar olduğu gibi bütün düğümlerin ölmesini (İng. all-nodes-die) AYS tanımı için kullananlar da olmuştur. Bazı çalışmalarda ise  $N$  adet düğümden  $k$  tanesinin ölmesi ( $k$ -of- $N$ ) durumu da AYS tanımı olarak alınmıştır [127–129]. Bu çalışmada ise ilk düğümün enerjisinin sıfırlanması (first-node-dies) halinde AYS’nin tamamlandığı kabul edilmiş olup en erken ölecek düğümün en uzun yaşaması üzerine bir eniyileme çerçevesi tasarlanmıştır.

### 3.4 Matematiksel Programlama ve Eniyileme

Matematiksel programlama (MP), istenen hedeflere en iyi şekilde ulaşmak için sınırlı kaynakların en verimli kullanımıyla ilgilendiğimiz özel bir karar probleminin çözüm yöntemlerini araştıran bilim ve sanat dalıdır [130, 131]. Matematiksel bir tanım olarak; bir fonksiyonun enküçüklenmesi ya da enbüyüklenmesi amacıyla yapılan işleme eniyileme denir [132]. Eniyilemeden bahsedilebilmesi için karşı karşıya kalınan problemin birden fazla çözüm yolunun olması gereklidir. Planlama ve endüstriyel planlama, kaynak ve lojistik yönetimi ve karar verme alanları eniyileme tekniklerinin kullanıldığı ve etki alanının çok büyük olduğu alanlardır [131]. Eniyileme; matematik, bilgisayar bilimleri, işletme, ekonomi ve endüstri mühendisliği gibi bir çok disiplinde aktif şekilde kullanılmaktadır.

Matematiksel Eniyileme durumlarına örnek verilecek olursa; bir fabrikadaki forkliftlerin taşıdığı paletleri yerleştireceği yere hangi sırayla ve hangi yolla götürürken en optimum sonucu yani minimum maliyetli çözümü bulma işi bir eniyileme problemidir. Aynı şekilde maksimum kâr elde edebilmek için aynı fabrikanın hammaddeyi nereden alıp, yoğunluklarına göre hangi tesisindeki hangi makinede işleyeceği ve üretilen malzemenin hangi pazarda, kimlere hangi fiyattan satılacağı da yine bir kar eniyileme problemidir.

Benzer şekilde üretim yapan bir firmanın hammaddeyi nereden alacağı, hangi tesisinde hangi makinelerle nasıl işleyeceği, ürettiği ürünleri kimlere ve hangi fiyattan satacağı, sattığı ürünleri nasıl transfer edeceği konusu başka bir eniyileme problemidir. Bu problemin çözümü için bu kez maksimum kâr modeli kullanılmalıdır

### **3.4.1 Matematiksel programlamanın tarihçesi ve özellikleri**

İnsanlık tarihinin başlangıcından bu yana insan, içinde bulunduğu şartlar altında kendisi için en iyi olan hareket tarzına karar verme problemi ile karşı karşıya kalmıştır. Çeşitli kriterlere göre isteğe bağlı yargıda bulunma işlemi, karar verme bilimi olarak bilinir. Ne yazık ki, çok yakın zamana kadar bu kadar önemli bir problem sınıfı için bilimsel bir çözüm yöntemi yoktu. 1930'larda tüm dünyada hüküm süren büyük ekonomik buhrandan kurtulabilmek için karar sorununa sistematik bir yaklaşım gelişmeye başladı ve sonuç olarak 1940'larda yeni bir bilim ortaya çıkmaya başladı.

Aynı zamanlarda vuku bulan 2. Dünya Savaşı devam ederken, Birleşik Krallık'taki askeri yönetim, farklı disiplinlerden bir grup bilim insanını, çeşitli stratejik ve taktik savaş sorunlarına yardım sağlamak için bilimsel bilgilerini kullanmaya çağırdı. İngiliz bilim adamlarının elde ettiği cesaret verici sonuçlar, kısa süre sonra ABD'nin askeri yönetimini benzer faaliyetlere başlamakta motive etti. Bu bilim adamlarının amaçlarına ulaşmak için uyguladıkları metodoloji, askeri hareket araştırmalarıyla uğraştıkları için Yöneylem Araştırması (YA) (İng. Operations Research) olarak adlandırıldı. YA teorilerinin çoğu aslında savaş sırasındaki askeri sorunlardan kaynaklanan pratik gereksinimlere doğrudan yanıt olarak geliştirildi. Savaşın sona ermesinden sonra, YA tekniklerinin iş ve sanayi, ticaret ve yönetim ve günümüz faaliyetlerimizin diğer birçok alanında artan uygulamaları olmuştur. İçinde bulunduğumuz yüzyılın en dikkat çekici gelişmelerinden birinin, belki de en önemlisinin matematiksel programlama yöntemi olan YA tekniklerinin geliştirilmesinin olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu çalışmalarda en büyük etkiyi Dantzig üstlenmiş olup, ABD ordusunda lojistik ve eğitim planlamasını için oluşturduğu Simpleks yöntemini [133] 1947 yılında yayınlamıştır. Dantzig'in çalışması Doğrusal Programlama (DP) alanındaki ilk çalışma olduğu için bu alanın atası olarak anılmaktadır [134]. 2. Dünya Savaşı'nın bitmesinin ardından gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde Simpleks yöntemi de kendi içinde eniyilenmiş ve birçok

alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Yüksek işlemciye sahip bilgisayarların üretilmeye başlanması ve daha karmaşık eniyileme problemlerinin çözümleri için simplex yönteminin yetmediği durumlar oluşmuştur. Kesin çözümü olmayan bu tarz problemlerin çözümü için sezgisel algoritmalar geliştirilmektedir.

Eniyileme yapılacak problemin matematiksel bir probleme dönüştürülebilmesi için aşağıdaki üç bileşene sahip olması gereklidir [131].

- 1. Karar değişkenleri ve değişken sınırları:** Başlangıçta değerleri bilinmeyen ve elde edilmek istenen sonuca göre süreç içinde değiştirilebilen değişkenler ve bunlara ait sınırlardır. Bu sınırlar değiştirilerek değişkenler kontrol edilebilir. Kimi zaman pozitiflik ya da negatiflikleri de birer sınır olarak tanımlanabilir. Örnek olarak üretim bandından çıkacak ürün sayısı bir karar değişkeni olarak tanımlanabilir.
- 2. Kısıtlamalar:** Bir eniyileme problemine ait karar değişkenleri mutlaka belirli sınırlar içinde olmalıdır. Kısıtlar ne kadar fazla ise çözüm uzayı o kadar küçüleceği için problemin çözüm sayısının azalmasına neden olabilir. Bir fabrikadaki üretim bandı sayısı, çalışan işçi sayısı ve depoda bulunan hammadde sayısı kısıtlamalara örnek gösterilebilir.
- 3. Amaç fonksiyon:** Her bir eniyileme problemi bir amaç fonksiyonuna sahip olmalıdır. Bu fonksiyon ilgili problemin matematiksel olarak ifade edilmiş şeklidir. Belirlenecek karar değişkenlerine göre bu amaç fonksiyonu enbüyükleme ya da enküçükleme şeklinde tanımlanabilir.

Eniyileme problemleri değişkenlerin durumlarına göre farklı şekillerde tanımlanabilir. İlgili fonksiyonların doğrusal oldukları biliniyorsa model bir *doğrusal programlama (DP)* (İng. linear programming) olarak tanımlanır. Ancak tanımlı olan fonksiyonlardan bir tanesi dahi doğrusal değilse tüm model *doğrusal olmayan programlama (DOP)* (İng. non-linear programming) olur. Eğer fonksiyon iki değişkene bağlıysa ve doğrusal oldukları biliniyorsa *karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP)* (İng. mixed integer programming) modeli elde edilirken; fonksiyonlardan bir tanesi dahi doğrusal

değilse *karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (KTDOOP)* (İng. mixed integer non-linear programming) modeli edilir.

Eniyileme problemleri; karar değişken sayısına göre tek veya çok değişkenli, karar değişken tiplerine göre sürekli, tamsayılı veya karma tamsayılı, amaç ve kısıt fonksiyonları doğrusal, kuadratik veya doğrusal olmayan, problem formülasyonları ise kısıtlı ya da kısıtsız olarak tanımlanabilir.

### 3.4.2 Doğrusal programlama

Doğrusal Programlama (DP), verilen doğrusal kısıtlamalara tabi olarak doğrusal bir amaç fonksiyonun enbüyüklendiği (veya enküçüklendiği) belirli bir Matematiksel Programlama (MP) sınıfıdır. Bu problem sınıfı, birçok ilginç ve önemli uygulamayı kapsayacak kadar geniştir, ancak değişken sayısı çok olsa bile izlenebilir olacak kadar spesifikdir.

Birçok endüstri, sınırlı bir kaynak kümesini en iyi şekilde tahsis etmek için DP'yi standart bir araç olarak kullanır. Önemli uygulama alanlarına örnek olarak, havayolu ekibi planlaması, nakliye veya telekomünikasyon ağları, petrol arıtma ve harmanlama ve hisse senedi ve tahvil portföyü seçimi sayılabilir.

DP modellerine ait ifade edilebilecek en genel hali Şekil 3.10'da sunulmuştur. Burada  $c_1, \dots, c_n$ ,  $b_1, \dots, b_m$  ve  $a_{11}, \dots, a_{mn}$  belirli sabit değerleri ifade etmektedir.  $x_1, \dots, x_n$  ise verilen kısıtlamalara tabi olarak verilen hedefi eniyilerken değerleri belirlenecek değişkenlerdir.

Maksimum/Minimum $c_1x_1 + \dots + c_nx_n$
Kısıtlar:
$a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1, \quad (3.1)$
$\vdots$
$a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m, \quad (3.2)$
$x_1 \geq 0, \dots, x_n \geq 0. \quad (3.3)$

Şekil 3.10: DP modellerinin genel biçimi.

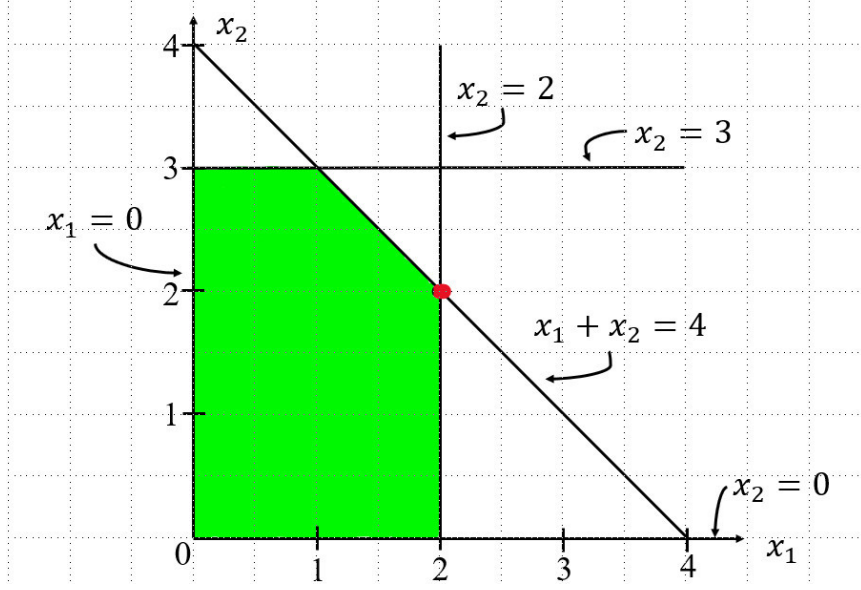
Değişkenler üzerinde negatif olmama kısıtlamalarına ek olarak  $n$  değişken ve  $m$  tane kısıtlama vardır. Kısıtlamalar, değişkenlerin yalnızca doğrusal fonksiyonlarını içerdiğinden doğrusal olarak adlandırılır. Doğrusal oldukları için ikinci dereceden terimlere (örneğin  $x^2$ ) izin verilmez. Enbüyüklenme yerine enküçüklenme hedefleniyorsa  $c_1, \dots, c_n$ 'in işaretleri tersine çevrilerek çözüm sağlanabilir.

Aşağıdaki basit doğrusal programlama örneği konuyu anlamak adına çok yardımcı olabilir. Burada bir fabrikanın üretim bandında üretilen  $x_1$  ve  $x_2$  ürünlerinden elde edilen karı eniyilemek istenmektedir.  $x_1$  için günlük en fazla 2 adet üretilebilirken,  $x_2$  için ise 3 adet üretim sağlanabilmektedir. Üretim bandının limiti ise 4'tür.  $x_1$ 'den elde edilen kar 15 birim iken  $x_2$ 'nin 10 birim karı bulunmaktadır. Şekil 3.11'de bu probleme ait sistem modeli gösterilmektedir.

Maksimum $15x_1+10x_2$	
Kısıtlar:	
$x_1 \leq 2,$	(3.4)
$x_2 \leq 3,$	(3.5)
$x_1 + x_2 \leq 4,$	(3.6)
$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0.$	(3.7)

Şekil 3.11: DP örneği.

Karın eniyilenmesi Şekil 3.11'deki amaç fonksiyonunun enbüyüklenmesi ile bulunabilir. Bu probleme ait tüm olası çözümler Şekil 3.12'deki yeşil alanda gösterilmektedir. Ancak amaç fonksiyonu tüm bu çözümler arasındaki en iyi çözümü aramaktadır. Kırmızı olarak işaretlenen noktanın yani  $x_1 = 2$  ve  $x_2 = 2$  noktalarının yapılan hesaplama için karın enbüyüklendiği değer olduğu söylenebilir. Sonuç olarak amaç fonksiyonuna bu değerlerin yazılması ile  $K = 50TL$  bulunur.



Şekil 3.12: Bir DP örneği için tüm çözüm bölgesi ve eniyilenmiş sonuç.

### 3.4.2.1 DP çözüm yöntemleri

Doğrusal Programlama çözüm yöntemleri aşağıda listelenmiştir.

1. Olurlu çözüm (İng. feasible solution): Elde edilen çözüm DP'ye ait tüm kısıtları sağlıyorsa buna *olurlu çözüm* denir.
2. En iyi çözüm (İng. optimal solution): Olurlu çözümler içinde amaç fonksiyonunu eniyileyen yani enbüyükleyen ya da enküçükleyen çözümlerdir.
3. Olurlu olmayan çözüm (İng. infeasible solution): Eldeki DP'yi çözerken bulunan kısıtlamalara uyan bir çözüm olmaması halinde buna *olurlu olmayan çözüm* denir.
4. Sınırlı olmayan problem (İng. unbounded problem): Olurlu çözüm kümesindeki sonuçlar amaç fonksiyonunu sonsuza götürüyorsa, bu DP'nin *sınırlı olmayan problem* olduğu söylenir.

Zaman içinde DP modellerini çözmek için birçok yöntem bulunmuştur. Bunlardan ilki *grafik yöntemi* [131], bir diğeri *Simpleks yöntemi* [134] ve sonuncusu ise

*Karmarkar yöntemi* [135] olarak gösterilebilir. İki değişken bulunan amaç fonksiyonlarını çözmek için *grafik yöntemi* kullanmak mümkün iken karar değişken sayısı ikiyi geçtiğinde mümkün olmamaktadır. Bu tarz DP'ler için en eski ve ilk çözüm olan *Simplex yöntemi* kullanılabilir. Bu yöntemde temelde olurlu bölgenin uç noktalarını gezerek en iyi çözümü aramak üzere kurulmuş bir tekrarlı bir algoritmadır. Karmarkar çözümü ise olurlu bölgenin uç kısımlarına ilave olarak iç noktalarda bulunan en iyi çözümleri de aramak üzere tasarlanmış bir algoritmadır.

### 3.4.3 Tamsayılı doğrusal programlama

Doğrusal Programlama (DP) modellerinin çoğunun varsayımlarından bir tanesi de değişkenlerin alabilecekleri değerlerin kesirli olabileceği yönündedir. Ancak gerçek hayattaki senaryoların çoğunda değişkenlerin tamsayı olması zaruridir. Örneğin, bir şirkette istihdam edilecek personel sayısının 11,5 olması veya 5,7 adet şirket kurulması mümkün değildir. Karar değişkenlerinin tamamının tamsayılı değer alması gereken DP modeline *tamsayılı doğrusal programlama* (İng. integer linear programming) (ITDP) denir.

Karar değişkenlerinin bir kısmı tamsayılı olacaksa bu modeller *karma tamsayılı doğrusal programlama* (KITDP) modelleri olarak adlandırılırlar. Kimi problemlerde ise karar değişkenleri "evet-hayır", "0-1", "doğru-yanlış" veya "üret-üretme" şeklinde ikili değişken yapıda olabilir. Bu modellere ise *ikili tamsayılı doğrusal programlama* (İng. binary integer linear programming) (İITDP) modeli denmektedir. Bazı karar değişkenleri 0-1 değeri alması, geri kalan değişkenlerin ise sürekli değerler alması durumunda oluşan model ise *ikili karma tamsayılı doğrusal programlama* (İKİTDP) (İng. binary mixed integer programming)'dır.

ITDP modellerinin matematiksel gösterimlerinin DP gösteriminden tek farkı ise modelin sonunda ilgili değişkenlerin tamsayı olacağına dair ifadenin eklenmesidir.

Şekil 3.13'te gösterilen matematiksel modelin DP ve ITDP için grafiksel çözümleri Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Maksimum  $5x_1+4x_2$

Kısıtlar:

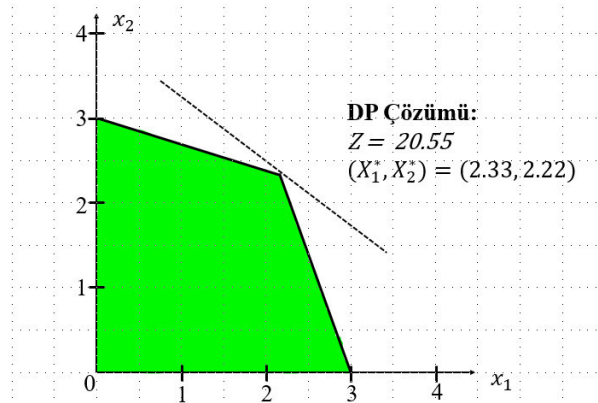
$$10x_1 + 3x_2 \leq 30, \quad (3.8)$$

$$x_1 + 3x_2 \leq 9, \quad (3.9)$$

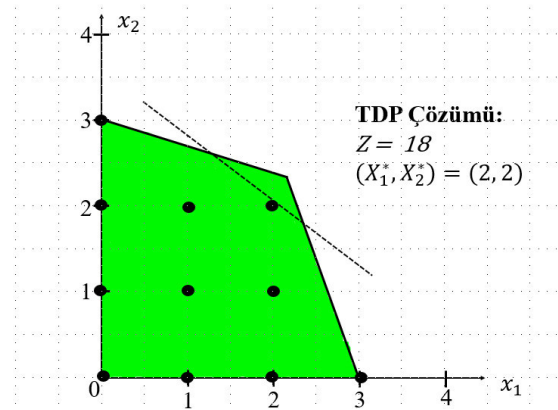
$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \quad (3.10)$$

$$x_1, x_2 \text{ Tamsayı.} \quad (3.11)$$

Şekil 3.13: TDP örneği.



(a) DP çözümü



(b) TDP çözümü

Şekil 3.14: DP ve TDP çözüm karşılaştırması.

Görüldüğü üzere kesirli değerlerin bir alt sayıya yuvarlanması en iyi çözümü veremeyebilir ve hatta bu değer olurlu çözüm bölgesinde bile yer almayabilir. TDP çözümlerinde genelde DP çözümlerinden çok daha zordur. Modelin boyutu arttıkça zorluk katsayısı da artmaktadır. Çünkü;

- DP’de çözüm kesinlikle uç noktalardan birindedir ancak TDP’de böyle bir şart bulunmamaktadır.
- DP’de kullanılan *Simplex yöntemi* tabanlı çözüm algoritmaları uygun bölgedeki uç noktaları deneyerek sürekli amaç fonksiyonunu iyileştirecek şekilde ilerler ve optimallik testi ile bir noktada durur.
- Ancak TDP’de çözüm olurlu bölgedeki bazen on binlerce tamsayı değerinden birisidir ve DP’ye oranla olası çözüm noktası daha fazladır.

#### 3.4.3.1 Tamsayı programlama çözüm yöntemleri

TDP’de kullanılan çözüm tekniklerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

- *Yuvarlama Yöntemi* Akla gelen en kolay çözüm yolu problemi DP ile çözüp, elde edilen değeri en yakın (alt) tam sayıya yuvarlamaktadır. Ancak her zaman doğru sonuç vermeyebilir.
- *DP Gevşetmesi* Bir TDP modelinden tam sayı kısıtının kaldırılıp, sorunu DP olarak modelleyerek çözüme gidilmesine denir (değişken kesirli değer olabilir).
- *Dal/Sınır Algoritması* DP Gevşetmesine ile çözüme başlayarak sürekli yeni tamsayı kısıtları konularak genişleyen bir dizi DP’nin çözülmesi ile sonuca ulaşılır. Teorik olarak her TDP’yi çözebilse de, model büyüdükçe çözüme ulaşma süresi de geometrik olarak artar.

### 3.5 Faydalanılan Uygulamalar ve Analiz Yöntemleri

GAMS (İng. The General Algebraic Modeling System) [136], matematiksel programlama ve eniyileme amaçlı yaygın olarak kullanılan yüksek seviyeli bir derleyicidir.

Eniyileme problemlerinde kullanılmasının yaygın olmasının en büyük sebeplerinden biri içerisinde bulunan IBM ürünü olan CPLEX ve FICA firması ürünü olan XPRESS gibi ticari çözücülerdir. Bu tez çalışmasında XPRESS çözücüsünden faydalanılmıştır. GAMS kodu yazılırken takip edilmesi gereken genel format Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8: GAMS kodunun genel formatı.

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

MATLAB (İng. MATrix LABoratory) [137], Mathworks firması tarafından sunulan, sinyal işleme, kontrol sistemleri, derin öğrenme, makine öğrenmesi ve daha birçok alanda kullanılan bir programlama ve sayısal hesaplama ortamıdır. GAMS tarafından çözülmesi için parametreler (topolojinin büyüklüğü, düğümlerin yerleşiminin rastgeleliği, tekrar sayıları vb.) MATLAB ortamında hazırlanmış ve GAMS-MATLAB entegrasyonu ile GAMS’e gönderilmiş ve eniyileme sonuçları bu ortamda elde edilmiştir. Eniyilenmiş sonuçlar üzerinden elde edilen veriler yine çok güçlü grafik çizdirme

motoru bulunduğu için MATLAB'da grafiksel olarak çizdirilmiştir. MATLAB ayrıca C, C++, Java ve Fortran gibi diller ile birlikte kullanılabilir.





## 4. SİSTEM MODELİ-1

Tez çalışmasının bu bölümünde; Kablosuz Algılayıcı Ağlarda  $k$ -bağlılık odaklı güvenilirlik ile Ağ Yaşam Süresi arasındaki ilişkinin incelenmesi amacıyla tasarlanan sistem modelinin özeti (bkz. Bölüm 4.1), model tasarımı (bkz. Bölüm 4.2), yapılan analizler (bkz. Bölüm 4.3) ve sonuçlar (bkz. Bölüm 4.4) sunulmuştur.

### 4.1 Özet

Ağ yaşam süresi (AYS), Kablosuz Algılayıcı Ağların (KAA) karakterizasyonu için literatürde yaygın şekilde kullanılan ölçütlerden biridir. Ağ güvenilirliği de KAA'ların, özellikle kritik görevlerde kullanılması durumunda, önemli bir parametresi haline gelmektedir. Bununla birlikte, AYS'yi en üst düzeye çıkarmak ile güvenilirliğin artırılması arasında bir ödünleşme vardır.  $k$ -bağlılık açısından güvenilirliğin artırılması ile AYS'nin uzatılması arasındaki ilişki matematiksel programlama çerçevesinde araştırılmıştır. Bu ödünleşmenin niceliksel olarak tanımlanabilmesi için büyük bir parametre uzayında araştırmalar yapılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar, artan  $k$  değerinin, enerji verimsiz yönlendirme yollarını kullanma zorunluluğu nedeniyle AYS'nin önemli ölçüde azalmasına yol açtığını ortaya koymaktadır.

### 4.2 Model Tanımı

Eniyileme problemini bir ağ akış problemine dönüştürebilmek için ağ topolojisi yönlü bir grafik olan  $G = (V, A)$  şeklinde tanımlanmış olup  $V$  kümesinde yer alan düğümler grafiğin kenarlarını ve  $A$  kümesinde yer alan linkler de grafiğin köşelerini tanımlamaktadır. Eniyileme problemini kısaca ifade edebilmek için tüm algılayıcı düğümlerinin kümesi olan  $W$  tanımlanmıştır. Baz İstasyonunun (Bİ) (düğüm-0) bu küme içinde yer almadığı unutulmamalıdır. Düğümler arası linkler  $A = (i, j) : i \in W, j \in V - i$  şeklinde tanımlanmıştır.  $A$  kümesinin tanımı gereği Bİ'nin veri üretmemektedir.

KAA'da Ağ Yaşam Süresi maksimizasyon problemini araştırmak için Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP) çerçevesi oluşturulmuştur. KTDP çerçevesi, KAA'da AYS'yi en üst düzeye çıkarmak için düğümler arasındaki optimum akışları (yani yönlendirme modeli) belirler. Veri link katmanını model kurulumu yaygın olarak kullanılan Mica2 mote [110] algılayıcı düğümlerinin enerji tüketim karakteristiklerinden faydalanılmıştır. Ayrıca, algılayıcı düğümlerine atanan İletim Güç Seviyesine (İGS) göre değişen belirli bir ağ topolojisinin  $k$ -bağlılığını ölçmek için bir  $k$ -bağlılık algılama algoritması kullanılmıştır. KAA'larda  $k$ -bağlılık ile AYS arasındaki ödünleşmeyi analiz edebilmek adına geniş bir parametre uzayı irdelenmiştir.

Her bir düğümden üretilen trafik, baz istasyonuna doğrudan aktarım yoluyla veya röle düğümleri olarak görev yapan diğer algılayıcılar aracılığıyla ulaşır.  $k$  düğümden üretilerek,  $i$  düğümden,  $j$  düğüme akan trafiği ifade etmek için tamsayılı değişken  $f_{ij}^k$  tanımlanarak AYS'yi, yani  $t$ 'yi, enbüyükleyecek KTDP modeli ortaya konmuştur. Mica2 Motes modeli için İGS, iletim mesafeleri ve enerji kaybı değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Mica2 Motes modeli için güç seviyelerine göre, her güç seviyesindeki ( $l$ ) iletim enerji tüketimi [ $E_{tx}(l)$ -nJ/bit] ve iletim mesafesi ( $R_{max}(l)$ -m). Veri alımı için enerji tüketimi sabiti ( $E_{rx}=922$  nJ/bit).

$l$	$E_{tx}(l)$	$R_{max}(l)$	$l$	$E_{tx}(l)$	$R_{max}(l)$
1 ( $l_{min}$ )	671.88	19.30	14	843.75	41.19
2	687.50	20.46	15	867.19	43.67
3	703.13	21.69	16	1078.13	46.29
4	705.73	22.69	17	1132.42	49.07
5	710.94	24.38	18	1135.42	52.01
6	723.96	25.84	19	1179.69	55.13
7	726.56	27.39	20	1234.38	58.44
8	742.19	29.03	21	1312.50	61.95
9	757.81	30.78	22	1343.75	65.67
10	773.44	32.62	23	1445.31	69.61
11	789.06	34.58	24	1500.01	73.79
12	812.50	36.66	25	1664.06	78.22
13	828.13	38.86	26 ( $l_{max}$ )	1984.38	82.92

Bir bit veriyi  $l$  güç seviyesinde iletmek için gerekli enerji kaybı ve  $l$  güç seviyesinde iletilebilecek en fazla mesafeyi gösteren tanımlar sırasıyla  $E_{tx}(l)$  ve  $R_{max}(l)$ 'dir.

$i$  düğümü ile  $j$  düğümü arasındaki mesafe  $d_{ij}$ ,  $R_{max}(l)$  değerinden fazla ise bu iki düğüm arasında veri akmayacağına dair kısıt 4.1’de ifade edilmiştir.

$$f_{ij}^k = 0 \text{ eğer } d_{ij} \geq R_{max}(26) \quad \forall (i, j) \in A, \quad \forall k \in W. \quad (4.1)$$

İletim gücü belirlenirken kullanılan kümenin,  $S_L$  ile ifade edilen sonlu bir küme olduğu ve 26 ayrı güç seviyesi içinden değerler alabildiği unutulmamalıdır.  $d_{ij}$  mesafesine veri iletirken kullanılacak optimum güç seviyesi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$l_{opt-ij} = \underset{i \in S_L, d_{ij} \leq R_{max}(l)}{\operatorname{argmin}} (E_{tx}(l)) \quad (4.2)$$

Örneğin, düğüm-4 ile düğüm-7 arasındaki mesafenin ( $d_{47}$ ) 20 metre olduğunu varsayarsak,  $19.30 \text{ m} < d_{47} \leq 20.46 \text{ m}$  olduğu için düğüm-4 verisini düğüm-7’ye iletmek isterse 2.güç seviyesini ( $l_2$ ) kullanması gerekecektir (yani  $E_{tx}(l_{opt-47}) = 687.50 \text{ nJ/bit}$ ).  $l_{opt-ij}$  güç seviyesi için iletim enerjisi  $E_{tx,ij}^{opt}$  şeklinde ifade edilmiştir.

KTDP çerçevesi (amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar) Şekil 4.1’de sunulmuştur. Amaç, ağ yaşam süresini yani aslında ağın kaç tur hayatta kaldığını enbüyüklemektir. Zamanın, 10 saniyelik sabit süre turları şeklinde düzenlendiğini ve düğümlerin iletişim kurması için çakışmayan zamanlamalar oluşturan bir zaman bölmeli çoklu erişim tabanlı ortam erişim kontrolü (TDMA-MAC) olduğu varsayılmıştır.

Denklem 4.3’te ifade edilen kısıtlar kümesi akış dengelemesini sağlamak için kullanılmaktadır. Her bir kaynak  $k$  düğümü için,  $k$  düğümünden çıkan net veri paket miktarı  $t$  kadardır. Benzer şekilde, kaynak  $k$  düğümü tarafından gönderilen bütün veri baz istasyonunda sonlanmaktadır. Diğer tüm algılayıcı düğümler ne trafik gönderir ne de trafik sonlanan düğüm olurlar (yani aldıkları tüm veriye kayıpsız bir şekilde röle hizmeti sunarlar). Unutulmamalıdır ki, her bir algılayıcı düğüm her bir turda sadece bir veri paketi oluşturmakta ve böylece Denklem 4.3 her algılayıcı düğümünden çıkan tüm akışlar için geçerli olmaktadır. Daha net olması için, her turda  $|W|$  paralel oturum olduğunu ve her oturum için  $|W| - 1$  röle düğümü olduğu varsayılabilir.



Maksimum  $t$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in V, i \neq j} f_{ij}^k - \sum_{j \in W, i \neq j} f_{ji}^k = \begin{cases} t, & \text{eğer } i = k \\ -t, & \text{eğer } i = \text{Bİ} \\ 0, & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad \forall i \in V, \forall k \in W \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in W} f_{jk}^k = 0 \quad \forall k \in W \quad (4.4)$$

$$L_p \sum_{k \in W} \left( \sum_{j \in V} E_{tx,ij}^{opt} f_{ij}^k + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji}^k \right) \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (4.5)$$

$$e_i = \xi \quad \forall i \in W \quad (4.6)$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in W \quad (4.7)$$

Şekil 4.1: AYS'yi enbüyüklemek için kullanılan KTDP çerçevesi.

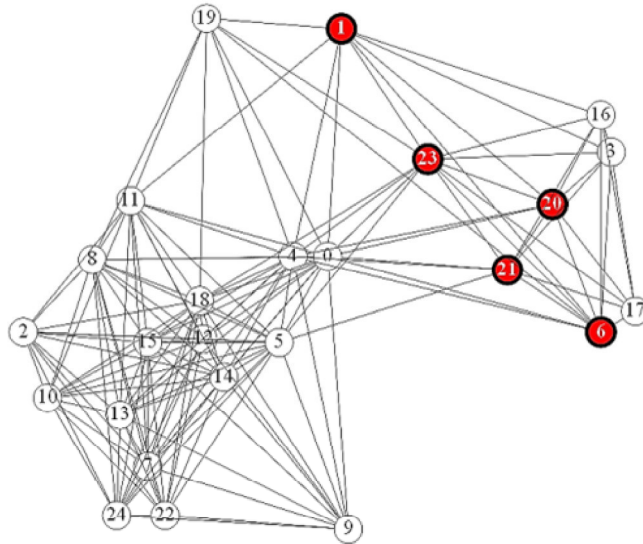
Denklem 4.4 ile veri paketini oluşturan düğüme (yani kaynak düğüm  $k$ 'ya) hiç bir veri paketinin geri dönmediği garanti altına alınır. Denklem 4.5'te ifade edilen kısıtlamalar ile, her bir algılayıcı  $i$  düğümünün enerji tüketiminin belirlenmesi sağlanır. Elde edilen değer  $L_p$  ile çarpılması ile paket sayısı, bit sayısına dönüştürülür. En dıştaki toplam ile tüm oturumlar hesaba katılır. Parantez içindeki ilk toplam,  $k$  oturumu için  $i$  düğüme ait iletim enerjisi tüketimini verir. Benzer şekilde, ikinci toplam ile veri paketi alımları için gerekli enerji tüketim miktarı bulunur. Denklem 4.6 ile algılayıcı ağların enerji bütçelerinin üst limiti belirlenmiştir. Eniyileme değişkenlerinin negatif olamayacağı kısıtı da Denklem 4.7 ile tanımlanmıştır.

KTDP modelinin amacı AYS'yi enbüyüklemek olduğu için İGS'lerin her linkteki iletim gücünü eniyileyecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ağdaki link sayısının, maksimum İGS'nin seçilmesi durumuna göre daha az sayıda olması beklenir. Ancak, maksimum İGS'nin uygulanması halinde  $k$  değerinin en fazla olması da beklenmektedir. Aslında, bu makalede bu ödünleşmenin irdelenmesi amaçlanmıştır. Belirli bir ağın  $k$  değerini bulmak için [33]'te sunulmuş algoritma kullanılmıştır. Denklem 4.5'i değiştirerek, bütün algılayıcıların veri paketlerini optimal İGS'ye,  $E_{tx,ij}^{opt}$ , göre değil de maksimum İGS'ye,  $E_{tx}(l)$ , göre iletmeleri sağlanmıştır. Maksimum İGS kullanılarak AYS tespit edilmiş ve ilgili topoloji için  $k$  değeri hesaplanmıştır. Daha sonra eniyileme problemi çözülerek optimal İGS bulunmuş, buna bağlı AYS ve  $k$  değerleri tespit edilmiştir.

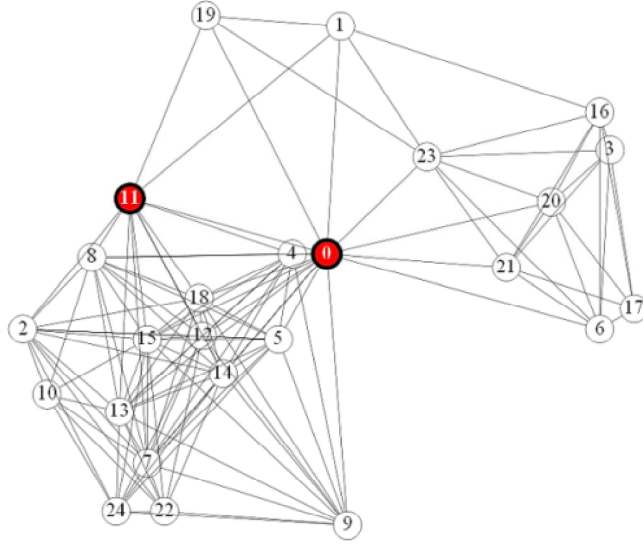
### 4.3 Analizler

100m çapında disk şeklinde bir ağ kullanarak,  $|W|=25,30,35,40,45,50$  kümesi için maksimum İGS ve optimal İGS sistemleri için düğüm yoğunluğunun  $k$  değerlerine etkisi gözlemlenmiştir. İstatistiksel anlamlılığın sağlanabilmesi için tüm değerler 40'ar defa bağımsız şekilde çalıştırılmış ve bunların ortalaması alınmıştır (40 defa rastgele düğüm dağıtımı oluşturulmuş ve AYS ve  $k$  değerleri için ortalama alınmıştır). KTDP modelini çözebilmek için MATLAB ve CPLEX çözücü ile General Algebraic Modeling System (GAMS) kullanılmıştır.

Öncelikle, bir ağda maksimum İGS veya optimal İGS uygulanmasının  $k$ -bağlılık üzerine etkisini örnekleyebilmek için iki adet topoloji çizimi Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.2'de, beş adet düğümün  $k$ -bağlılık ( $k=5$ ) için kritik düğümler olduğu vurgulanmıştır. Eğer bu kritik düğümlerden bir tanesinin enerjisi tükenecek olursa, ağ 4-bağlı olacaktır (yani ilgili KAA için  $k$  değeri 4 olacaktır). Eğer kırmızıyla işaretlenmiş bu beş kritik düğümün tamamının enerjilerinin tükenmesi durumunda, düğüm-3, 16 ve 17 geri kalan KAA'dan ayrık (disconnected) olacaktır. Şekil 4.3'te ise, optimal İGS uygulandığı durumda ağa ait linklerinin durumu gösterilmiştir. Bazı linklerin elenmesi sonucu, bu ağ artık 2-bağlı olsa da, artık daha uzun bir AYS'ye sahiptir.

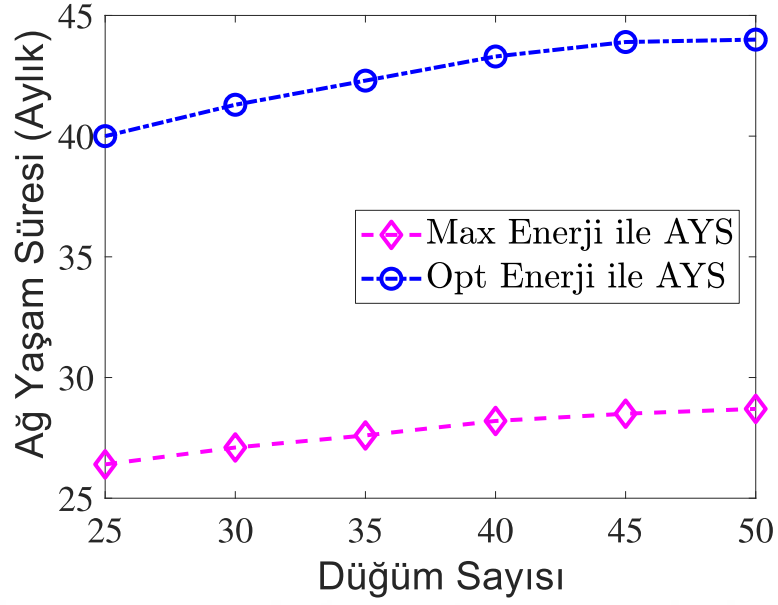


Şekil 4.2: Maksimum İGS için bağılılık grafiği. Vurgulanan düğümler,  $k=5$  kritik düğümlerdir.

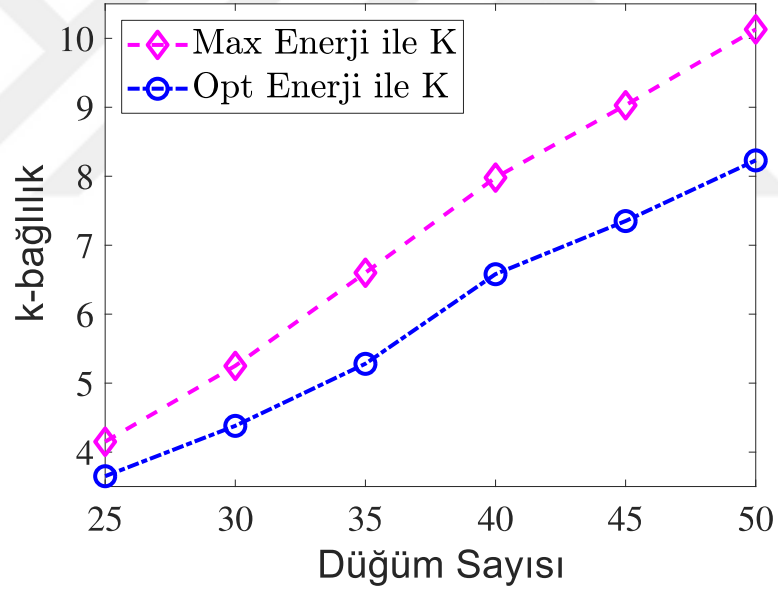


Şekil 4.3: Optimal İGS için bağılılık grafiği. Vurgulanan düğümler,  $k=2$  kritik düğümlerdir.

Şekil 4.4'te ve Şekil 4.5'te sırasıyla AYS ve  $k$  değerleri gösterilmiştir. AYS ve  $k$ , artan düğüm sayısı ile artmaktadır ki, bu da sabit KAA alanı nedeniyle (100m) düğüm yoğunluğunun artması anlamına gelmektedir. AYS, algılayıcı düğümlerinin röle hizmeti verme yükünü daha enerji verimli bir şekilde paylaşabilmesi mümkün olduğu için artar. Düğüm başına ve toplamda artan bağlantı sayısı nedeniyle  $k$  değeri artar. Maksimum İGS durumu için AYS'indeki yaklaşık %35'lik azalmanın sebebi haddinden fazla enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, optimal İGS'nin uygulanması durumunda  $k$  değerinde %12 ile %20 arasında azalma meydana gelmektedir. Aslında,  $k$  değerindeki azalma daha yoğun ağlarda daha fazla olmaktadır çünkü seyrek ağlarda İGS değerindeki azalmanın, yoğun ağlardaki azalmaya karşı daha agresif olması beklenir. Bunun da nedeni ise seyrek ağlarda optimal İGS ile maksimum İGS birbirine eşit olduğunda bazı düğümler hala ağın geri kalanına bağlı olmaya devam edecektir.

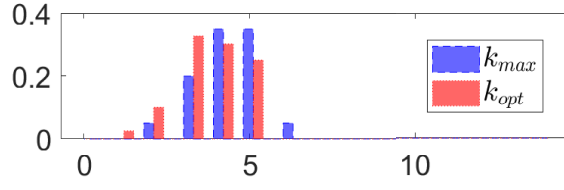


Şekil 4.4: Maksimum İGS ve Optimal İGS rejimleri için  $|W|$ 'ye bağlı olarak AYS grafiği.

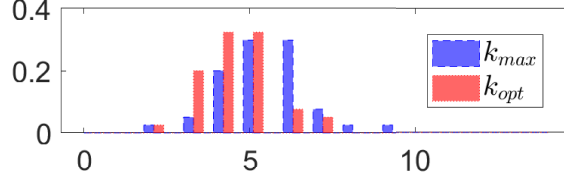


Şekil 4.5: Maksimum İGS ve Optimal İGS rejimleri için  $|W|$ 'ye bağlı olarak  $k$  grafiği.

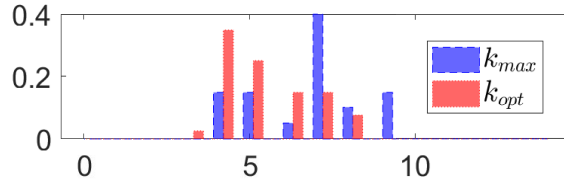
Şekil 4.6'da,  $k_{max}$  ve  $k_{opt}$  sırasıyla maksimum İGS ve optimal İGS için elde edilmiş  $k$  değerlerini ifade etmektedir. Her ne kadar  $k$  değerlerinin ortalamaları hesaba katılmış olsa da,  $k$  değerlerinin dağılımına bakıldığında hem  $k_{max}$  hem de  $k_{opt}$  için uç değerlerden de oluşan geniş bir topluluktan örnekler sunduğu görülmektedir.



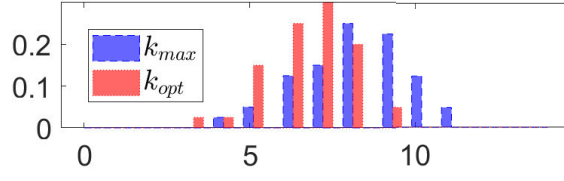
(a) k-bağlılık (25 düğüm)



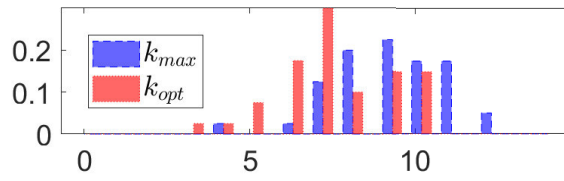
(b) k-bağlılık (30 düğüm)



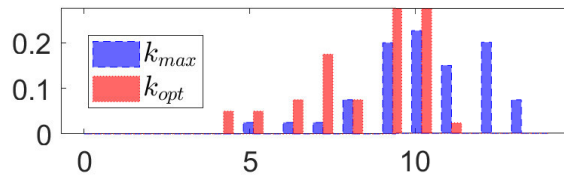
(c) k-bağlılık (35 düğüm)



(d) k-bağlılık (40 düğüm)



(e) k-bağlılık (45 düğüm)



(f) k-bağlılık (50 düğüm)

Şekil 4.6:  $k$  değerinin normalize edilmiş histogramı.

#### 4.4 Sonuçlar

Bu b6l6mde, KAA'larda ağ yaşam s6resi ve  $k$ -bağlılık açısından g6venirlik arasındaki 6d6nleşmeyi inceledik. Maksimum iletim g6c6 seviyesi ve optimum iletim g6c6 seviyesi atama stratejilerinin ağ yaşam s6resi ve  $k$  değerini 6zerindeki etkilerini araştırmak için kullanılan KTDP tabanlı optimizasyon çerçevesinin parametrelerini elde etmek için Mica2 mote'ların fiziksel katman 6zelliklerini kullandık. Sonuçlarımız g6stermektedir ki aynı anda maksimum yaşam s6resine ve  $k$  değerine sahip olmak m6mk6n değildir. Ağ yaşam s6resini enb6y6klediğimiz durumda  $k$  değerinde %20 azalma gerçekleşmektedir. Diğer taraftan,  $k$  değerinin enb6y6klenmesi, ağ yaşam s6resinin %35 oranında d6şmesine neden olmaktadır.



## 5. SİSTEM MODELİ-2

Tez çalışmasının bu bölümünde; Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (SKAA)  $k$ -bağlılık odaklı güvenilirlik ile Ağ Yaşam Süresi (AYS) hakkında bir ön bilgilendirme Bölüm 5.1’de verilmiştir. Ağ temsilini, enerji modelini ve eniyileme çerçevesini kapsayan sistem modeli, Bölüm 5.2’de sunulmaktadır. Eniyileme modelinin çözümlerinden elde edilen sonuçlara dayalı analizimiz Bölüm 5.3’te verilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları ise Bölüm 5.4’te ortaya konmuştur.

### 5.1 Özet

Dünya yüzeyinin yaklaşık %70’i sularla kaplıdır. Bu nedenle, su kütlelerinin izlenmesi, diğerlerinin yanı sıra kıyı araştırmaları, askeri taktik sualtı gözetimi, su ürünleri yetiştiriciliği ve uzun vadeli kirlilik izleme gibi birçok uygulama için pratik bir gerekliliktir [20]. Haberleşme teknolojisindeki (özellikle su altı akustik haberleşme) teknolojik gelişmeler belli bir olgunluk düzeyine ulaştığı için; sualtı kablosuz algılayıcı ağlarının (SKAA’lar) uygulanabilirliği ve verimliliği, yirmi yılı aşkın bir süredir bilimsel, endüstriyel ve askeri uygulamalar için bir gerçeklik haline gelmiştir [21].

Sualtı kablosuz algılayıcı ağları (SKAA’lar), çok çeşitli izleme ve gözetim uygulamaları için hem literatürde çalışılmakta hem de gerçek hayat senaryolarında kullanılmaktadır. Ağ Yaşam Süresinin (AYS) eniyilenmesi ve ağ güvenilirliğinin sürdürülmesi, SKAA’ların kullanılması konusunda en önemli hususlar arasında yer almaktadır.

$k$ -bağlılık, güvenilirliği güçlendirmek için sağlam bir yaklaşım olarak ifade edilebilir. Bununla birlikte, her bir algılayıcı düğümünden Baz İstasyonuna (Bİ)  $k$  ayrık yol varlığının sürdürülmesi, kaçınılmaz olarak, Ağ Yaşam Süresini (AYS) azaltan ekstra enerji tüketimi ile sonuçlanmaktadır. Ancak bu tez çalışmasından önce literatürde bildiğimiz kadarıyla  $k$  değerindeki artışa bağlı olarak AYS’deki azalmanın boyutunu belirlemek için sistematik bir araştırma bulunmadığı tespit edilmiş ve bu konuda ilk çalışma olarak



hazırlanmıştır.

Bu çalışmada, SKAA'larda AYS ile  $k$ -bağlılık bağlamında güvenilirlik arasındaki dengeyi keşfedebilmek için bir eniyileme çerçevesi oluşturulmuştur. Geniş ve dikkate değer bir parametre uzayı için önerilen eniyileme modelinin en iyi çözümleri aracılığıyla, AYS ve  $k$ -bağlılık arasındaki etkileşimi karakterize ediyoruz. Çalışmamız, bir SKAA'da muhafaza edilmesi istenilen  $k$  değerinin AYS'yi önemli ölçüde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Bir SKAA, sıcaklık, basınç ve nem gibi fiziksel olayları izlemek için bir coğrafi alan üzerine yerleştirilmiş çok sayıda yüzer batık algılayıcı düğümünden oluşur. Ayrıca, bir SKAA'da kendisi de su yüzeyinin altında belirli bir derinlikte yüzebilen veya su yüzeyinde yüzebilen en az bir baz istasyonu (Bİ) vardır.

Algılayıcı düğümleri, elde ettikleri verileri Bİ'ye iletir. Erken SKAA'lar, tipik olarak, algılayıcı düğümlerinin ortamdaki aldıkları verileri doğrudan Bİ'ye ilettiği tek atlamalı bir iletişim paradigması kullanmaktaydılar. Etkinleştirme teknolojileri geliştikçe, genişletilmiş ağ alanı, enerji verimliliği ve güvenilirlik [23] gibi avantajlar nedeniyle SKAA'larda çok sekmeli iletişim baskın çalışma modu haline gelmiştir.

Enerji verimliliği ve güvenilirliği, SKAA'larda en önemli performans ölçütleri arasındadır. Algılayıcı düğümlerin sınırlı pil enerjileri olduğundan ve pilleri yenilemek zor veya bazı durumlarda imkansız olduğundan, SKAA'ların enerji israfını önlemesi büyük önem taşımaktadır [26]. Öte yandan güvenilirlik, SKAA'larda enerji verimliliği kadar önemlidir, çünkü bir dağıtım ortamı olarak sualtı zorlu bir ortamdır ve düğümlerin yanı sıra bağlantılar da arızaya eğilimlidir.

$k$  bağlantılı bir ağda her bir algılayıcı düğümünden Bİ'ye en azından  $k$  ayrık yol bulunduğu garanti edilmektedir. Bu nedenle, böyle bir ağda belirli bir algılayıcı düğümünün  $k - 1$ 'a kadar yolu çalışmaz hale gelse bile, algılayıcı düğümünün hala bağlı kalması garanti edilir. Bu nedenle  $k$ -bağlılık, özellikle  $k$  değeri yüksekse, yüksek derecede ağ güvenilirliğini ifade eder.

$k$  bağlantılı bir SKAA'nın bakımı, her bir algılayıcı düğümünden kaynaklanan en az  $k$  ayrık yolları korumak için harcanacak fazladan enerji gerektirir. Bu nedenle,  $k$  bağlantılı bir SKAA'da  $k$  değeri ve Ağ Yaşam Süresi (AYS) açısından güvenilirlik düzeyi

arasında bir değiş tokuş vardır. SKAA'larda  $k$ -bağlılık, nadiren araştırılan bir konudur. Bu konuyla ilgili yalnızca bir çalışma yapılmıştır [34]. Ayrıca  $k$  değerinin kablosuz algılayıcı ağ yaşam süresi (AYS) üzerindeki etkisi de literatürde araştırılmamıştır.

Aslında, Bölüm 4'te  $k$ -bağlılık ve AYS (karasal algılayıcı ağlarında) arasındaki ödünlüşim üzerine yapılan ve literatürdeki tek olan çalışmamızla,  $k$  değerinin AYS'ye etkisini doğrudan olmasa da bir ok etkisi ortaya konmuştur. Bu bölümde detayları verilecek olan çalışmamız ise bu ilişkinin detaylıca incelenmesini içermektedir.

Bu çalışmada, bildiğimiz kadarıyla, literatürde hiç araştırılmamış olan enerji tüketimi ve AYS üzerindeki  $k$  bağlantılı bir SKAA'yı sürdürmenin etkisini sistematik olarak araştırdık.  $k$ -bağlılık ve AYS arasındaki değiş tokuşu karakterize etmek için kullanılan, SKAA ömrü üzerindeki  $k$  değerinin etkilerini modellemek için bir eniyileme erevesi oluşturduk.

Bu çalışmanın başlıca katkıları şu şekilde sıralanmıştır:

1. Literatürdeki boşluğu doldurmak için, verilen herhangi bir  $k$  değeri için SKAA AYS'ni enbüyüklemeyi elde edebilen bir eniyileme erevesi sunuyoruz.
2. Oluşturulan eniyileme çerçevesini kullanarak, literatürde hiç yapılmamış olan SKAA'larda  $k$ -bağlılık ve AYS arasındaki takası bilgimiz dahilinde nicel ve sistematik olarak incelemek için geniş bir parametre uzayını keşfediyoruz.
3. Sonuçlarımız,  $k$ -bağlantı bakımı ile AYS arasındaki ödünlüşimin kapsamının, dağıtım senaryosu ve sistem ayarlarına güclü bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir.

## 5.2 Model Tanımı

Bu bölümde, 5.2.1 ile ağ modeli hakkında bilgi verilmiş, 5.2.2 ile enerji dağıtım modeli tanımlanmış ve 5.2.3 ile de eniyileme çerçevemizi detaylandırılmıştır. Çizelge 5.1'de ise bu bölümde kullanılan sembollerin ve notasyonların listesi sunulmuştur.

Çizelge 5.1: Bölüm 5.2’de kullanılan sembollerin ve notasyonların listesi.

Sembol	Açıklama	Birim	Değer	Sembol	Açıklama	Birim	Değer
$A$	Tüm bağlantılar kümesi	–	–	$a_{ij}^{\ell}$	$l$ yolu üzerinde düğüm- $k$ tarafından oluşturulan verinin $(i, j)$ bağlantısı üzerinden akıp akmadığını gösteren ikili değişken	–	–
$b_k^l$	$l$ yolu üzerindeki kaynak düğüm- $k$ tarafından ağa enjekte edilen toplam paket sayısı	paket	–	$d_{ij}$	düğüm- $i$ ve düğüm- $j$ arasındaki mesafe	m	–
$d_x$	Ağ genişliği	km	1	$d_y$	Ağın uzunluğu	km	{1, 2, 3}
$d_z$	Ağ derinliği	km	0.30	$E_T(\ell)$	$\ell$ -Güç seviyesinde iletimin enerji maliyeti	J/bit	–
$E_{T,ij}^*$	Bağlantı- $(i, j)$ üzerinden iletim için yenilenmiş iletim enerjisi	J/bit	–	$f$	Çalışma frekansı merkezi	kHz	25
$G$	Ağ grafi	–	–	$I_{jm}^i$	Girişim matrisi	–	–
$k_s$	Yayıma faktörü	–	1.5	$\mathcal{L}$	Ayrık güç seviyeleri seti	–	{1, ..., 10}
$L_P$	Paket boyutu	bits	1024	$M$	Yeterince büyük sayı	–	$10^7$
$N_l$	Toplam yol sayısı	–	5	$N_R$	Ağ işletimi için toplam tur sayısı	–	3600
$P_0$	Alıcıya girişte istenen güç seviyesi	J/bit	$1 \times 10^{-7}$	$E_R = P_r$	Alım sabiti	J/bit	$0.2 \times 10^{-7}$
$R_b$	Veri hızı	bps	2500	$R_{\max}(\ell)$	$\ell$ -Güç seviyesinde maksimum iletim aralığı	m	{100, ..., 1000}
$s_k$	Her turda düğüm- $k$ tarafından üretilen paket sayısı	–	1	$TL(R_{\max}(\ell))$	$R_{\max}(\ell)$ mesafesi üzerinden iletim kaybı	–	–
$T_R$	Tur süresi	s	60	$V$	Bİ dahil tüm düğümlerin kümesi	–	–
$ V $	Ağdaki tüm düğümlerin toplam sayısı	–	{20, 25, 30}	$W$	Tüm algılayıcı düğümlerin kümesi	–	–
$ W $	Ağdaki toplam algılayıcı düğümü sayısı	–	{19, 24, 29}	$x_{ij}^{\ell}$	$k$ düğümü tarafından oluşturulan ve yol- $(i, j)$ yolu üzerindeki $l$ bağlantısı üzerinden akan paketlerin sayısı ( $L_P$ bit boyutunda)	–	–
$\alpha(f)$	Emilim katsayısı	dB/km	–	$\gamma$	Girişim aralığı çarpanı	–	1.7
$\kappa$	Güvenilirlik parametresi (gerekli minimum ayrı yol sayısı)	–	1–5	$\mu$	Yol koruma parametresi (yani, gerekli her yol üzerinden iletilecek minimum veri oranı)	–	{0.05, 0.10, 0.20}
$\nu$	İletim kaybının hesaplanması için frekansa bağlı bileşen	–	–	$\rho$	Enerjiye en aç düğüm tarafından harcanan toplam enerji	J	–
$\mathcal{D}_l$	$l$ yolunun ortalama ağırlıklı kaynak-Bİ mesafesi	km	–	$\mathcal{E}_l$	$l$ yolunda bit başına harcanan ortalama ağırlıklı enerji	mJ	–
$\mathcal{F}_l$	$l$ yolundan geçen ortalama ağırlıklı paket sayısı- $l$	paket	–	$\mathcal{H}_l$	$l$ yolunda kaynaktan Bİ’ye ortalama ağırlıklı atlama sayısı	–	–

### 5.2.1 Ağ modeli

Genişlik, uzunluk ve derinliği sırasıyla  $d_x$ ,  $d_y$  ve  $d_z$  (tümü km cinsinden) olarak tanımlanan dikdörtgen prizma şeklinde bir SKAA dağıtım topolojisi olduğu varsayılmıştır. Ağ,  $|W|$  adet pille sınırlı algılayıcı düğümlerinden ve herhangi bir enerji kısıtı olmayan ve algılayıcı düğümlerinde üretilen tüm verilerin aktığı yer olan tek bir Bİ’den (yani düğüm- $l$ ) oluşmaktadır. Bir SKAA toplamda  $|V| = |W| + 1$  adet düğümden oluşmaktadır.  $W$  ve  $V$  sırasıyla algılayıcı düğüm kümesinin eleman sayısını ve tüm düğümlerin kümesinin eleman sayısını ifade eder.

Algılayıcı düğümler ağ içinde rastgele dağıtılmaktadır. Öte yandan, Baz İstasyonu su yüzeyinde bulunmakta ve ağın köşelerinden birinde olduğu varsayılmaktadır.

Bir algılayıcı düğüm, hedef düğüme olan mesafesine göre belirli bir bağlantı için kullanılacak iletim güç seviyesini on ayrı güç seviyesi içinden seçerek, ayarlayabilir (düğüm- $i$  ve düğüm- $j$  arasındaki mesafe metre cinsindedir ve  $d_{ij}$  ile gösterilir).  $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, 10\}$  tüm güç seviyelerinin kümesi olarak tanımlanır.  $R_{\max}(\ell)$ , güç seviyesi- $\ell$  ( $\ell \in \mathcal{L}$ ) kullanıldığında maksimum iletim aralığıdır (metre cinsinden).

Ağ,  $G = (V, A)$  şeklinde bir grafik olarak modellenmiştir, burada  $A = \{(i, j) : i \in W, j \in V \setminus \{i\}, d_{ij} \leq R_{\max}(\ell = 10)\}$  sıralı linklerin kümesidir. Zamanın eşit süreli zaman birimleri (yani turlar) halinde düzenlendiğini ve tur süresinin SKAA'larda tipik bir değer olan  $T_R = 60$  s olduğu varsayılmaktadır. Her turda, her algılayıcı düğümü- $k$ ,  $L_P = 1024$  bit boyutunda  $s_k = 1$  paket üretir. Her algılayıcı düğüm tarafından oluşturulan veriler, doğrudan veya çok sekmeli yönlendirme ile Bİ'ye iletilir. Her algılayıcı düğüm, en azından ayrık olan (yani, bir algılayıcı düğümün farklı yolları ortak bağlantıları paylaşmayan)  $\kappa$  (yani güvenilirlik parametresi) değeri kadar farklı yoldan Bİ'ye ulaştığını garanti etmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada incelenen SKAA'lar, her bir algılayıcı düğümünün Bİ'ye  $\kappa$  kadar ayrık yola sahip olması anlamında  $k$ -bağlıdır (yani,  $k = \kappa$ ).

Dinamik kaynak yönlendirmesi (İng. Dynamic Source Routing) [138] durumunda olduğu gibi, her algılayıcı düğüm, ürettiği verinin en azından belirli bir kısmını ( $\mu$ , yol bakım parametresi kadarını) periyodik olarak farklı rotalardan göndererek farklı yolların kullanılabilirliklerini garanti eder. Örneğin,  $\mu = 0.1$  ise, her bir algılayıcı düğüm, her 10 turda ayrık yolların her biri üzerinden en az bir veri paketi gönderir. Bakım parametresinin değeri,  $\mu$ , ortama bağlıdır (yani, yolları korumak için daha zorlu ortamlarda daha yüksek bir  $\mu$  gereklidir).

### 5.2.2 Enerji modeli

Bu çalışma boyunca [139]'da ayrıntılı olarak açıklanan sualtı enerji tüketim modeli kullanılmıştır. Ayrık güç seviyesi- $\ell$  kullanıldığında, bir düğüm en fazla  $R_{\max}(\ell)$  metre uzaklıkta bulunan diğer düğümlerle doğrudan iletişim kurabilir. Bu durumda,  $R_{\max}(\ell)$

mesafesi boyunca su altı yol kaybı (zayıflama) şu şekilde ifade edilir;

$$TL(R_{\max}(\ell)) = R_{\max}(\ell)^{k_s} \times \nu^{10^{-3}R_{\max}(\ell)}, \quad (5.1)$$

burada  $k_s = 1.5$  pratik durumlar için yayılma faktörü,  $\nu = 10^{\alpha(f)/10}$  frekans-bağımlı bileşen,  $\alpha(f)$  absorpsiyon katsayısı (dB/km cinsinden) ve  $f = 25$  kHz çalışma frekansının merkezini ifade etmektedir.  $\alpha(f)$ , Thorp'un formülü kullanılarak şu şekilde hesaplanır;

$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \cdot 10^{-4}f^2 + 0.003. \quad (5.2)$$

Ayrık güç seviyesi- $\ell$  kullanılarak, tek bir bit iletim maliyeti

$$E_T(\ell) = TL(R_{\max}(\ell)) \times P_0, \quad (5.3)$$

ile hesaplanırken, burada  $P_0 = 1 \times 10^{-7}$  alıcıya girişte istenen güç seviyesidir (J/bit) [139].

Ayrıca, tek bir bitin alım enerjisi maliyeti sabittir ve şu şekilde tanımlanır;

$$E_R = P_r, \quad (5.4)$$

burada  $P_r = 0.2 \times 10^{-7}$  alım sabitidir (J/bit) [139]. Çizelge 5.2'de, iletim enerji maliyetlerini her bir güç seviyesi- $\ell$  için (yani,  $E_T(\ell)$  mJ/bit cinsinden) ve iletim aralıklarını (yani,  $R_{\max}(\ell)$  metre cinsinden) gösterilmektedir.

Çizelge 5.2: Güç seviyesi- $\ell$  iken,  $f = 25$  kHz ve  $k_s = 1.5$  olduğunda iletim enerji maliyeti ( $E_T(\ell)$  – nJ/bit) ve iletişim aralığı ( $R_{\max}(\ell)$  – m).

$\ell$	$E_T(\ell)$	$R_{\max}(\ell)$	$\ell$	$E_T(\ell)$	$R_{\max}(\ell)$
1	0.115	100	6	3.416	600
2	0.375	200	7	4.954	700
3	0.792	300	8	6.967	800
4	1.404	400	9	9.568	900
5	2.258	500	10	12.897	1000

Her düğüm- $i$ , verici (yani, node- $i$ ) ve alıcı (yani, node- $j$ ) arasındaki mesafeye

göre iletim gücünü kontrol edebilir. Link- $(i, j)$  üzerinden optimum iletim enerjisi maliyeti şu şekilde hesaplanır:

$$E_{T,ij}^* = \begin{cases} E_T(\ell = 1), & \text{if } d_{ij} \leq R_{\max}(\ell = 1) \\ \infty, & \text{if } d_{ij} \geq R_{\max}(\ell = 10) \\ E_T(\ell + 1), & \text{if } R_{\max}(\ell) \leq d_{ij} \leq R_{\max}(\ell + 1) \end{cases} . \quad (5.5)$$

Örneğin, düğüm-2 ile düğüm-5 arasındaki mesafenin 520 metre olduğunu varsayalım.  $500 \text{ m} < d_{25} = 520 \text{ m} \leq 600 \text{ m}$  olduğundan, düğüm-2, düğüm-5 ile iletişim için güç seviyesi-6 kullanmalıdır, burada tek bir bit iletmek için optimum enerji maliyeti  $E_{T,25}^* = E_T(\ell = 6) = 3.416 \text{ mJ}$  olarak hesaplanmaktadır.

### 5.2.3 Minimum enerji tüketimi için KTDP modeli

Karışık tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) modeli, enerji tüketimini en aza indirmek için optimal çok yollu yolları ve her bir yolda aktarılan veri paketi sayısını belirlemeyi amaçlar. Daha spesifik olarak, maksimum enerji tüketen düğümün (yani, en yüksek enerji tüketen düğüm - EYETD) enerji tüketimi en aza indirmeyi hedefler.

EYETD tarafından harcanan toplam enerjiyi (*i.e.*,  $\rho$ ) en küçüklenmeyi hedef alan amaç fonksiyonu (5.6) içinde sunulmaktadır. Modelimiz, toplamda 3600 tur (yani 60 saat) olacak şekilde devam etmekte (yani,  $N_R = 3600$  tur) ve her bir algılayıcı düğüm her turda tek bir veri paketi üretmektedir.

EYETD'nin enerji tüketimini en aza indirmenin, Ağ Yaşam Süresini yani (AYS)'yi en üst düzeye çıkarmaya eşdeğer olduğu unutulmamalıdır [140, 141]. Bu nedenle, eniyileme modelimizin çözümünü kullanarak ağ operasyonunun başlangıcında aynı pil enerjisine sahip algılayıcı düğümlerine sahip bir SKAA için AYS'yi belirlemek kolaydır (yani, AYS, pil enerjisinin EYETD tarafından harcanan enerjiye oranınının 3600 katına eşittir). Bununla birlikte,  $\rho$  ve AYS ters orantılıdır, bu nedenle, ağ yaşam süresini enbüyüklemek için, eniyileme çerçevemizin amacı olan  $\rho$ 'un en küçüklenmesi gerekir.

KTDP modelinin kısıtlamaları (5.7)–(5.23) içinde verilmiştir. KTDP çerçevesinin karar değişkenleri aşağıdaki gibidir:

- $x_{ij}^{kl}$ :  $k$ -düğümü tarafından oluşturulan ve  $l$ -yolundaki  $(i, j)$ -bağlantısı üzerinden akan paketlerin ( $L_P$  bit boyutunda) sayısını modelleyen tamsayı değişkeni.
- $b_k^l$ :  $l$ -yolu üzerindeki  $k$ -kaynak düğümü tarafından ağa enjekte edilen toplam paket sayısı olarak tanımlanan tamsayı değişkeni.
- $a_{ij}^{kl}$ :  $l$ -yolu üzerinde  $k$ -düğümü tarafından oluşturulan verinin  $(i, j)$ -bağlantısı üzerinden akıp akmadığını gösteren ikili değişken.

$$\text{Minimize } \rho \quad (5.6)$$

Amaç:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{kl} - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^{kl} = \begin{cases} b_k^l & \text{if } i = k \\ -b_k^l & \text{if } i = 1 \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases}, \quad \forall i \in V, k \in W, l = \{1, \dots, N_l\} \quad (5.7)$$

Kısıt (5.7) her bir kaynak düğümdeki ( $i = k$ ), Baz İstasyonundaki (Bİ) ( $i = 1$ ) ve her bir geçiş düğümündeki ( $i \neq k$ ) akışları korur. Bu kısıtlamada,  $b_k^l$ , tüm ağ işlemi boyunca  $l$  yoluna kaynak düğüm- $k$  tarafından ağa enjekte edilmiş olan toplam paket sayısını gösterir. Kaynak düğüm ( $i = k$ ) için bakıldığında o düğümden çıkan verinin, giren veriden  $b_k^l$  kadar fazla olması gerektiği görülmektedir. Bu da kaynak düğümün  $b_k^l$  kadar veri ürettiği anlamına gelmektedir. Bİ ( $i = 1$ ) için ise Bİ'ye gelen paketlerin, çıkan paketlerden  $b_k^l$  kadar eksik olmasının sağlanmasının gerektiği görülmektedir. Bu da Bİ'nin paket üretmeyen ve aksine paketlerin sonlandığı (İng. sink node) olmasının garanti edilmesi anlamına gelmektedir. Eğer bir düğüm kaynak düğüm veya Bİ değilse, mutlaka geçiş düğümü (İng. relay node) olmak zorundadır. Geçiş düğümlerinin de kendisine gelen trafiği aynen göndermesi beklendiğinden dolayı ağa herhangi bir paket enjekte etmemesi sağlanmaktadır.

$$\sum_{l=1}^{N_l} b_k^l = s_k \times N_R, \quad \forall k \in W \quad (5.8)$$

Kısıt (5.8) ile her kaynak düğümü- $k$ 'ın toplam  $s_k \times N_R$  kadar paket ürettiği garanti

altına alınır.  $k$  kaynak düğümü tarafından üretilen toplam paket sayısının, en fazla  $N_l$  yolu (çok yollu yönlendirme) kullanılarak  $B_l$ 'ye yönlendirilebileceği unutulmamalıdır.  $l = \{1, \dots, N_l\}$  kümesi, her bir algılayıcı düğümü için ayrı yolları belirlemek için kullanılan bir dizin kümesidir. Bir yolu oluşturan bağlantılar, eniyileme modeli tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle, ayrı yol kümesi önceden tanımlanamaz, ancak eniyileme modeli çözülerek belirlenebilir.

$$\sum_{j \in W} x_{jk}^{kl} = 0, \quad \forall k \in W, l = \{1, \dots, N_l\} \quad (5.9)$$

Kısıt (5.9),  $k$  kaynak düğümünde üretilen ve ağın geri kalanına yönlendirilen paketlerin,  $k$  kaynak düğümüne geri dönmemesini garanti eder. Döngü engelleme kısıtı olarak da adlandırılabilir.

$$x_{ij}^{kl} \leq s_k \times N_R \times a_{ij}^{kl}, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W, \quad (5.10)$$

$$l = \{1, \dots, N_l\}$$

$$a_{ij}^{kl} \leq x_{ij}^{kl}, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W, l = \{1, \dots, N_l\} \quad (5.11)$$

Kısıt (5.10) ve kısıt (5.11) birlikte  $a_{ij}^{kl}$  gösterge ikili değişkeninin değerinin 0 ya da 1 olmasını belirler. Kaynak düğümü- $k$  tarafından yol- $l$  yolunda oluşturulan verileri taşımak için link- $(i, j)$  kullanılıyorsa bu ikili değişken 1 olmakta, aksi takdirde ise 0 olmaktadır (yani, eğer  $x_{ij}^{kl} > 0$  ise  $a_{ij}^{kl} = 1$  ve eğer  $x_{ij}^{kl} = 0$  ise  $a_{ij}^{kl} = 0$ ). Data detaylıca anlatmak gerekirse, Kısıt (5.10) için incelendiğinde  $s_k \times N_R = 3600$  ve  $a_{ij}^{kl}$  ikili bir değişken olduğu için,  $x_{ij}^{kl} > 0$  olduğu durumlarda  $a_{ij}^{kl}$ 'yi 1 olmaya zorlar. Ancak  $x_{ij}^{kl} = 0$  olması durumunda  $a_{ij}^{kl}$ 'nin 0 ya da 1 olması için herhangi bir kısıt bulunmamaktadır. Ki burada kısıt (5.11) devreye girmekte ve eğer  $x_{ij}^{kl} = 0$  olursa,  $a_{ij}^{kl}$ 'nin de 0 olması garanti altına alınmaktadır.

$$\sum_{(i,j) \in A} a_{ij}^{kl} \leq 1, \quad \forall i \in W, k \in W, l = \{1, \dots, N_l\} \quad (5.12)$$

$$\sum_{l=1}^{N_l} a_{ij}^{kl} \leq 1, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W \quad (5.13)$$



Kısıt (5.12), her yoldaki akışın çatallanmamasını, böylece Bİ veya başka bir geçiş düğümü olabilen yalnızca tek bir sonraki atlama düğümü olması gerektiğini garanti eder. Bu kısıtlama, verileri iletmek için kaynak düğümlerden Bİ'ye dallanmayan bir yol oluşmasını sağlar. Kısıt (5.13), kaynak- $k$  düğümünden çıkan, yol- $(i, j)$  üzerinde akan tüm paketlerin yalnızca eşsiz bir kaynak- $k$  düğümünün  $N_l$  yoluna ait olmasını zorunda kılar. Özet olarak kısıt (5.12) kaynağından Bİ'ye giden her yolun yolu oluşturan herhangi bir düğümde çatallanmamasını zorunlu kılarken, kısıt (5.13) her kaynak düğümünden kaynaklanan tüm yolların ayrı olmasını garanti eder.

$$\sum_{(j,1) \in A} x_{j1}^{k(l+1)} \leq \sum_{(j,1) \in A} x_{j1}^{kl}, \quad \forall k \in W, l = \{1, \dots, N_l - 1\} \quad (5.14)$$

Kısıt (5.14), yol- $l$  üzerinde taşınan kaynak düğüm- $k$  tarafından üretilen paket sayısının, kendi  $(l + 1)$ . yolu üzerinde iletilen paket sayısından büyük veya ona eşit olmasını zorlar (yani, paket sayısı,  $l$ 'ye bağlı olarak artmayan bir fonksiyondur). Bu kısıtlamanın eniyileme amacı için gerekli olmadığını, ancak analizde yardımcı olduğunu unutulmamalıdır (Bölüm 5.3).

$$\sum_{(k,j) \in A} \sum_{l=1}^{N_l} a_{kj}^{kl} \geq \kappa, \quad \forall k \in W \quad (5.15)$$

Kısıt (5.15),  $k$ -bağlılık kriterinin eniyileme modelimizi nasıl uygulandığı göstermektedir ki bu çalışmanın en büyük katkısının bu olduğu söylenebilir. Bu kısıt sayesinde algılayıcı düğüm- $k$  tarafından üretilen verilerin Bİ'ye ulaşmak için en az  $\kappa$  kadar farklı yola sahip olması garanti altına alınmaktadır. Aslında, kısıt (5.15) ile kısıt (5.13) birlikte, her algılayıcı düğümünün Bİ'ye en azından  $\kappa$  kadar ayrık yola sahip olmasını garanti eder. Kısıt (5.15)'in  $\kappa$ 'dan fazla ayrık yola sahip olmakla ilgili engeli bulunmadığı için eniyileme modeline göre kimi zaman fazladan bağlılıklar oluşabilir. Yani 2-bağlı bir ağın analizleri yapılırken, kimi linklerin 3 ya da 4 bağlı olduğu görülebilir. Bunun ağın 2-bağlı olması önünde bir engel teşkil etmeyeceği ve enerji tüketimi manasında olumsuz bir etkisinin olmayacağı (eniyileme modeli sonuçlarına göre en iyi AYS elde edildiği için) unutulmamalıdır.

$$x_{ij}^{kl} \geq \mu \times s_k \times N_R \times a_{ij}^{kl}, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W, \quad (5.16)$$

$$l = \{1, \dots, N_l\}$$

Kısıt (5.16) ile ayrıık yollar üzerinden gönderilecek akışların en az  $\mu \times s_k \times N_R$  (yani her algılayıcı düğümde üretilen toplam paket sayısının  $\mu$  katı) olmasını sağlamak ile görevlidir. Aslında  $\mu$ , çerçevemizdeki ekstra ayrıık yolların bakım maliyetini ölçen parametredir. Bölüm 5.3'te  $\mu$  parametresini 0,05 ile 0,20 arasında değiştirmenin  $\rho$  üzerindeki etkisi araştırılmaktadır.

$$x_{ij}^{kl} - M(1 - a_{ij}^{kl}) \leq b_k^l, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W, \quad (5.17)$$

$$l = \{1, \dots, N_l\}$$

$$x_{ij}^{kl} + M(1 - a_{ij}^{kl}) \geq b_k^l, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W, \quad (5.18)$$

$$l = \{1, \dots, N_l\}$$

Kısıt (5.17) ve kısıt (5.18) olası hayalet akışları (İng. Phantom Flows) ortadan kaldırmak için eniyileme çerçevesine dahil edilmiştir [142]. Bu geçersiz ve aslında olmayan akışlar normalde kısıt (5.7)'yi ve akış koruma kısıtlamasını (yani, Bİ'de sonlanmayan akışlar) ihlal etmezken,  $M$  parametresi de yeterince büyük bir sayıdır.

$$L_P \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{k \in W} \left( \sum_{(i,j) \in A} E_{T,ij}^* x_{ij}^{kl} + \sum_{(j,i) \in A} E_R x_{ji}^{kl} \right) \leq \rho, \quad (5.19)$$

$$\forall i \in W$$

Kısıt (5.19) EYETD'nin enerjisini ( $i$  düğümü tarafından iletim ve alım için tüketilen enerji) enküçüklemeyi hedef edinecek amaç fonksiyonuna (yani,  $\rho$ ) atamak için kullanılır. Belirli bir örnek için eniyileme problemi çözülmenden önce EYETD'nin bilinmediğini unutulmamalıdır. Aslında, EYETD ve  $\rho$ , problem eniyilenmiş şekilde çözüldüğünde belirlenmiş olur.

$$\frac{L_P}{R_b} \sum_{k \in W} \sum_{l=1}^{N_l} \left( \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{kl} + \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^{kl} + \sum_{(j,m) \in A \setminus \{i\}} x_{jm}^{kl} I_{jm}^i \right) \leq N_R \times T_R, \quad \forall i \in V \quad (5.20)$$

Kısıt (5.20), iletim, alım ve sessiz bekleme (yakındaki düğümlerin iletimlerinden dolayı) için kullanılan bant genişliğinin kullanılabilir kanal bant genişliği ( $R_b$ ) ile sınırlı olduğunu ifade eden bant genişliği kısıtlamasıdır. Bu kısıtlamada,  $I_{jm}^i$  bir ikili değişken olmakla beraber, 1 değerini alması için düğüm- $i$ 'nin, düğüm- $j$  ve düğüm- $m$ 'nin haberleşme alanı içerisinde olması (yani, düğüm- $j$ , düğüm- $m$ 'ye veri iletirken, düğüm- $i$ 'nin başka hiç bir düğümden veri almıyor olmasının  $\gamma d_{jm} \geq d_{ji}$ ) kısıtlaması ile garanti edilmesi) gerekmektedir. Bu ikili değişken diğer türlü 0 değerini alacaktır.  $I_{jm}^i$  aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$x_{ij}^{kl} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W, l = \{1, \dots, N_l\} \quad (5.21)$$

$$a_{ij}^{kl} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A, k \in W, l = \{1, \dots, N_l\} \quad (5.22)$$

$$b_k^l \geq 0, \quad \forall k \in W, l = \{1, \dots, N_l\} \quad (5.23)$$

Kısıtlamalar (5.21)–(5.23) karar değişkenlerinin sınırlarını tanımlar.

$$I_{jm}^i = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \gamma d_{jm} \geq d_{ji} \quad \forall j \in W, \forall m \in V \setminus \{j\} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}, \quad (5.24)$$

burada  $\gamma = 1.7$  girişim aralığı çarpanı olarak tanımlanmaktadır [143].

### 5.3 Analizler

Bu bölümde, detayları 5.2.3 alt bölümünde verilmiş olan eniyileme modeli temel alınarak yapılmış hesaplamalar üzerinden analizlerimize ait sonuçlar verilmiştir. Bu analizlerin kapsamlı bir parametre uzayını kapsadığı unutulmamalıdır. Ana amacımızın, 5.2.3 alt bölümünde açıklandığı gibi AYS ile ters orantılı olan  $\rho$  ile ağ güvenilirliği

arasındaki dengeyi  $k$ -bağlılık (yani,  $\kappa$ ) cinsinden karakterize etmek olduğu hatırdan çıkarılmamalıdır. Analizimizde kullanılan tüm parametreler Tablo 5.1 ve Tablo 5.2 içinde sunulmuştur.

Araştırmamızı, enerji tüketimi ve güvenilirlik arasındaki dengeyi ve ödünleşmeyi karakterize etmek için kullanılan parametrelerden iki tanesini değiştirirken diğer parametrelerin sabit tutulmasıyla planlanmış, dikkatle tasarlanmış ve detayları 5.3.1, 5.3.2 ve 5.3.3 alt bölümlerinde sunulmuş üç ayrı senaryo altında gerçekleştirilmiştir. Tüm senaryolarda dağıtım topolojisinin uzunluk (yani,  $d_y$ ) dışındaki boyutlarının sabit olduğunu unutulmamalıdır (yani,  $d_x = 1$  km ve  $d_z = 0,3$  km). Ayrıca, tüm senaryolarda güvenilirlik parametresi olarak tanımlanmış olan  $\kappa$  ise 1 ile 5 arasında değişmektedir.

Her senaryo için  $\rho$  ve  $\kappa$  arasındaki ilişkinin detaylandırılması amacıyla Ortalama Ağırlıklı Akış (İng. average weighted flow), Ortalama Ağırlıklı Mesafe (İng. average weighted distance), Ortalama Ağırlıklı Atlama Sayısı (İng. average weighted hop count) ve Ortalama Ağırlıklı Enerji Tüketimi (İng. average weighted energy dissipation) şeklinde 4 ayrı parametre daha tasarlanmış ve her birinin  $\kappa$ ,  $d_y$ ,  $|V|$ , ve  $\mu$  bağlamında analizleri yapılmıştır. Tasarlanan değişkenler aşağıda gösterilmiştir.

- Ortalama Ağırlıklı Akış (OAA): Her bir yol- $l$  üzerindeki ortalama ağırlıklı akış  $\mathcal{F}_l$  şeklinde gösterilmekte ve aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\mathcal{F}_l = \frac{\sum_{k \in W} b_k^l}{\sum_{k \in W} \sum_{(k,j) \in A} a_{kj}^{kl}}, \quad l = \{1, \dots, N_l\}. \quad (5.25)$$

Buradaki toplam formülünde  $(k, j) \in A$  şeklinde tanımlanmasının, yalnızca kaynak düğüm- $k$ 'dan dışarı doğru giden bağlantılar üzerinden toplamayı amaçladığı unutulmamalıdır.  $\mathcal{F}_l$ 'ı hesaplamak için, minimum  $\rho$  veren  $a_{ij}^{kl}$ ,  $x_{kj}^{kl}$  ve  $b_k^l$  karar değişkenlerinin eniyilenmiş çözümleri kullanılmaktadır. Her parametre seti için beş grup çubuğu sağlanmaktadır. Burada her çubuk, yol- $l$ 'nin ortalama ağırlıklı trafiğini göstermektedir.

Senaryo veya parametre konfigürasyonundan bağımsız olarak  $\sum_{l=1}^{N_l=5} \mathcal{F}_l = 3600$  olmasının sebebi; her algılayıcı düğüm- $k$ 'nın, Bİ'ye teslim edilecek toplam 3600 paket üretmesidir (yani,  $s_k \times N_R = 3600$ ). Ayrık oluşturulabilecek yol sayısının üst sınırı  $N_l = 5$ 'tir çünkü  $F_l$  değeri  $l > 5$  için ihmal edilebilir.

Düşük  $\kappa$  değerleri için bile (örneğin,  $\kappa = 1$ ), ilk yol dışındaki yollarda sıfır olmayan akışlar olabilir, çünkü düğümler ağ boyunca enerji tüketimini dengelemek için alternatif yolları kullanırlar. Zorunda olunmasa bile ayrı yollara paket gönderilmesi ile  $\rho$  için daha küçük sonuçlar elde edilebilir ki bu da AYS'yi enküçükleme için önem arz etmektedir. Ancak, düğümler verilerini alternatif yollara yaymak zorunda kalmadıkça, trafiğin çoğu birinci yolu kullanarak akmaktadır.

- Ortalama Ağırlıklı Mesafe (OAM): Her  $l$ -yolunun ortalama ağırlıklı mesafesi (yani, kaynak düğümler ve Bİ arasındaki km cinsinden ortalama ağırlıklı mesafe)  $\mathcal{D}_l$  şeklinde gösterilmekte ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{D}_l = \frac{\sum_{k \in W} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{kl} d_{ij}}{\sum_{k \in W} \sum_{(k,j) \in A} x_{kj}^{kl}}, \quad l = \{1, \dots, N_l\}. \quad (5.26)$$

Tüm senaryolarda genel bir trend olarak  $\mathcal{D}_1 \leq \mathcal{D}_2 \leq \dots \leq \mathcal{D}_5$  olması gerektiği dikkate değerdir.

- Ortalama Ağırlıklı Atlama Sayısı (OAS): Her  $l$ -yolu için kaynaktan Bİ'ye doğru atlanan hop sayısının ağırlıklı ortalaması  $\mathcal{H}_l$  ile tanımlanmakta ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{H}_l = \frac{\sum_{k \in W} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{kl}}{\sum_{k \in W} \sum_{(k,j) \in A} x_{kj}^{kl}}, \quad l = \{1, \dots, N_l\}. \quad (5.27)$$

Genel bir trend olarak Ortalama Ağırlıklı Mesafe (OAM)'de olduğu gibi OAS'de de  $\kappa$ 'nın artması ile artış görülecektir (yani,  $\mathcal{H}_1 \leq \mathcal{H}_2 \leq \dots \leq \mathcal{H}_5$ ). Bunun sonucu olarak yüksek  $\kappa$  değerleri için uçtan uca gecikmenin artacağı çok rahatlıkla söylenebilir.

- Ortalama Ağırlıklı Enerji Tüketimi (OAE): Her bir kaynaktan çıkarak Bİ'ye giden her bit başına ortalama ağırlıklı enerji tüketimi  $\mathcal{E}_l$  ile gösterilmekte ve aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$\mathcal{E}_l = \frac{\sum_{k \in W} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{kl} (E_{T,ij}^* + E_R)}{\sum_{k \in W} \sum_{(k,j) \in A} x_{kj}^{kl}}, \quad l = \{1, \dots, N_l\}. \quad (5.28)$$

Tüm senaryolarda  $l$  arttıkça  $\mathcal{E}_l$  artmaktadır çünkü yol uzunluğu da  $l$  ile artar

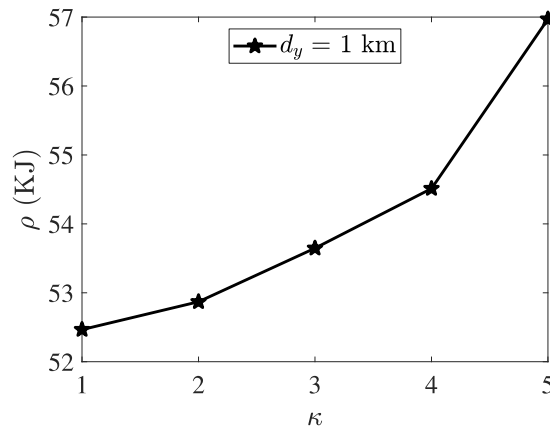
(yani, enerji tüketimini en aza indirmek için genel olarak daha kısa yolları kullanmak en iyi karardır).

Ağ altyapısı ve su altı enerji tüketim modelleri MATLAB’da oluşturulurken, Bölüm 5.2.3’te formüle edilen KTDP modeli, CPLEX çözücülü General Algebraic Modeling System (GAMS) kullanılarak eniyilenmiş sonuç elde edilmektedir [136]. Bütün analizlerdeki veri noktaları rastgele üretilmiş 50 adet senaryoya ait sonuçların ortalaması alınarak elde edilmiştir.

### 5.3.1 Senaryo-I

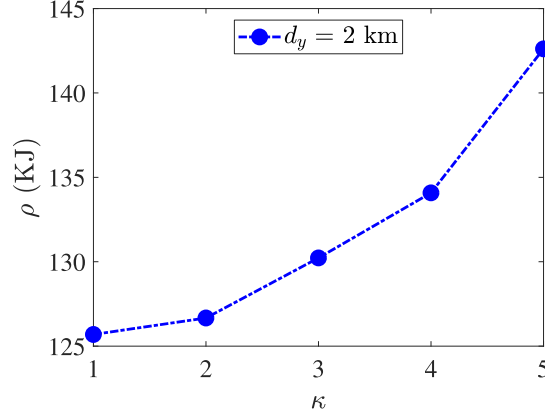
Birinci senaryoda, çalışma alanının uzunluğu olan  $d_y$  parametresi 1 km ile 3 km arasında değiştirilirken düğüm sayısı  $|V| = 20$  ve yol bakım parametresi  $\mu = 0.10$  olarak sabit tutulmuştur. Bu nedenle, bu senaryonun sonuçları, kaynak düğümlerden Bİ’ye (ortalama ve maksimum) atlama sayısını ve  $\kappa$  güvenilirlik parametresini artırmanın  $\rho$  üzerindeki etkilerini gözlemlememizi sağlamaktadır.

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere  $\kappa$  değerinin 1’den 5’e çıkarılması durumunda enerji tüketiminde %8’lik bir artış olacağı tespit edilmiştir. Burada  $d_y$  değerinin 1km ile sınırlı olmasından dolayı çok atlamalı bir yapı oluşması mümkün olmamıştır. Bu yüzden  $\rho$ ’da artışın dramatik olmadığı söylenebilir.



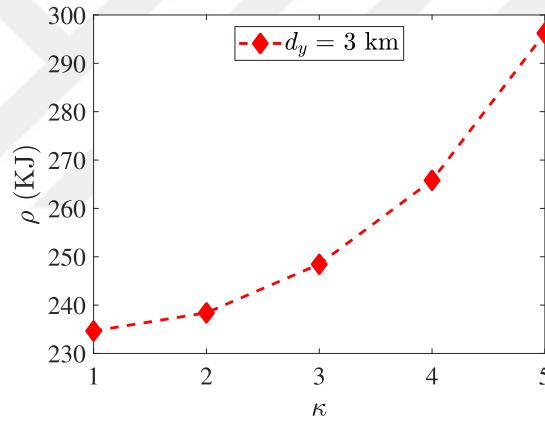
Şekil 5.1:  $d_y = 1\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

Şekil 5.2’de ise  $\kappa$  değerindeki aynı artışın enerji tüketimine etkisinin %13 olduğu söylenebilir.



Şekil 5.2:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

$d_y = 3\text{km}$  olarak tanımlanan ve sonuçları Şekil 5.3'te verilen grafiğe göre, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'nin aksine çok atlamalı düğüm sayılarının artması neticesinde  $\kappa$ 'nın artışının  $\rho$ 'ya %26 gibi yüksek bir oranda etki ettiği görülmektedir.

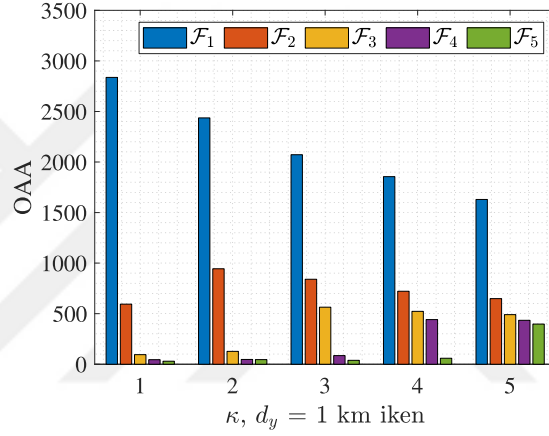


Şekil 5.3:  $d_y = 3\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

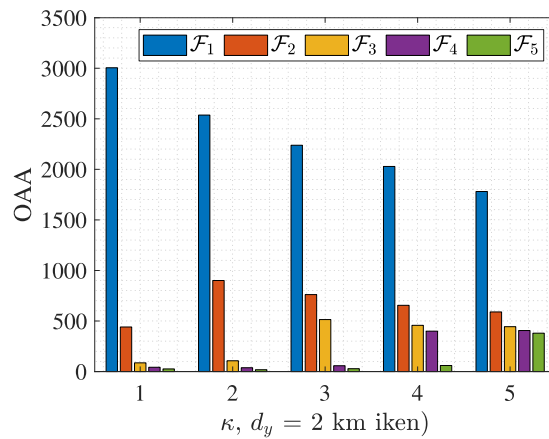
Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 arasındaki ilişkinin daha da anlamlandırılması amacıyla Şekil 5.46a sunulmuştur. Burada açıkça görülmektedir ki  $\rho$  değeri ağ boyutu büyüdükçe (yani,  $d_y$  arttığında) artar. Bunun sebebi olarak da kaynak-hedef mesafesi arttıkça iletim için gereken enerjinin artması gösterilebilir. Örneğin,  $\kappa = 2$  olduğunda,  $\rho$  değerleri  $d_y = 1, 2$  ve  $3$  km için sırasıyla 52.87, 126.67 ve 238.39 kJ olarak ölçülmüştür.

Senaryo-I için bölüm 5.3'te tanımlanmış olan Ortalama Ağırlıklı Akış (OAA), Ortalama Ağırlıklı Mesafe (OAM), Ortalama Ağırlıklı Atlama Sayısı (OAS) ve Ortalama Ağırlıklı Enerji Tüketimi (OAE) hesaplamaları yapılmıştır.

İlk olarak OAA için elde edilen sonuçlar Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6'da göstermektedir ki;  $\kappa$  değerinden bağımsız olarak ayırık yollardan ilkinin (yani  $\mathcal{F}_1$ ) en yoğun şekilde kullanıldığı görülmektedir. Özellikle  $\kappa=1$  olduğu durumlarda 2.ayırık yoldan daha fazlasına paket gönderilmediği değerlendirilebilir.  $\kappa=1$  ve  $d_y=3\text{km}$  iken ise 5.ayırık yola hiç paket gönderilmemiştir. Bunun sebebi olarak da ağın boyutlarının büyümesinden dolayı enerji verimli yolların çok fazla ayırık yola girmesine engel olması olarak gösterilebilir. 5.ayırık yola en fazla paket gönderilen durumun ise doğal olarak  $\kappa=5$  olduğu anlarda olması beklenen bir sonuçtur. Burada  $\mathcal{F}_5=360$  (yani  $3600*\mu$ ) olması dikkate değerdir. Tüm grafiklerin birbiriyle ilişkisini tek grafik halinde göstermek için Şekil 5.47a oluşturulmuştur.

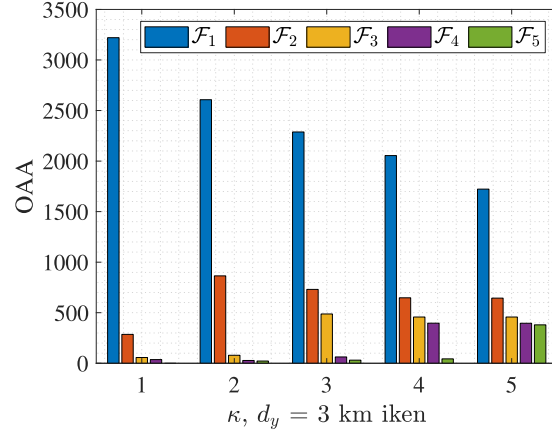


Şekil 5.4:  $d_y = 1\text{ km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAA grafiği.



Şekil 5.5:  $d_y = 2\text{ km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAA grafiği.

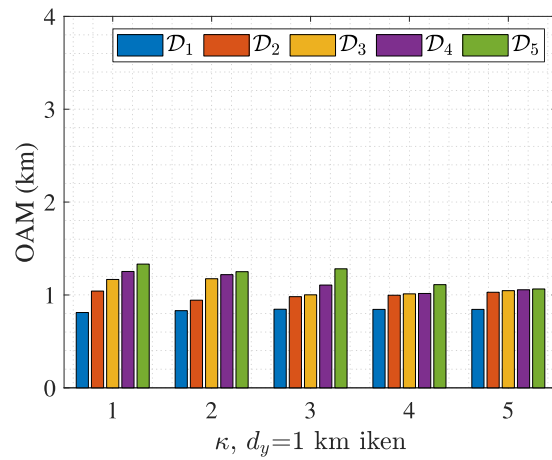




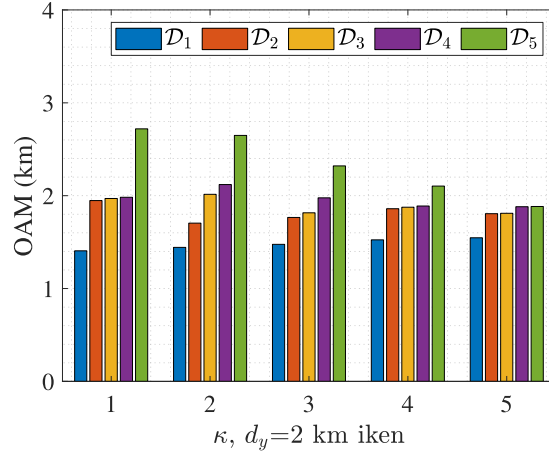
Şekil 5.6:  $d_y = 3\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAA grafiği.

Ortalama Ağırlıklı Mesafe (OAM) ölçümlerine ait sonuçlar Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9’da gösterilmektedir. 3 sonucun da birbiriyle kıyaslanabilmesi amacıyla tüm grafikte y ekseninde 0 ile 4 arasında sınırlandırılmıştır ve tek grafik olarak Şekil 5.48a’da gösterilmiştir. Şekil 5.7’de  $d_y=1\text{km}$  olduğu için ortalama ağırlıklı mesafelerin 1km civarında olması beklenen bir sonuçtur ancak Şekil 5.8 ve 5.9’da ortalama mesafeler daha uzundur. Örneğin,  $\kappa = 5$ ,  $d_y = 3\text{ km}$  ve  $l = 1, 2, 3, 4$  ve  $5$  iken  $\mathcal{D}_l=2.28, 2.51, 2.52, 2.54$  ve  $2.56$  (hepsi km) olacak şekilde ölçülmüştür.  $\mathcal{F}_l \geq \mathcal{F}_{l+1}$  olduğu için, enerji tüketimini enküçükleme için, düğümler trafiklerini daha kısa yollara göndermeye çalışmaktadırlar.

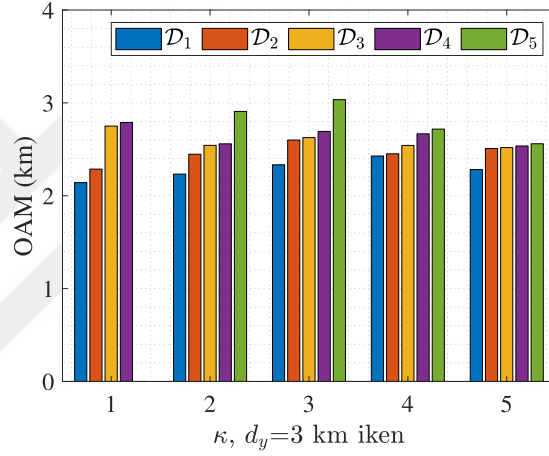
$\kappa=1$  ve  $d_y = 3\text{km}$  iken  $\mathcal{F}_l=0$  olduğu için  $\mathcal{D}_l$  değerinin de sıfıra eşit olması normal bir sonuç olarak not edilmelidir.



Şekil 5.7:  $d_y = 1\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAM grafiği.

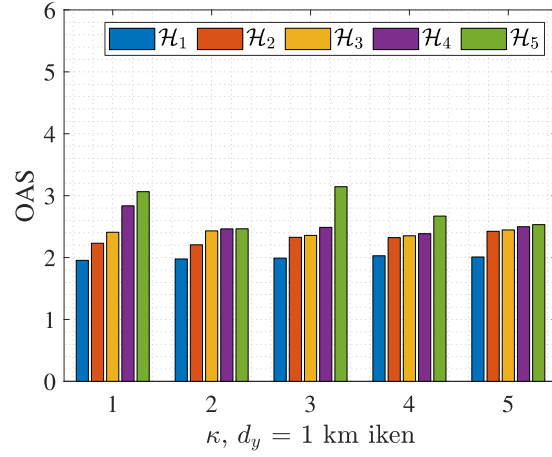


Şekil 5.8:  $d_y = 2$  km,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAM grafiği.

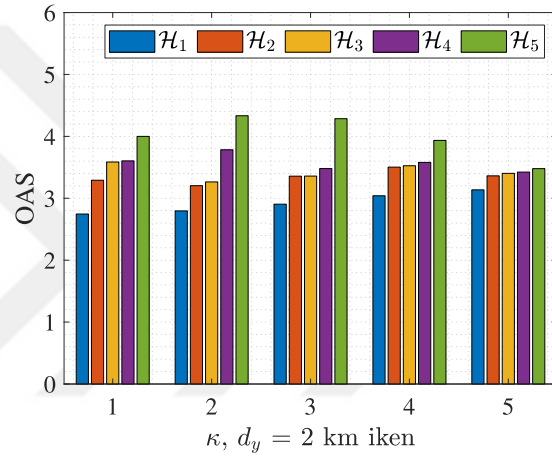


Şekil 5.9:  $d_y = 3$  km,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAM grafiği.

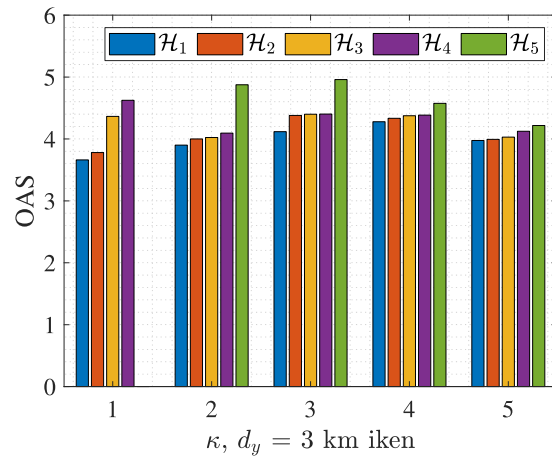
Ortalama Ağırlıklı Atlama Sayısı (OAS) analizi için oluşturulan grafikler Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12’de gösterilmektedir. Topoloji büyüdükçe düğümlerin baz istasyonuna erişmeleri için atlama yaptıkları düğüm sayısı artmaktadır. Özellikle Şekil 5.12’de  $\kappa=5$  iken tüm ayırık yolların OAS değerlerinin birbirine çok yakın olması dikkat çekici bir sonuçtur. Bu 3 grafiğin kıyaslanması için Şekil 5.49a’ya bakılabilir.



Şekil 5.10:  $d_y = 1\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAS grafiği.



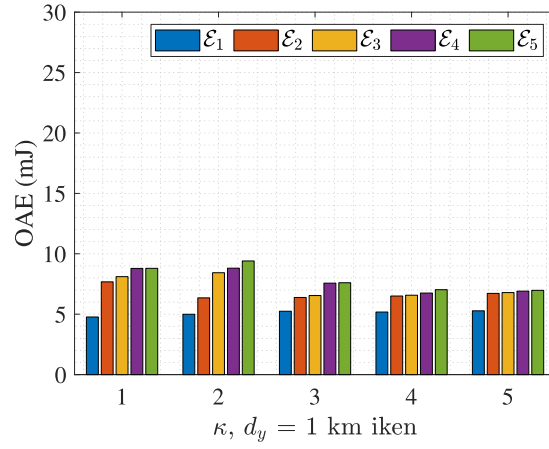
Şekil 5.11:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAS grafiği.



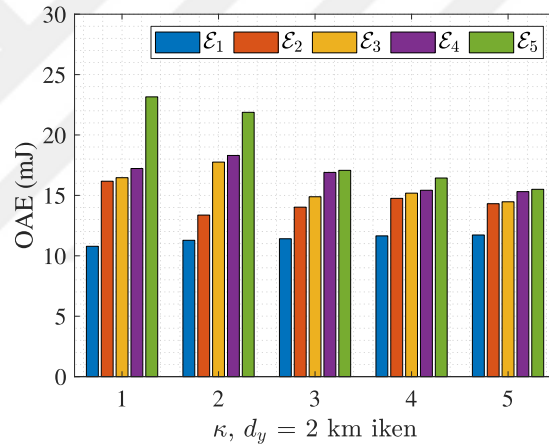
Şekil 5.12:  $d_y = 3\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAS grafiği.

Senaryo-I'e ait son analiz olan Ortalama Ağırlıklı Enerji Tüketimi (OAE) sonuçları Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15'te, üçüne ait kıyas grafiği ise Şekil 5.50a'da gösterilmektedir.

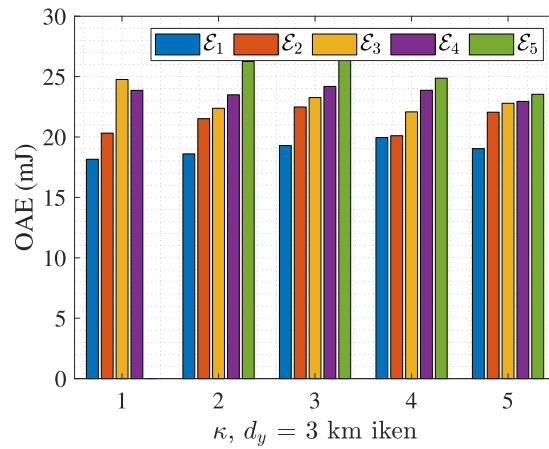
Topolojinin büyümesiyle enerji tüketiminin artması paketlerin daha uzak mesafelere gönderilmesi için daha fazla enerji gerektiği için doğru orantılıdır.



Şekil 5.13:  $d_y = 1\text{ km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAE grafiği.



Şekil 5.14:  $d_y = 2\text{ km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAE grafiği.

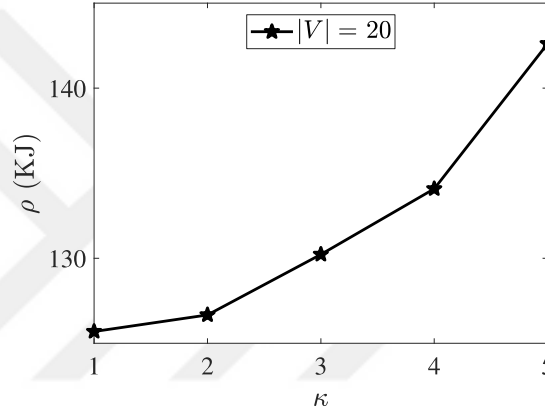


Şekil 5.15:  $d_y = 3\text{ km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAE grafiği.

### 5.3.2 Senaryo-II

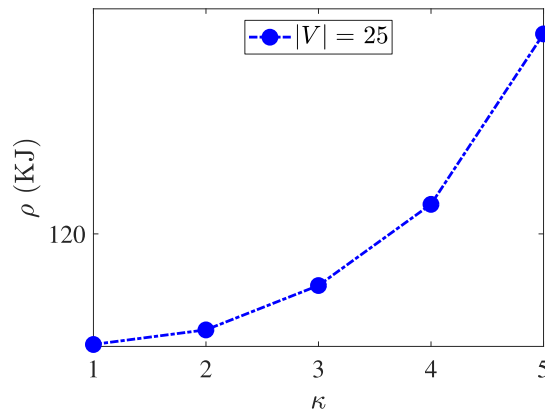
İkinci senaryo, dağıtım topolojisine ait boyutların ve  $\mu$  parametresinin sabit tutulduğu (yani,  $d_y = 2$  km and  $\mu = 0.10$ ) ve düğüm sayısının ( $|V|$ ) 20 ile 30 arasında değiştiği durumda düğüm yoğunluğunun artmasının ve  $\kappa$  değerinin değişiminin  $\rho$ 'ya etkisini gözlemleyebilmek için tasarlanmıştır.

Şekil 5.16'da görüldüğü üzere  $\kappa$  değerinin 1'den 5'e çıkarılması durumunda enerji tüketiminde %14'lük bir artış olacağı görülmektedir. Burada  $|V|$  değerinin 20 olmasından dolayı yoğun bir topoloji elde edilemediği için  $\rho$ 'ya etkisinin fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 5.16:  $|V| = 20$ ,  $d_y = 2$ km ve  $\mu = 0.10$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

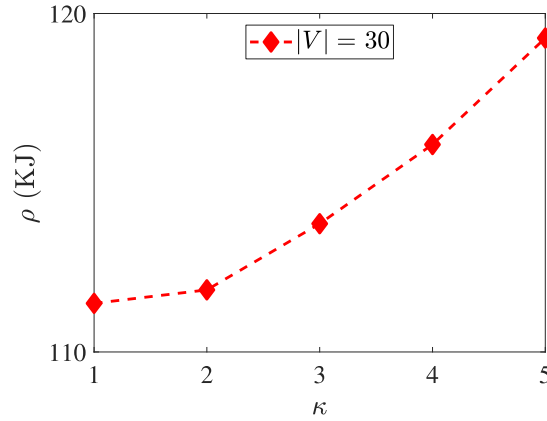
Şekil 5.17'de ise  $\kappa$  değerindeki aynı artışın enerji tüketimine etkisinin %10 olduğu söylenebilir.



Şekil 5.17:  $|V| = 25$ ,  $d_y = 2$ km ve  $\mu = 0.10$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

$|V|=30$  olarak tanımlanan ve sonuçları Şekil 5.18'de verilen grafiğe göre, Şekil 5.16

ve Şekil 5.17'nin aksine daha yoğun bir topolojiye sahip olmanın neticesinde  $\kappa$ 'nın artışının  $\rho$ 'ya %7 gibi düşük bir oranda etki ettiği görülmektedir.



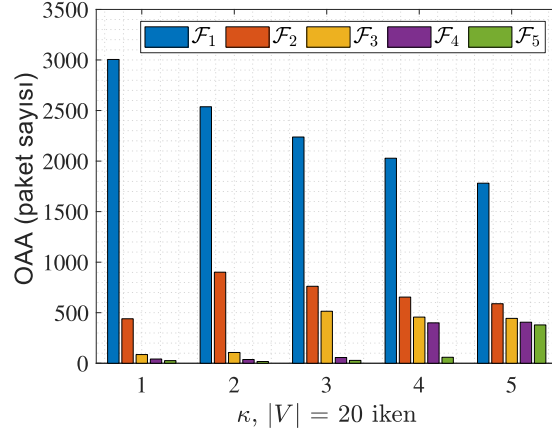
Şekil 5.18:  $|V| = 30$ ,  $d_y = 2\text{km}$  ve  $\mu = 0.10$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 arasındaki ilişkinin daha da anlamlandırılması amacıyla Şekil 5.46b sunulmuştur. Sonuçlar göstermektedir ki, ağ boyutları sabit tutulurken düğüm sayısının ifade eden  $|V|$ 'nin azalmasıyla,  $\rho$ 'nun artışa geçtiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak da  $|V|$ 'nin azalmasının düğümler arası ortalama mesafenin artmasına sebep olması gösterilebilir. Bu da her atlama noktası için daha fazla enerji tüketimiyle sonuçlanmaktadır. Örneğin,  $\kappa = 5$  olarak sabitken ve düğüm sayısı  $|V|$  30'dan 20'ye düşerken,  $\rho$ 'nun 119.28kJ'den 142.61kJ'e yükseldiği görülmektedir.

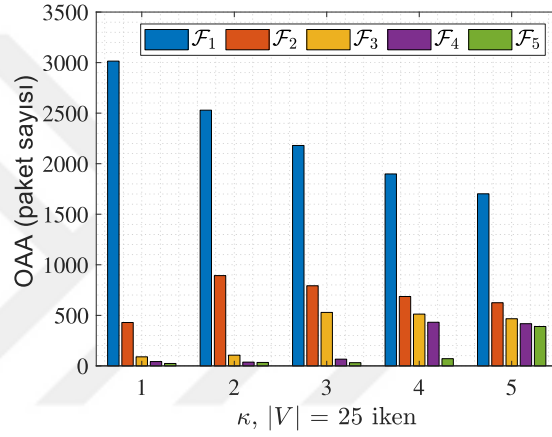
Senaryo-II için de OAA, OAM, OAS ve OAE hesaplamaları yapılmıştır.

Senaryo-II'ye ait OAA sonuçları Şekil 5.19, 5.20 ve 5.21'de gösterilmektedir. Aynı Senaryo-I'de olduğu gibi akışların yoğunluğunun ilk yolda olduğu, ayrı yollara mümkün olduğunca az paket gönderildiği ve eniyileme modelinin çalıştığı burada da teyit edilmektedir.

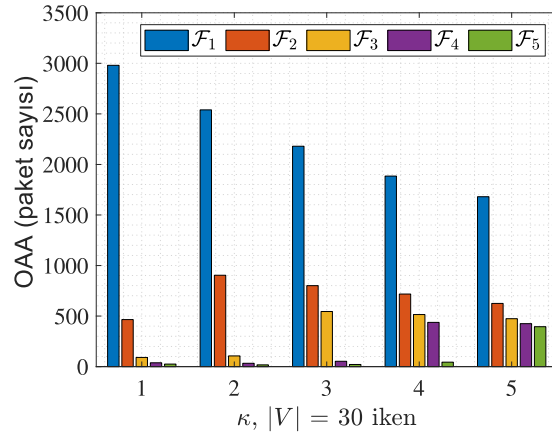
Örneğin, bu senaryoya ait sonuçların topluca gösterildiği Şekil 5.47b'de de görüleceği üzere;  $\kappa = 1$  ve  $|V| = 25$  iken,  $\mathcal{F}_1 = 3014.80$  paket (toplam akışın %83.74'ü),  $\mathcal{F}_2 = 429.43$ ,  $\mathcal{F}_3 = 89.61$ ,  $\mathcal{F}_4 = 42.60$  ve  $\mathcal{F}_5 = 23.53$  (toplam akışın %0.01'inden de azı) olarak ölçülmektedir.



Şekil 5.19:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAA grafiği.



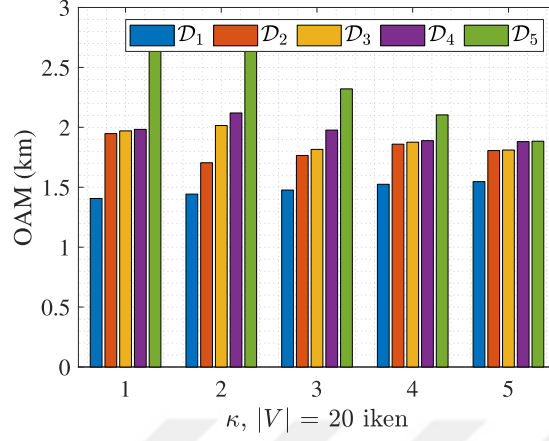
Şekil 5.20:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 25$  ve  $\mu = 0.10$  için OAA grafiği.



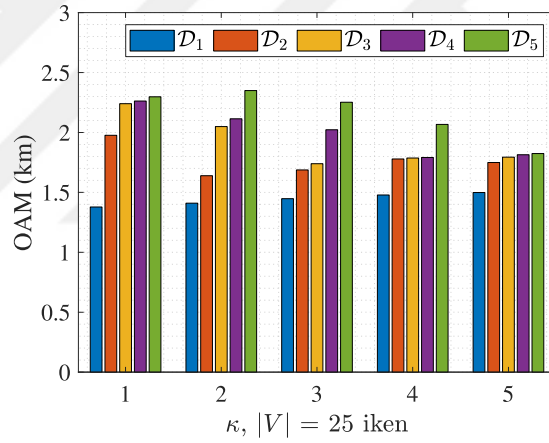
Şekil 5.21:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 30$  ve  $\mu = 0.10$  için OAA grafiği.

Her paketin Bİ'ye doğru giderken aldığı yolun ağırlıklı ortalamasının sunulduğu OAM grafikleri Şekil 5.22, 5.23 ve 5.24'te sunulmuştur. Senaryo-II'de topoloji sabitken düğüm sayısının artırılmasının sonuçları irdelendiği için burada OAM değerlerinin her

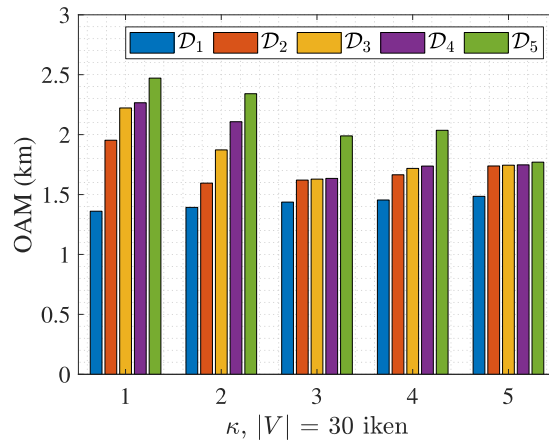
3 şekil için de birbirine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 5.48b'ye bakılabilir). Ancak yine de her yolun sonraki ayırık yoldan ortalama olarak daha kısa olduğu dikkate değerdir.



Şekil 5.22:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAM grafiği.



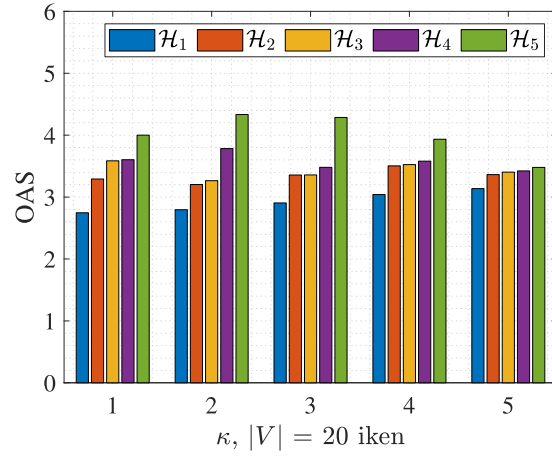
Şekil 5.23:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 25$  ve  $\mu = 0.10$  için OAM grafiği.



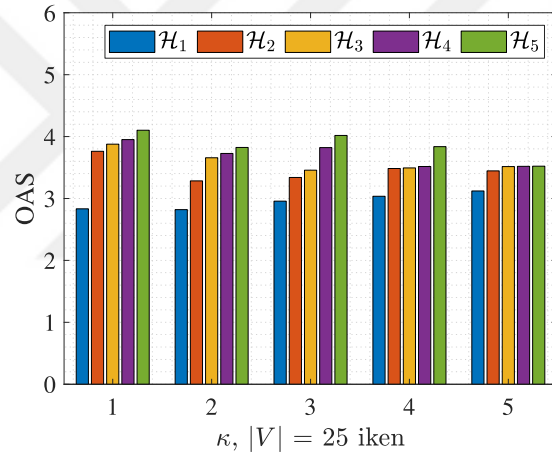
Şekil 5.24:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 30$  ve  $\mu = 0.10$  için OAM grafiği.



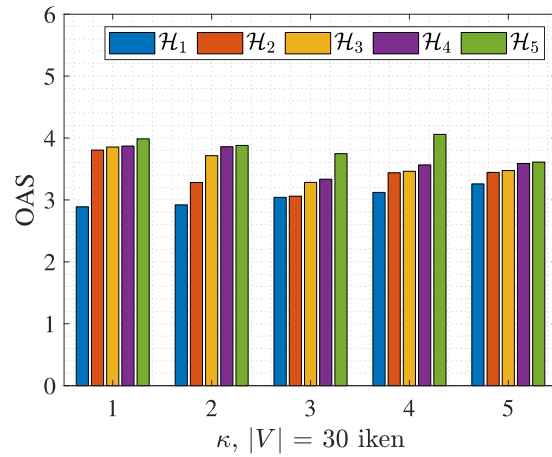
OAS grafikleri de aynı OAM gibi sabit topoloji altında 3 alt senaryo için de birbirine yakın çıkmıştır (Şekil 5.25, 5.26, 5.27 ve 5.49b).



Şekil 5.25:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAS grafiği.

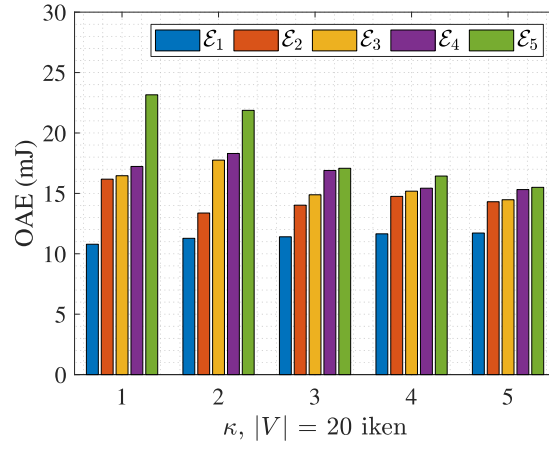


Şekil 5.26:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 25$  ve  $\mu = 0.10$  için OAS grafiği.

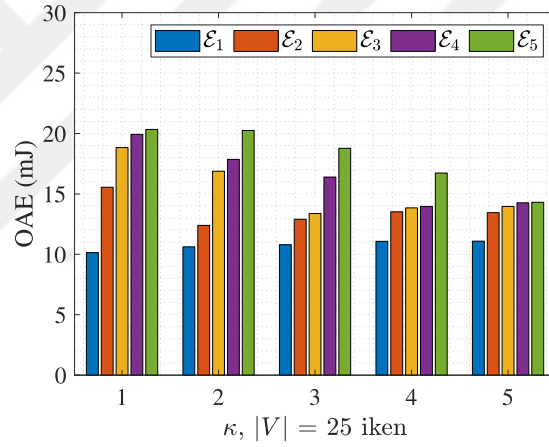


Şekil 5.27:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 30$  ve  $\mu = 0.10$  için OAS grafiği.

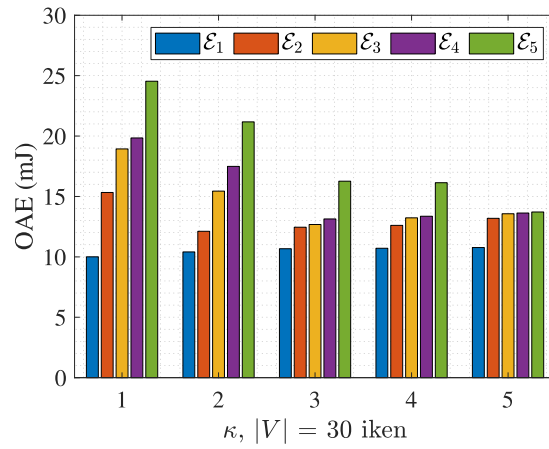
OAE değerlerinin sunulduğu Şekil 5.28, 5.29, 5.30 ve 5.50b'ye bakıldığında ilk yolun her zaman en az enerji tüketen yol olduğu net şekilde görülmektedir.



Şekil 5.28:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAE grafiği.



Şekil 5.29:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 25$  ve  $\mu = 0.10$  için OAE grafiği.

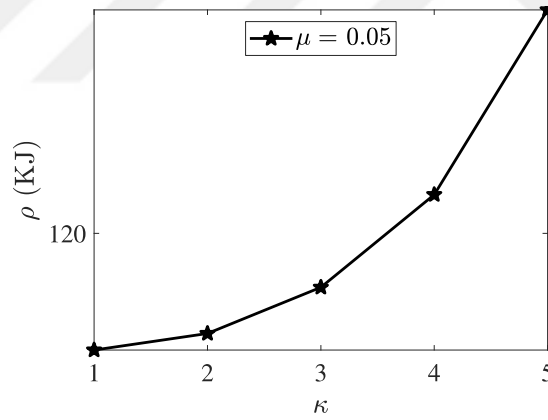


Şekil 5.30:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 30$  ve  $\mu = 0.10$  için OAE grafiği.

### 5.3.3 Senaryo-III

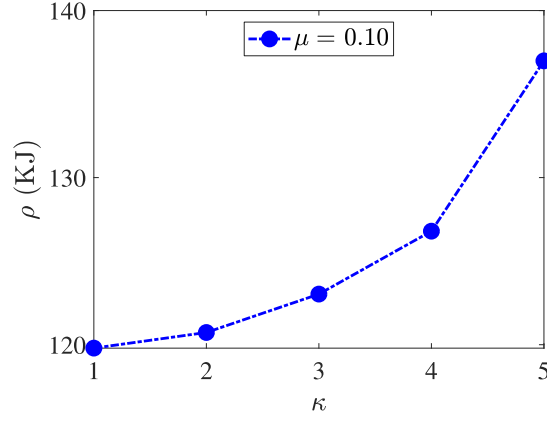
Üçüncü senaryo ise yol bakım parametresi olan  $\mu$  değerinin 0.05 ile 0.20 arasındaki değişiminin  $\kappa$  ile  $\rho$  arasındaki ilişkinin sonuçlarına etkilerine odaklanılmıştır. Unutulmamalıdır ki,  $\mu=0.05$  olarak ayarlandığında bir düğümün herhangi bir yola trafik akışı başlatacağında bunun toplam akışın %5'inden az olmayacağı garanti altına alınmaktadır. Diğer parametreler bu senaryo için  $|V| = 20$  düğüm ve  $d_y = 2$  km olarak sabit tutulmuştur.

Şekil 5.31'de görüldüğü üzere  $\kappa$  değerinin 1'den 5'e çıkarılması durumunda enerji tüketiminde %4'lük bir artış olacağı görülmektedir. Burada  $\mu$  değerinin 0.05 olmasının ayırık yollara gönderilecek paket sayısının çok az olmasından dolayı (yani  $3600*0.05 = 180$  paket) enerji tüketimine etkisinin az olduğu, bu yüzden  $\kappa$  değerindeki artışa etkisinin az olduğu görülmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki, ayırık yollara çok az trafik gönderilmesi durumunda ana yolda yaşanabilecek bir problem sonucu trafiğin büyük çoğunluğunun kaybedilmesi muhtemeldir.



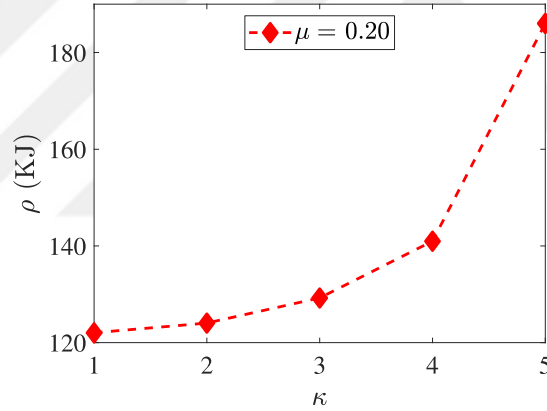
Şekil 5.31:  $\mu = 0.05$ ,  $|V| = 20$  ve  $d_y = 2$ km için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

Şekil 5.32'de ise  $\kappa$  değerindeki aynı artışın enerji tüketimine etkisinin %12 olduğu söylenebilir. Burada da ayırık yollara gönderilmesi gereken paket bir önceki duruma göre 2 kat artmasına rağmen  $\rho$ 'daki artışın 3 kat fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.32:  $\mu = 0.10$ ,  $|V| = 20$  ve  $d_y = 2\text{km}$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

$\mu=0.20$  olarak tanımlanan ve sonuçları Şekil 5.33'te verilen grafiğe göre, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'nin aksine ayrık yollara daha fazla paket gönderilmesi neticesinde  $\kappa$ 'nın 1 ile 5 arasındaki artışının  $\rho$ 'ya %35 gibi çok yüksek bir oranda etki ettiği görülmektedir.

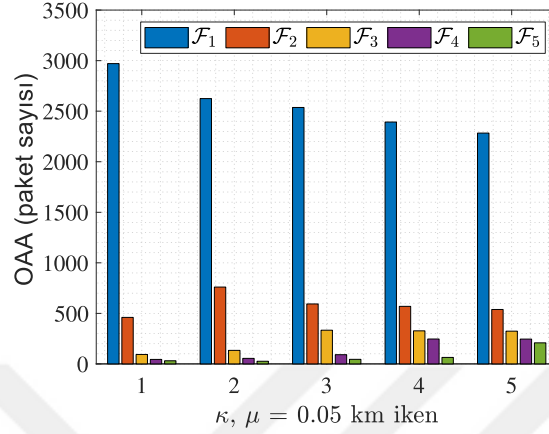


Şekil 5.33:  $\mu = 0.20$ ,  $|V| = 20$  ve  $d_y = 2\text{km}$  için  $\kappa$ - $\rho$  grafiği.

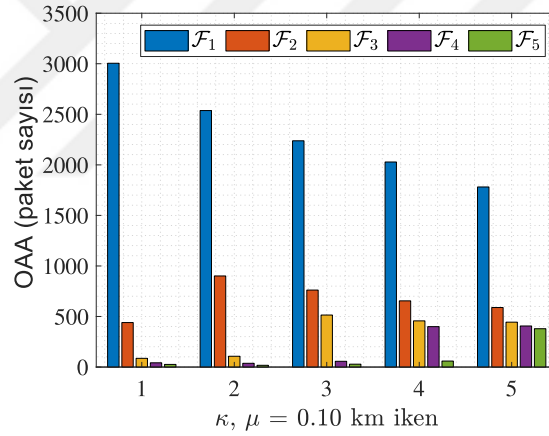
Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33 arasındaki ilişkinin daha da anlamlandırılması amacıyla Şekil 5.46c sunulmuştur. Sonuçlar göstermektedir ki,  $\rho$ ,  $\mu$  arttıkça artmaktadır Çünkü düğümlerin üretilen verilerinin daha yüksek yüzdesini daha az enerji verimli yollarda iletmeyi garanti etmesi gerekir ki bu da düğümler üzerinde ekstra enerji yükü ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte,  $\kappa$  1'den 5'e yükseldikçe  $k$ -bağlılık kriteri daha talepkar hale geldiğinden,  $\rho$  değerinde artış görülmektedir.

Senaryo-III için de diğer Senaryolarda olduğu gibi OAA, OAM, OAS ve OAE hesaplamaları yapılmıştır. Ortalama Ağırlıklı Akışın (OAA) hesaplanması sonucu elde edilen grafikler Şekil 5.34, 5.35, 5.36'da detaylıca ve 5.47c'de özet olarak sunulmuştur.

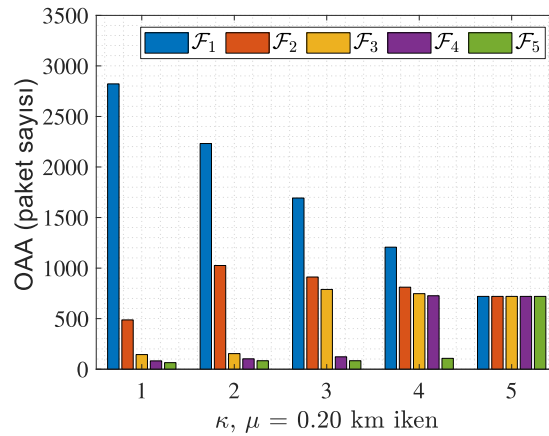
Örneğin,  $\kappa = 5$  ve  $\mu = 0.20$  iken (Şekil 5.36),  $\mathcal{F}_1 = \dots = \mathcal{F}_5 = 720$  pakete eşittir çünkü tüm düğümler paketlerinin %20'sini 5 ayrıık yola dağıtmak konusunda kısıtlara sahiptirler. Bu sebepten ötürü bu senaryo içinde  $\rho = 186.02$  kJ olarak en yüksek değere sahip olmuştur.



Şekil 5.34:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.05$  için OAA grafiği.

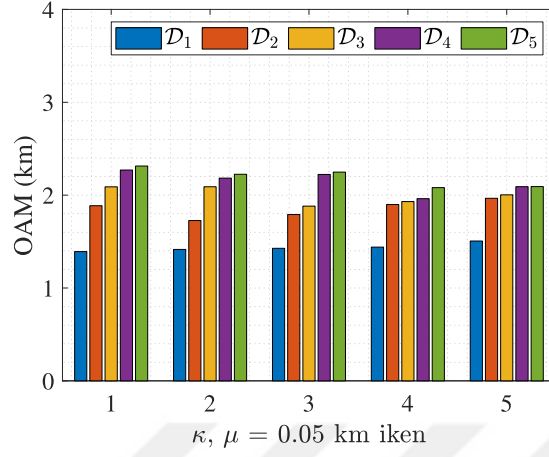


Şekil 5.35:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAA grafiği.

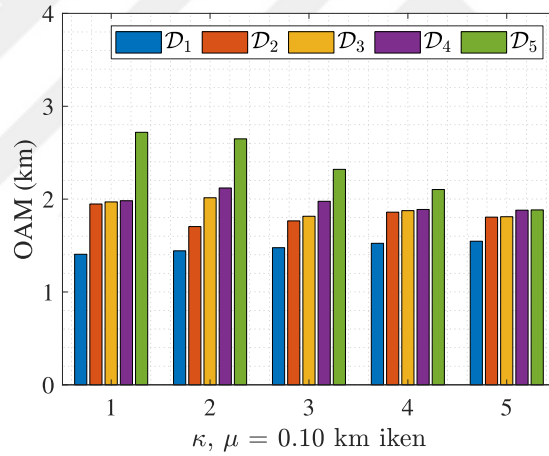


Şekil 5.36:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.20$  için OAA grafiği.

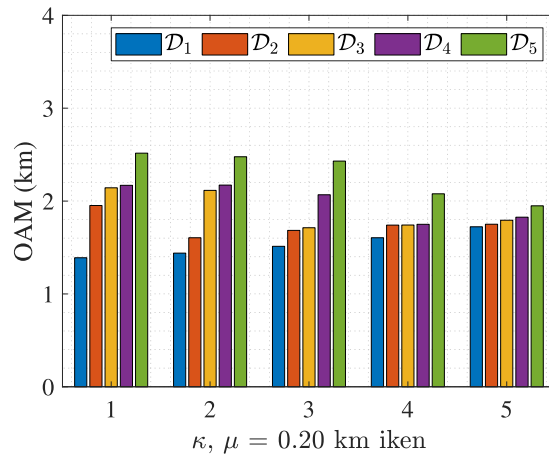
Senaryo-II'de olduğu gibi Senaryo-III'te de sabit bir topolojiye sahip olduğu için  $\mu$  değerinin değişmesi ortalama ağırlıklı mesafede (OAM) ciddi bir değişikliğe sebep olmamıştır. Sonuçlar Şekil 5.37, 5.38, 5.39 ve 5.48c'de sunulmuştur.



Şekil 5.37:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.05$  için OAM grafiği.

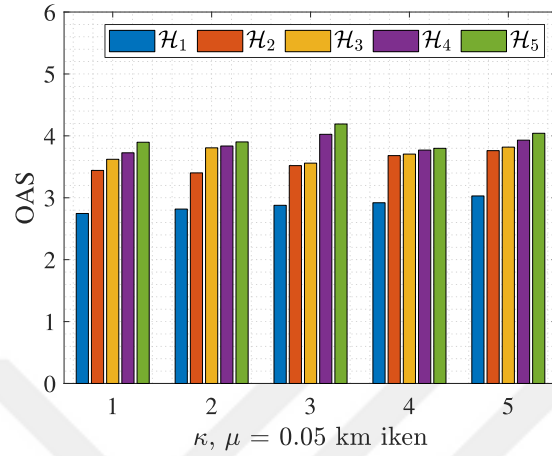


Şekil 5.38:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAM grafiği.

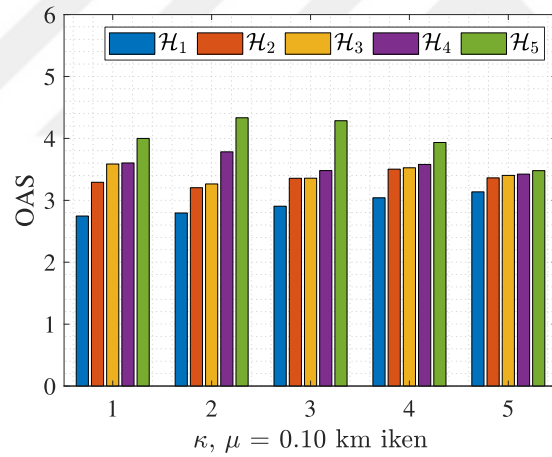


Şekil 5.39:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.20$  için OAM grafiği.

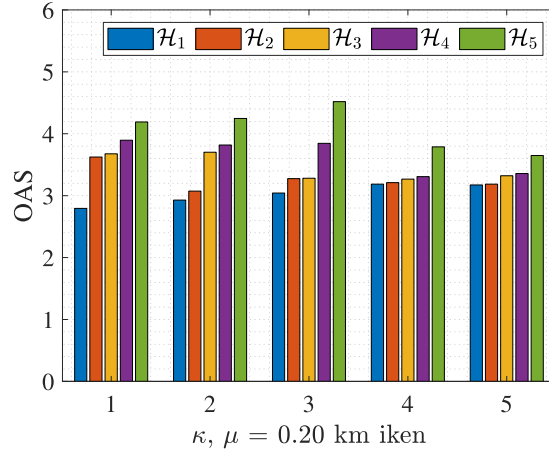
Şekil 5.40, 5.41, 5.42 ve 5.49c’de sunulan sonuçlarda görüldüğü üzere OAS için de OAM için yapılan yorumların benzerleri yapılabilir. Detay vermek gerekirse örneğin Şekil 5.42’de yani  $\kappa = 5$  ve  $\mu = 0.2$  iken  $\mathcal{H}_1 = 3.17$ ,  $\mathcal{H}_2 = 3.19$ ,  $\mathcal{H}_3 = 3.32$ ,  $\mathcal{H}_4 = 3.36$  ve  $\mathcal{H}_5 = 3.65$  olarak görülmektedir.



Şekil 5.40:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.05$  için OAS grafiği.

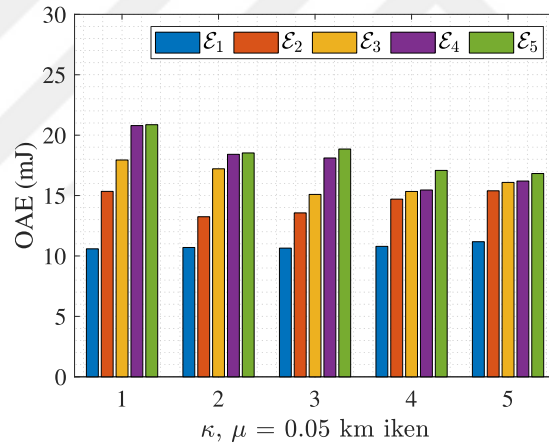


Şekil 5.41:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAS grafiği.

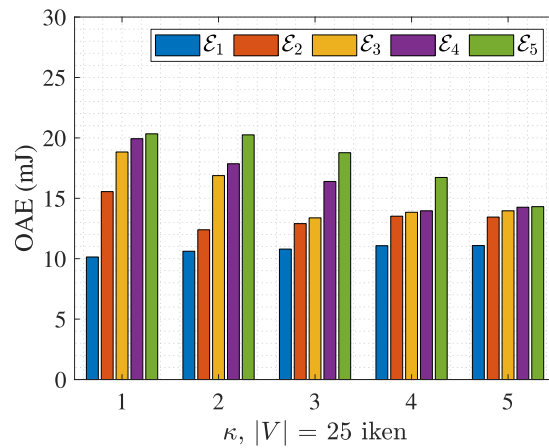


Şekil 5.42:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.20$  için OAS grafiği.

Şekil 5.43, 5.44, 5.45 ve 5.50c'de OAE için grafikler sunulmuştur. 5.44 ve 5.45 için  $\kappa=5$  olduğu durumlarda ortalama enerji tüketimlerinin her yol için birbirine yakın olduğu söylenebilir.

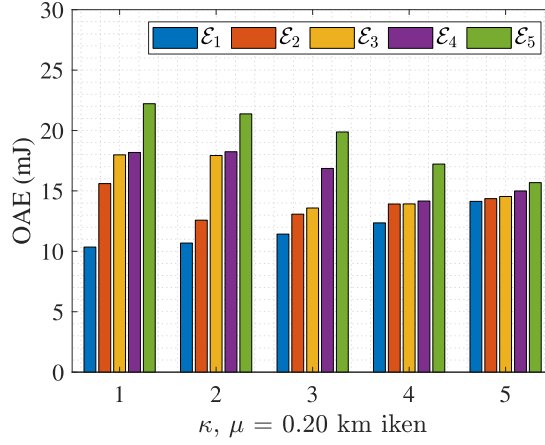


Şekil 5.43:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.05$  için OAE grafiği.



Şekil 5.44:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.10$  için OAE grafiği.





Şekil 5.45:  $d_y = 2\text{km}$ ,  $|V| = 20$  ve  $\mu = 0.20$  için OAE grafiği.

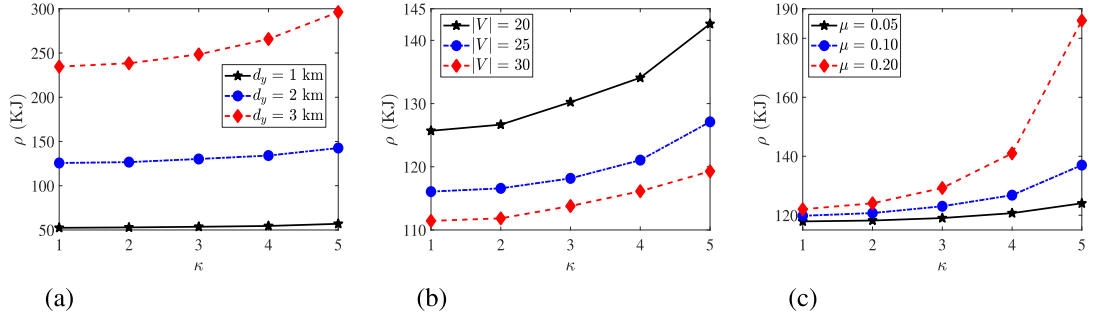
## 5.4 Sonuçlar

Sonuçların topluca anlamlandırılabilmesi için grafikler birleştirilmiş ve analizler bu şekilde tekrar yorumlanmıştır.  $\kappa$  fonksiyonları olarak EYETD'nin enerji yayılım değerleri ile  $\rho$  ilişkisi, Şekil 5.46'da sunulmuştur. Daha spesifik olarak, sırasıyla SKAA için farklı dağıtım uzunluğu,  $d_y$  (Senaryo-I), düğüm sayısı,  $|V|$  (Senaryo-II) ve bakım parametresi  $\mu$  (Senaryo-III) için farklı değerler için  $\kappa$  ve  $\rho$  arasındaki denge ve ödünleşme Şekil 5.46a, 5.46b ve 5.46c'de sunulmuştur.

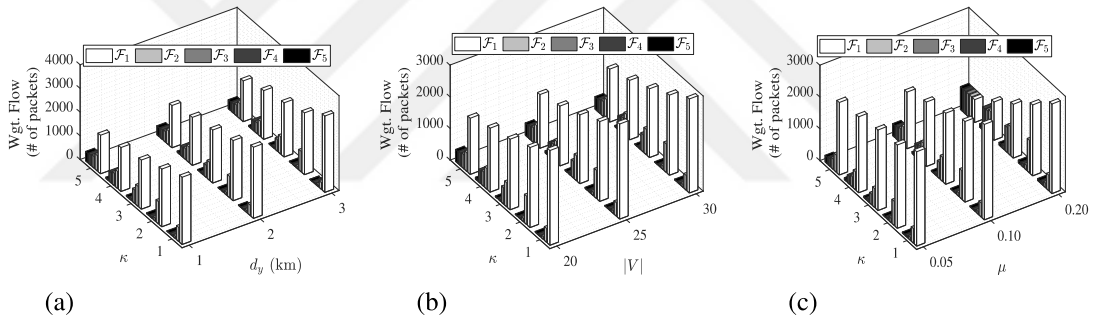
Şekil 5.46a, 5.46b ve 5.46c'den elde edilen ilk gözlem, enerji tüketiminin  $\rho$ 'nun  $\kappa$  büyüdükçe arttığıdır. Örneğin Şekil 5.46a'ya bakıldığında,  $d_y = 3$  km olduğunda,  $\kappa = 1, 2, 3, 4$ , ve  $5$  olması durumunda  $\rho$  değerinin sırasıyla 234.64, 238.39, 248.44, 265.80 ve 296.24 (hepsi kJ) olduğu görülmektedir. Bu davranışın nedeni, üretilen verileri daha fazla sayıda ayrık yola dağıtmak zorunda kalmadıkça, algılayıcı düğümlerinin, Şekil 5.47'de gösterildiği gibi veri paketlerinin çoğunu ilk yollarıyla iletme eğiliminde olmasıdır. Aslında, paketler ayrık yollara gönderilmek istendiğinde daha uzun mesafeler (hem gerçek yol mesafesi hem km cinsinden hem de atlama mesafesi olarak) katılmak zorunda kalınır ki bu da şekiller Şekil 5.48 ve Şekil 5.49'da sunulan verilerin gösterdiği gibi  $k$ -bağlantı kısıtlaması tarafından kötüleştirilmektedir. Ayrıca, ayrık yollarda paketleri taşımanın enerji maliyeti de Şekil 5.50'de gösterildiği gibi yol numarası  $l$  arttıkça daha da artar.

AYS, SKAA'lar için en önemli performans ölçütlerinden biri olduğundan, AYS ile  $\rho$

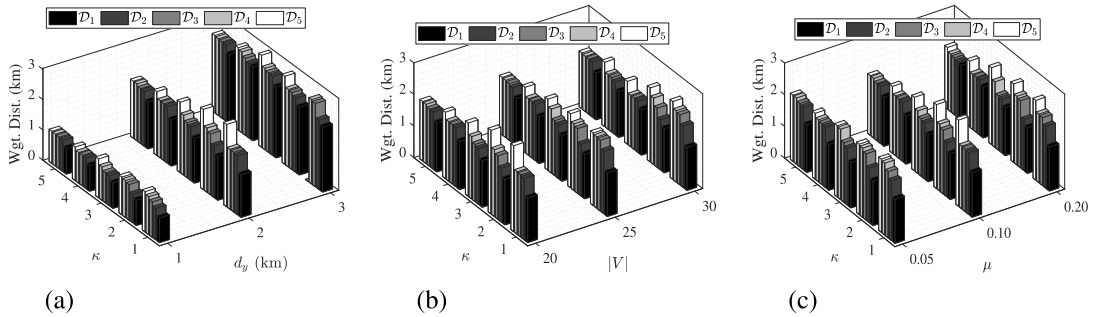
arasındaki ilişkiyi kurmak gereklidir. Bu nedenle, bir SKAA'daki  $\rho$  değerindeki artışın, AYS'deki azalma miktarı ile doğrudan ilişkili (yani ters orantılı) olduğu gerçeğini vurgulanmalıdır. Örneğin,  $\rho$  %50 artarsa, NLT yaklaşık %33 (yani,  $1 - \frac{1}{1.5} = 0.33$ ) azalır [144].



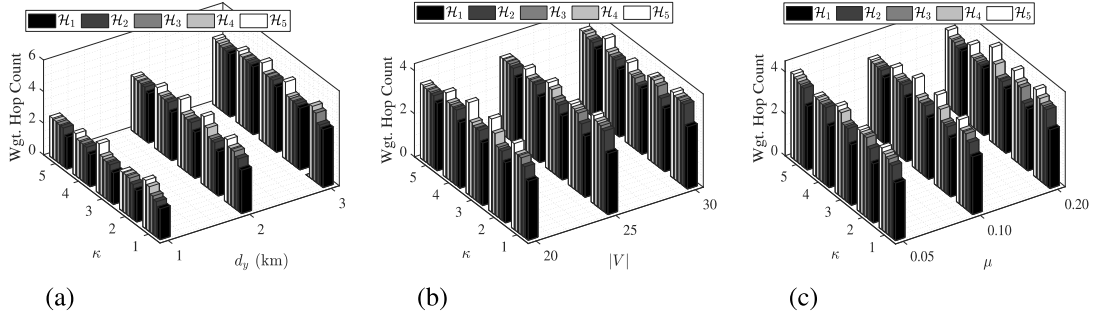
Şekil 5.46: (a) SKAA dağıtım uzunluğu ( $d_y$ ), (b) düğüm sayısı ( $|V|$ ) ve (c) bakım parametresi ( $\mu$ ) değişirken enerji tüketimi ( $\rho$ ) ve  $\kappa$  ilişkisi.



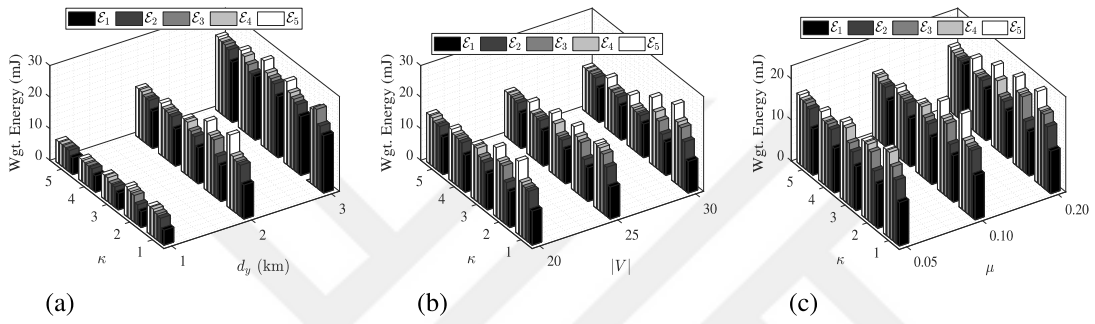
Şekil 5.47: Yol başına ortalama ağırlıklı trafik akışı (OAA) (paket sayısı) bağlamında (a)  $\kappa$  &  $d_y$ , (b)  $\kappa$  &  $|V|$ , ve (c)  $\kappa$  &  $\mu$  ilişkisi.



Şekil 5.48: Yolların ortalama ağırlıklı kaynaktan B1'ye mesafe (OAM) bağlamında (a)  $\kappa$  &  $d_y$ , (b)  $\kappa$  &  $|V|$  ve (c)  $\kappa$  &  $\mu$  ilişkisi.



Şekil 5.49: Yolların ortalama ağırlıklı uçtan uca atlama sayısı (OAS) bağlamında (a)  $\kappa$  &  $d_y$ , (b)  $\kappa$  &  $|V|$  ve (c)  $\kappa$  &  $\mu$  ilişkisi.



Şekil 5.50: Her yoldaki bit başına ortalama ağırlıklı enerji tüketimi (OAE) bağlamında (a)  $\kappa$  &  $d_y$ , (b)  $\kappa$  &  $|V|$  ve (c)  $\kappa$  &  $\mu$  ilişkisi.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında,  $k$ -bağlılık tabanlı ağ güvenilirliği ile Ağ Yaşam Süresi (AYS) enbüyüklemesi arasındaki dengenin sistematik bir analizini sunulmuştur. Yeni tasarlanmış bir eniyileme çerçevesi kullanılarak Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (KAA) ve Sualtı Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (SKAA)  $k$ -bağlılık değişkeninin Ağ Yaşam Süresi (AYS) üzerindeki etkileri geniş bir parametre uzayında incelenmiştir.

Hem en fazla enerji tüketen düğümün enerji tüketimini eniyilemek için hem de KAA'da  $k$ -bağlılık değerinin etkilerini ölçmek için Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) çerçevesi oluşturuldu. Bu tez çalışmasının sonuçları,  $k$  değerinin AYS üzerindeki etkisinin, güçlü bir şekilde KAA dağıtım ve operasyon parametrelerine bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Bu tez çalışmasına özgünlük katan en önemli katkılar, Bölüm 1.2'de sorulan ve literatürde daha önce sorulup-cevaplanmamış olan araştırma sorularına verdiği geniş ve detaylı cevaplarda yer almış ve bunlar aşağıda sıralanmıştır.

1.  $k$  bağlılığın artmasının AYS'nin azalmasına sebep olduğu birden fazla sistemde ve senaryoda yapılmış geniş bir parametre uzayında ölçülerek ispatlanmıştır.
2. KAA'larda maksimum iletim gücü seviyesi ve optimum iletim gücü seviyesi atama stratejilerinin ağ yaşam süresi (AYS) ve  $k$  değeri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu araştırma için KTDP tabanlı eniyileme çerçevesinin parametrelerini elde etmek için Mica2 mote'ların fiziksel katman özelliklerini kullanılmıştır. Sonuçlarımız göstermektedir ki, AYS'nin enbüyüklenmesi  $k$  değerinin %20 düşmesiyle sonuçlanmaktadır. Diğer taraftan,  $k$  değerinin enbüyüklenmesi, AYS'nin %35 oranında düşmesine neden olmaktadır.
3. Belirli bir parametre setine sahip bir KAA'da 5-bağlı bir KAA elde edilmesi için harcanması gereken enerji tüketimi, aynı parametre setine sahip 1-bağlı SKAA ile karşılaştırıldığında %50,00'den fazla artmış, bunun da AYS'de %33,00'den fazla azalma anlamına geldiğini göstermiştir. Öte yandan, farklı bir parametre

setine sahip başka bir KAA'da 1-bağlı bir ağ ile kurmak yerine aynı parametre setine sahip 3-bağlı bir ağ elde edilmesi için, enerji tüketiminde yalnızca %2,11'den daha az artışla (ömür ömründe %2,07'den az azalma) yapılabileceği ortaya konmuştur. Bununla birlikte, ana sonucumuz,  $k$ -bağlılık değerinin yüksek tutulma amacının AYS'de önemli bir azalmaya yol açacağıdır.

4. Hem KAA'lardaki enerji tüketim modeli hem de SKAA'da enerji tüketim modelleri arasındaki farklar var olması  $k$ -bağlılık ile AYS arasındaki ilişki bağlamında bir farka sebep olmamaktadır. Her durumda da AYS ile  $k$ -bağlılık arasında bir ödüneleşmenin olduğu gösterilmiştir.
5. Düğüm sayısı sabitken topolojinin büyümesi halinde Ortalama Ağırlıklı Mesafe (OAM) ve Ortalama Ağırlıklı Enerji Tüketimi (OAE) arttığı için enerji tüketimi  $k$ -bağlılığa karşı daha hassas hale gelmektedir. Ayrıca topoloji sabitken düğüm sayılarının artması ise OAM ve OAE bağlamında daha iyi sonuçlar elde edildiği için enerji tüketimine pozitif bir etki yapmaktadır.
6.  $k$  bağlılığın sağlanabilmesi için en optimum Yol Bakım Parametresinin ( $\mu$ ) hem ayrıklı yollara gönderilen paketlerin anlamlı olması hem de birincil yolda oluşabilecek problemler sonucunda toplam paket sayısının neredeyse tamamını kaybetmemek için 0.1 değeri olarak kullanılmasında fayda görülmektedir.
7. Ortalama Ağırlıklı Akış (OAA) sonuçları göstermektedir ki, paketlerin yüksek çoğunluğunun birincil yollardan gönderilmesinin enerji tüketimi manasında faydalı olduğu görülmüştür. Ortalama Ağırlıklı Mesafe (OAM), Ortalama Ağırlıklı Atlama Sayısı (OAS) ve Ortalama Ağırlıklı Enerji Tüketimi (OAE) değerleri ise birincil yollarda daha kısa mesafelere ve daha az atlama sayısına sahiptir ki böylece paketlerin daha az enerji tüketimiyle gönderilmesi olarak sağlamaktadır.

Sunduğumuz bu sonuçlar, KAA'ların hem kullanım ömrü hem de güvenilirlik gereksinimlerine göre tasarlanmasında kılavuz olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçların doğrudan saha testleri deneyi yoluyla doğrulanması ilginç bir açık araştırma konusu olarak karşımızda durmaktadır. Aynı zamanda kablosuz haberleşme sistemi olarak çakışmanın olmadığı TDMA ortamı tercih edilmiş

olup, bunun yerine IEEE 802.15.4 protokolü olan Taşıyıcı Sezmesi Çoklu Erişim ile Çarpışmadan Kaçınma (İng. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA) kullanılmasının da gelecek bir çalışma olabileceği değerlendirilmektedir.





## KAYNAKLAR

- [1] **Akyildiz, I. F. and Su, W. and Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E,** A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114, 2002.
- [2] **S. R. Gandham, M. Dawande, R. Prakash, and S. Venkatesan,** Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. *In Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM)*, volume 1, pages 377–381, 2003.
- [3] **G. Kortuem, F. Kawsar, D. Fitton, and V. Sundramoorthy,** Smart objects as building blocks for the internet of things. *IEEE Internet Computing*, 14(1):44–51, 2010.
- [4] **Reem E Mohamed, Ahmed I Saleh, Maher Abdelrazzak, and Ahmed S Samra,** Survey on wireless sensor network applications and energy efficient routing protocols. *Wireless Personal Communications*, 101(2):1019–1055, 2018.
- [5] **A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz,** Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*, 93(6):1130–1151, 2005.
- [6] **P. Bellavista, G. Cardone, A. Corradi, and L. Foschini,** Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios. *IEEE Sensors Journal*, 13(10):3558–3567, 2013.
- [7] **M. Zorzi, A. Gluhak, S. Lange, and A. Bassi,** From today’s intranet of things to a future internet of things: a wireless- and mobility-related view. *IEEE Wireless Communications*, 17(6):44–51, 2010.
- [8] **T. Gao, D. Greenspan, M. Welsh, R. Juang, and A. Alm,** Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network. *In Proc. Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS)*, pages 102–105, 2005.
- [9] **R. Zhang, D. Yuan, and Y. Wang,** A health monitoring system for wireless sensor networks. *In Proc. IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pages 1648–1652, 2007.
- [10] **Z. Zhang and X. Hu,** Zigbee based wireless sensor networks and their use in medical and health care domain. *In Proc. Int. Conf. Sensing Technology (ICST)*, pages 756–761, 2013.
- [11] **D. Zhong, W. Ji, Y. Liu, J. Han, and S. Li,** An improved routing algorithm of zigbee wireless sensor network for smart home system. *In Proc. Int. Conf. Automation, Robotics, and Applications (ICARA)*, pages 346–350, 2011.101



- [12] **W. Yifeng**, The design of smart home system based on wireless sensor network. *In Proc. Int. Conf. Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, pages 106–108, 2013.
- [13] **M. Li and H. Lin**, Design and implementation of smart home control systems based on wireless sensor networks and power line communications. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 62(7):4430–4442, 2015.
- [14] **G. Simon, M. Maróti, Á. Lédeczi, G. Balogh, B. Kusy, A. Nádas, G. Pap, J. Sal-lai, and K. Frampton**, Sensor network-based counter sniper system. *In Proc. Int. Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 1–12, 2004.
- [15] **J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal**, Analysis of a prediction-based mobility adaptive tracking algorithm. *In Proc. Int. Conf. Broadband Networks (Broad-Nets)*, volume 1, pages 753–760, 2005.
- [16] **M. P. Durisic, Z. Tafa, G. Dimic, and V. Milutinovic**, A survey of military applications of wireless sensor networks. *In Proc. Mediterranean Conf. Embedded Computing (MECO)*, pages 196–199, 2012.
- [17] **Y. Zhu, J. Song, and F. Dong**, Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring. *Procedia Engineering (Elsevier)*, 16:608–614, 2011.
- [18] **S. Verma, N. Chug, and D. V. Gadre**, Wireless sensor network for crop field monitoring. *In Proc. Int. Conf. Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing (ITC)*, pages 207–211, 2010.
- [19] **N. Sakthipriya**, An effective method for crop monitoring using wireless sensor network. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 20(9):1127–1132, 2014.
- [20] **Tie Qiu, Z hao Zhao, Tong Zhang, Chen Chen, and C. L. Philip Chen**, Underwater internet of things in smart ocean: System architecture and open issues. *IEEE Trans. Ind. Informat*, 16(7):4297–4298-4307, Jul. 2020.
- [21] **Junhai Luo, Yanping Chen, Man Wu, and Yang Yang**, A survey of routing protocols for underwater wireless sensor networks. *IEEE Commun. SurveysTuts*, 23(1):137–160, First quarter 2021.
- [22] **Huseyin Ugur Yildiz, Bulent Tavli, and Halim Yanikomeroğlu**, Transmission power control for link-level handshaking in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 16(2):561–576, 2015.
- [23] **Xiaohui Wei, Hao Guo, Xingwang Wang, Xiaonan Wang, and Meikang Qiu**, Reliable data collection techniques in underwater wireless sensor networks: A survey. *IEEE Commun. Surveys Tuts*, pages 1–3-5-29, 2022.
- [24] **Halil Yetgin, Kent Tsz Kan Cheung, Mohammed El-Hajjar, and Lajos Hanzo**, A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):828–854,2017.102.

- [25] **Javier Vales-Alonso, Esteban Egea-López, Alejandro Martínez-Sala, Pablo Pavon-Marino, M Victoria Bueno-Delgado, and Joan García-Haro**, Performance evaluation of mac transmission power control in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 51(6):1483–1498, 2007.
- [26] **Huseyin Ugur Yildiz, Vehbi Cagri Gungor, and Bulent Tavli**, Packet size optimization for lifetime maximization in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 15(2):719–729, Feb. 2019.
- [27] **Huseyin Ugur Yildiz, Murat Temiz, and Bulent Tavli**, Impact of limiting hop count on the lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 19(4):569–572, 2015.
- [28] **W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan**, An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 1(4):660–670, 2002.
- [29] **K. Akkaya and M. Younis**, A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, 3(3):325–349, 2005.
- [30] **M. Rahimi, R. Baer, O. I. Iroezi, J. C. Garcia, J. Warrior, D. Estrin, and M. Srivastava**. Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 192–204, 2005.
- [31] **Z. Cheng, M. Perillo, and W. Heinzelman**, Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 192–193-204, 2005.
- [32] **Shimon Even and R Endre**, Network flow and testing graph connectivity. *SIAM journal on computing*, 4(4):507–518, 1975.
- [33] **Orhan Dagdeviren, Vahid Khalilpour Akram, and Bulent Tavli**, Design and evaluation of algorithms for energy efficient and complete determination of critical nodes for wireless sensor network reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, 68(1):280–290, 2018.
- [34] **Alexander Vavoulas, Harilaos G. Sandalidis, and Dimitris Varoutas**, Underwater optical wireless networks: A k-connectivity analysis. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 39(4):801–809, Oct. 2014.
- [35] **W. Mo, D. Qiao, and Z. Wang**, Lifetime maximization of sensor networks under connectivity and k-coverage constraints. In P.B. Gibbons, T. Abdelzaher, J. Aspnes, and R. Rao, editors, *Lecture Notes in Computer Science (Proc. Distributed Computing in Sensor Systems – DCOSS)*, volume 4026, pages 422–442. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [36] **Hemmat Sheikhi, Mohamad Hoseini, and Masoud Sabaei**, k-connected relay node deployment in heterogeneous wireless sensor networks. *Wireless Pers. Commun.*, 120:1–16, Oct. 2021.103

- [37] **Ziqiu Yun, Xiaole Bai, Dong Xuan, Ten H Lai, and Weijia Jia**, Optimal deployment patterns for full coverage and k-connectivity ( $k \leq 6$ ) wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Netw*, 18(3):934–947, Jun. 2010.
- [38] **Amira Zrelli and Tahar Ezzedine**, A new approach of WSN deployment, k-coverage and connectivity in border area. *Wireless Pers. Commun*, 121:3365—3381, Dec. 2021.
- [39] **Abhishek Tripathi, Hari Prabhat Gupta, Tanima Dutta, Rahul Mishra, KK Shukla, and Satyabrata Jit**, Coverage and connectivity in WSNs: A survey research issues and challenges. *IEEE Access*, 6:26971–26992, Jun. 2018.
- [40] **Miguel Navarro, Tyler W Davis, Yao Liang, and Xu Liang**, A study of long-term WSN deployment for environmental monitoring. In *Proc. IEEE Ann. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pages 2093–2097, 2013.
- [41] **Rajeev Singh and Matendra Singh Manu**, An energy efficient grid based static node deployment strategy for wireless sensor networks. *Int. J. Electron. Informat. Eng*, 7(1):32–40, Sept. 2017.
- [42] **Bhawani Sankar Panda and D Pushparaj Shetty**, Minimum range assignment problem for two connectivity in wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. Distrib. Comput. Internet Techn. (ICDCIT)*, pages 122–133, 2014.
- [43] **Hakki Bagci, Ibrahim Korpeoglu, and Adnan Yazici**, A distributed fault-tolerant topology control algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst*, 26(4):914–923, Apr. 2014.
- [44] **Vahid Khalilpour Akram, Orhan Dagdeviren, and Bulent Tavli**, A coverage-aware distributed k-connectivity maintenance algorithm for arbitrarily large k in mobile sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Netw*, 30(1):62–75, Feb. 2022.
- [45] **Muhammed Cobanlar, Vahid Khalilpour Akram, Orhan Dagdeviren, and Bulent Tavli**, Analysis of the tradeoff between network lifetime and k-connectivity in WSNs. In *Proc. Telecommun. Forum (TELFOR)*, pages 1–4, 2018.
- [46] **Vahid Khalilpour Akram and Orhan Dagdeviren**, DECK: A distributed, asynchronous and exact k-connectivity detection algorithm for wireless sensor networks. *Comput. Commun*, 116:9–20, Jan. 2018.
- [47] **Orhan Dagdeviren and Vahid Khalilpour Akram**, PACK: Path coloring-based k-connectivity detection algorithm for wireless sensor networks. *Ad Hoc Netw*, 64:41–52, Jun. 2017.
- [48] **Monika R Henzinger, Satish Rao, and Harold N Gabow**, Computing vertex connectivity: New bounds from old techniques. *J. Algorithms*, 34(2):222–250, Feb. 2000
- [49] **Alejandro Cornejo and Nancy Lynch**, Fault-tolerance through k-connectivity. In *Proc. Workshop Netw. Sci. Sys. Issues Multirobot Autonomy (ICRA)*, volume 2, pages 1–4, 2010.104

- [50] **Milenko Jorgic, Nishith Goel, Kalai Kalaichevan, Amiya Nayak, and Ivan Stoj-menovic**, Localized detection of k-connectivity in wireless ad hoc, actuator and sensor networks. *In Proc. Int. Conf. Comput. Commun. Netw. (ICCCN)*, pages 33–38, 2007.
- [51] **O. Dagdeviren, V. K. Akram, and B. Tavli**, Design and evaluation of algorithms for energy efficient and complete determination of critical nodes for wireless sensor network reliability. *IEEE Trans. Rel*, 68(1):280–290, Mar. 2019.
- [52] **Sookyoung Lee, Mohamed Younis, and Meejeong Lee**, Connectivity restoration in a partitioned wireless sensor network with assured fault tolerance. *Ad Hoc Netw*, 24:1–19, Jan. 2015.
- [53] **Vahid Khalilpour Akram, Orhan Dagdeviren, and Bulent Tavli**, Distributed k-connectivity restoration for fault tolerant wireless sensor and actuator networks: algorithm design and experimental evaluations. *IEEE Trans. Rel*, 70(3):1112–1125, Sept. 2021.
- [54] **Miguel A Diaz-Ibarra, Daniel U Campos-Delgado, Carlos A Gutiérrez, and Jose Martin Luna-Rivera**, Distributed power control in mobile wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 85:110–119, 2019.
- [55] **S. Lin, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, T. He, and J. A. Stankovic**, ATPC: Adaptive transmission power control for wireless sensor networks. *In Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 223–236, 2006.
- [56] **N. A. Pantazis and D. D. Vergados**, A survey on power control issues in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 9(4):86–107, 2007.
- [57] **I. Khemapech, A. Miller, and I. Duncan**, A survey of transmission power control in wireless sensor networks. *In Proc. Post Graduate Symp. Convergence of Telecommunications, Networking, and Broadcasting (PGNet)*, pages 15–20, 2007.
- [58] **M. Meghji and D. Habibi**, Investigating transmission power control for wireless sensor networks based on 802.15.4 specifications. *Telecommunication Systems*, 56(2):299–310, 2014.
- [59] **P. Santi and D. M. Blough**, The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 2(1):25–39, 2003.
- [60] **J. Jeong, D. Culler, and J. Oh**, Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks. *In Proc. Int. Conf. Networked Sensing Systems (INSS)*, pages 27–34, 2007.
- [61] **X. Wang, X. Wang, G. Xing, and Y. Yao**, Minimum transmission power configuration in real-time sensor networks with overlapping channels. *ACM Trans. Sensor Networks*, 9(2):10:1–10:28, 2013.105.

- [62] **J. Vales-Alonso, E. Egea-Lopez, A. Martinez-Sala, P. Pavon-Marino, M. V.Bueno-Delgado, and J. Garcia-Haro**, Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks. *Computer Networks (Elsevier)*, 51:1483–1498, 2007.
- [63] **R. Srivastava and C. E. Koksal**, Energy optimal transmission scheduling in wireless sensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 9(5):1550–1560, 2010.
- [64] **M. Barcelo, A. Correa, J. L. Vicario, and A. Morell**, Joint routing and transmission power control for collection tree protocol in WSN. In *Proc. IEEE Int. Symp. Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1989–1993, 2013.
- [65] **W.-B. Pöttner and L. Wolf**, Probe-based transmission power control for dependable wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Int. Conf. Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pages 44–51, 2013.
- [66] **F. Ishmanov, A. S. Malik, and S. M. Kim**, Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs): a comprehensive overview. *European Trans. Telecommunications*, 22(4):151–167, 2011.
- [67] **A. Gogu, D. Nace, A. Dilo, and N. Meratnia**, Review of optimization problems in wireless sensor networks. In *J. Hamilton Ortiz, editor, Telecommunications Networks - Current Status and Future Trends*, pages 153–180. In Tech, 2012.
- [68] **J. H. Chang and L. Tassiulas**, Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 12(4):609–619, 2004.
- [69] **V. Kapnadak and E. J. Coyle**, Optimal non-uniform deployment of sensors for detection in single-hop wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pages 89–97, 2011.
- [70] **L. Xiang, J. Luo, and C. Rosenberg**, Compressed data aggregation: energy-efficient and high-fidelity data collection. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 21(6):1722–1735, 2013.
- [71] **M. Leinonen, M. Codreanu, and M. Juntti**, Distributed joint resource and routing optimization in wireless sensor networks via alternating direction method of multipliers. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 12(11):5454–5467, 2013.
- [72] **R. Kannan and S. Wei**, Approximation algorithms for power-aware scheduling of wireless sensor networks with rate and duty-cycle constraints. *Distributed Computing in Sensor Systems*, 4026:463–479, 2006.
- [73] **M. Koulali, A. Kobbane, M. El Koutbi, H. Tembine, and J. Ben-Othman**, Dynamic power control for energy harvesting wireless multimedia sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1):158:1–158:8, 2012.106

- [74] **H. Cotuk, K. Bicakci, B. Tavli, and E. Uzun**, The impact of transmission power control strategies on lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Trans. Computers*, 63(11):2866–2879, 2014.
- [75] **M. Mallinson, P. Drane, and S. Hussain**, Discrete radio power level consumption model in wireless sensor networks. *In Proc. IEEE Int. Conf. Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)*, pages 1–2–3–6, 2007.
- [76] **Nadjib Aitsaadi, Nadjib Achir, Khaled Boussetta, and Guy Pujolle**, Multi-objective WSN deployment: quality of monitoring, connectivity and lifetime. *In Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pages 1–2–3–6, 2010.
- [77] **Andreas Konstantinidis and Kun Yang**, Multi-objective k-connected deployment and power assignment in WSNs using a problem-specific constrained evolutionary algorithm based on decomposition. *Comput. Commun*, 34(1):83–98, Jan.2011.
- [78] **Soumyadip Sengupta, Swagatam Das, MD Nasir, and Bijaya K Panigrahi**, The design of smart home system based on wireless sensor network. *In Proc. Int. Conf. Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, pages 106–108, 2013.
- [79] **Ayhan Akbas, Huseyin Ugur Yildiz, Bulent Tavli, and Suleyman Uludag**, Joint optimization of transmission power level and packet size for WSN lifetime maximization. *IEEE Sensors J*, 16(12):5084–5085-5094, Jun. 2016.
- [80] **Ravi Kishore Kodali and Narasimha Sarma**, Energy efficient routing protocols for WSNs. *In Proc. Int. Conf. Comput. Commun. Informat. (ICCCI)*, pages 1–4,2013.
- [81] **Malik Tubaishat and Sanjay Madria**, Sensor networks: an overview. *IEEE potentials*, 22(2):20–23, 2003.
- [82] **Anna Hac**, Wireless sensor network designs. *Citeseer*, 2003.
- [83] **Cauligi S Raghavendra, Krishna M Sivalingam, and Taieb Znati**, Wireless sensor networks. *Springer*, 2006.
- [84] **David Culler. D, Estrin and M. Srivastava**, “overview of sensor networks”. *IEEE Computer Society*, 37(8):41–49, 2004.
- [85] **Katayoun Sohrabi, Jay Gao, Vishal Ailawadhi, and Gregory J Pottie**, Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE personal communications*, 7(5):16–27, 2000.
- [86] **V Rajaravivarma, Yi Yang, and Teng Yang**, An overview of wireless sensor network and applications. *In Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory*, 2003, pages 432–433-434-435-436. IEEE, 2003
- [87] **USDN**, Sound Surveillance System. Erişim Adresi: [http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue\\_25/sosus.htm](http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_25/sosus.htm), Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.

- [88] **D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava**, Instrumenting the world with wireless sensor networks. In *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Proceedings (Cat. No.01CH37221), volume 4, pages 2033–2036 vol.4, 2001.
- [89] **K. Bult, A. Burstein, D. Chang, M. Dong, M. Fielding, E. Kruglick, J. Ho, F. Lin, T.H. Lin, W.J. Kaiser, H. Marcy, R. Mukai, P. Nelson, F.L. Newburg, K.S.J. Pister, G. Pottie, H. Sanchez, K. Sohrabi, O.M. Stafsudd, K.B. Tan, G. Yung, S. Xue, and J. Yao**, Low power systems for wireless microsensors. In *Proceedings of 1996 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pages 17–21, 1996.
- [90] **Joseph M. Kahn, Randy Howard Katz, and Kristofer S. J. Pister**, Emerging challenges: Mobile networking for “smart dust”. *Journal of Communications and Networks*, 2(3):188–196, 2000.
- [91] **J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva, D. Patel, and S. Roundy**, Pico radio supports ad hoc ultra-low power wireless networking. *Computer*, 33(7):42–48, 2000.
- [92] **B.H. Calhoun, A. Wang, and A. Chandrakasan**, Modeling and sizing for minimum energy operation in subthreshold circuits. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 40(9):1778–1786, 2005.
- [93] **Crossbow**, Erişim Adresi: <http://www.xbow.com>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022
- [94] **Sensoria**, Erişim Adresi: <http://www.sensoria.com>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [95] **Worldsens**, Erişim Adresi: <http://worldsens.citi.insa-lyon.fr>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [96] **Dust Networks**, Erişim Adresi: <http://www.dustnetworks.com>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [97] **Ember Corporation**, Erişim Adresi: <http://www.ember.com>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [98] **ZigBee Alliance**, Erişim Adresi: <https://csa-iot.org/>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [99] **HART Communication Protocol and Foundation**, Erişim Adresi: <http://en.hartcomm.org/>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [100] **G. Bell**, A time and a place for standards. *Queue*, 2(6):66–74, 2004.
- [101] **J.A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter, and B. Heile**. Ieee, 802.15.4: a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks. *IEEE Network*, 15(5):12–19, 2001.108.
- [102] **Ali El Kateeb, Aiyappa Ramesh, and Lubna Azzawi**, Wireless sensor nodes processor architecture and design. In *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops (aina workshops 2008)*, pages 892–897. IEEE, 2008.

- [103] **Intel Strong ARM SA-1100 Microprocessor**, Erişim Adresi: <http://www.lartmaker.nl/278088.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [104] **Texas Instruments MSP430x1xx Family**, User's Guide. Erişim Adresi: <http://www.ti.com/lit/ug/slau049f/slau049f.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [105] **ATmel 128L Microcontroller**, Erişim Adresi: <http://www.atmel.com/images/doc2467.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [106] **Jason Lester**, System architecture for wireless sensor networks. *University of California, Berkeley*, 2003.
- [107] **Marcos Augusto M Vieira, Claudionor N Coelho, DC jr da Silva, and José Mon-teiro da Mata**, Survey on wireless sensor network devices. In *EFTA 2003. 2003 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No. 03TH8696)*, volume 1, pages 537–544. IEEE, 2003.
- [108] **G. J. Pottie and W. J. Kaiser**, Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5):51–58, 2000.
- [109] **Kay Soon Low, Hong-Anh Nguyen, and Hao Guo**, Optimization of sensor node locations in a wireless sensor network. In *2008 Fourth international conference on natural computation*, volume 5, pages 286–290. IEEE, 2008.
- [110] **MICA2**, Wireless Measurement System. Erişim Adresi: <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [111] **Tmote SKY**, Datasheet. Erişim Adresi: <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [112] **J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal**, Wireless sensor network survey. *Computer Networks (Elsevier)*, 52(12):2292–2330, 2008.
- [113] **Ian F Akyildiz, Dario Pompili, and Tommaso Melodia**, Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad hoc networks*, 3(3):257–279, 2005.
- [114] **Sidharth Iyer and D Vijay Rao**, Genetic algorithm-based optimization technique for underwater sensor network positioning and deployment. In *2015 IEEE underwater technology (UT)*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [115] **Emad Felemban**, Advanced border intrusion detection and surveillance using *wireless sensor network technology*. 2013.109.
- [116] **John Heidemann, Wei Ye, Jack Wills, Affan Syed, and Yuan Li**, Research challenges and applications for underwater sensor networking. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2006. WCNC 2006, volume 1, pages 228–235. IEEE, 2006.
- [117] **Emad Felemban, Faisal Karim Shaikh, Umair Mujtaba Qureshi, Adil A Sheikh, and Saad Bin Qaisar**, Underwater sensor network applications: A comprehensive survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(11):896832, 2015.



- [118] **Jaime Lloret, Sandra Sendra, Miguel Garcia, and Ginés Lloret**, Group-based underwater wireless sensor network for marine fish farms. In 2011 *IEEE GLO-BECOM Workshops (GC Wkshps)*, pages 115–119. IEEE, 2011.
- [119] **Mullica Jaroensutasinee, K Jaroensutasinee, SJ Bainbridge, T Fountain, S Chumkiew, P Noonsang, U Kuhapong, S Vannarat, A Poyai, and M Nekrasov**, Sensor networks applications for reefs at racha island, thailand. In *Proceeding of the 12th International Coral Reef Symposium*, Cairns, Australia, page 95, 2012.
- [120] **Eric Sabbah, Adnan Majeed, Kyoung-Don Kang, Ke Liu, and Nael Abu-Ghazaleh**, An application-driven perspective on wireless sensor network security. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Quality of service & security for wireless and mobile networks*, pages 1–8, 2006.
- [121] **D. Sharma, S. Verma, and K. Sharma**, Network topologies in wireless sensor networks: a review. *Int. Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT)*, 4(3):152–157, 2013
- [122] **Narinder Singh, Malika Mittal**, Review of wireless sensor networks-architecture and applications. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 7(6), 2016.
- [123] **Luis M Borges, Fernando J Velez, and Antonio S Lebres**, Survey on the characterization and classification of wireless sensor network applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4):1860–1890, 2014.
- [124] **Wang Y, G. Attebury, and B. Ramamurthy**, A survey of security issues in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 8(2):2–23, 2006.
- [125] **H. Chan and A. Perrig**, Security and privacy in sensor networks. *IEEE Computer Magazine*, 36(10):103–105, 2003
- [126] **Ismail Butun, Salvatore D Morgera, and Ravi Sankar**, A survey of intrusion detection systems in wireless sensor networks. *IEEE communications surveys& tutorials*, 16(1):266–282, 2013.
- [127] **Ritesh Madan, Shuguang Cui, Sanjay Lall, and Andrea Goldsmith**, Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(11):3142–3152, 2006.110.
- [128] **Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing Chua**, Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 270–283, 2005.
- [129] **Jae-Hwan Chang and Leandros Tassiulas**, Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint*

*Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064)*, volume 1, pages22–31. IEEE, 2000

- [130] **S. P. Bradley, A. C. Hax, and T. L. Magnanti**, Applied mathematical programming. *Addison-Wesley*, 1977.
- [131] **J. W. Chinneck**, Practical optimization: a gentle introduction, 2011. Erişim Adresi: <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [132] **D. Kahaner, C. Moler, and S. Nash**, Numerical Methods and Software. *Prentice-Hall, Inc*, 1989.
- [133] **G. Dantzig**, A history of scientific computing. chapter Origins of the Simplex Method, pages 141–151. *ACM*, 1990.
- [134] **G. Dantzig**, Linear Programming and Extensions. *Princeton University Press*,1963.
- [135] **N. Karmarkar**, A new polynomial time algorithm for linear programming. *Combinatorica*, 4:373–395, 1984
- [136] **General Algebraic Modeling System (GAMS)**, Erişim Adresi: <http://www.gams.com/>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [137] **MATLAB**, The Language of Technical Computing. Erişim Adresi: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022.
- [138] **Suresh Kurumbanshi, Shubhangi Rathkanthiwar, Shashikant Patil, and PravinWararkar**, Deployment of energy efficient network using dynamic source routing. *In Proc. Int. Conf. Comput. Commun. Informat. (ICCCI)*, pages 1–5,2021.
- [139] **M. A. Khan, N. Javaid, A. Majid, M. Imran, and M. Alnuem**, Dual sink efficient balanced energy technique for underwater acoustic sensor networks. *In Proc.Int. Conf. Adv. Inform. Netw. Appl. Work. (WAINA)*, pages 551–556, 2016.
- [140] **R. Madan and S. Lall**, Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun*, 5(8):2185–2193, Aug.2006.
- [141] **Junhua Zhu, Ka-Lok Hung, and Brahim Bensaou**, Tradeoff between network lifetime and fair rate allocation in wireless sensor networks with multi-path routing. *In Proc. ACM Int. Symp. Model. Anal. Simul. Wirel. Mobile Syst. (MS-WiM)*, pages 301–308, 2006.111.
- [142] **Tolga Bektas and Luis Gouvei**, Requiem for the Miller–Tucker–Zemlin subtour elimination constraints *Eur. J. Oper. Res*, 236(3):820–832, Aug. 2014.
- [143] **Maggie Cheng, Xuan Gong, and Lin Cai**, Joint routing and link rate allocation under bandwidth and energy constraints in sensor networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun*, 8(7):3770–3779, Jul. 2009

- [144] **H. Cotuk, B. Tavli, K. Bicakci, and M. B. Akgun**, The impact of bandwidth constraints on the energy consumption of wireless sensor networks. *In Proc.IEEE Wireless Commun. Network. Conf. (WCNC)*, page 2787–2792, 2014

