

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

**GÜVENİLİR KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN  
ÇOK MERKEZİ DÜĞÜMLÜ ŞARTLI ÇOK KOPYALI  
BİR YOL ATAMA STRATEJİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Merve EKMEN**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN**

**ARALIK 2015**

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131311014 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Merve EKMEN**'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**GÜVENİLİR KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN ÇOK MERKEZİ DÜĞÜMLÜ ŞARTLI ÇOK KOPYALI BİR YOL ATAMA STRATEJİSİ**" başlıklı tezi **18,12,2015** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN** .....  
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Oya KARAŞAN (Başkan)** .....  
Bilkent Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

Merve Ekmen

İMZA

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Endüstri Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Aralık 2015

**Merve EKMEN**

## **GÜVENİLİR KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN ÇOK MERKEZİ DÜĞÜMLÜ ŞARTLI ÇOK KOPYALI BİR YOL ATAMA STRATEJİSİ**

### **ÖZET**

Mikro-elektro-mekanik sistemler (*MEMS*) teknolojisindeki ilerlemeler, düşük maliyetli, kısıtlı batarya enerjisine sahip, küçük boyutta, fonksiyonel ve kısa mesafelerde fiziksel olarak bağlı olmadan birbirleriyle iletişim kurabilen sensörlerin gelişimine olanak tanımıştır. Kablosuz Algılayıcı Ağlar (*KAA'lar*), sıcaklık, nem, ses, basınç vb. fiziksel veya çevresel faktörleri gözlemleyerek veri üreten ve birbiri üzerinden verileri özel bir bölge veya noktaya ileten, belirli bir alana dağıtılmış bağımsız sensörlerden oluşan bilgi iletim sistemleridir.

Bu tezde *KAA* Tasarım Problemi altında ağ ömrünün ve güvenilirliğinin iyileştirilmesi amacıyla koşullu çok kopyalı ve çok yollu bir rotalama stratejisi geliştirilmiştir. Önerilen strateji, her sensörün kendi verisini iki kez baz istasyonuna (*BS*) gönderdiği basitçe kısıtlanmış çok kopyalı rotalama stratejileri için ağ ömrü ve güvenilirliği arasındaki ödünleşimin dikkate alındığı bir iyileştirme niteliğindedir. Buna göre kaynak algılayıcılar, kendi sezdikleri bütün veri yerine sadece ağ bütünlüğü açısından nispeten daha kritik bir rol oynayan ve merkezi olarak adlandırılan düğümler üzerinden gönderdikleri veriyi kopyalayarak düğüm ayrık yollar üzerinden *BS*'ye göndermektedirler. Böylece dışarıdan gelebilecek saldırılara veya düğümlerde meydana gelebilecek arızalara karşı korunaklılık bütün verinin değil sadece kritik düğümlere uğrayan kısmın korunması ile sağlanmaktadır. Problem için öncelikle iki farklı karma tamsayılı programlama modeli önerilmiştir. Sunulan çoklu merkezi düğüm ve şartlı kopyalama stratejisi farklı stratejilerle ağ ömrü ve güvenilirliği açısından çeşitli büyüklükteki ağlar üzerinde karşılaştırılmıştır. Önerilen kopyalama stratejisinin kıyaslandığı farklı çoklu kopyalama stratejilerine oranla ağ ömründen fazla feragat etmeden ağ güvenliğini belirgin şekilde iyileştirdiği anlaşılmıştır. Devamında öncelikle her iki modelin ticari çözücüyle çözüm sürelerini önemli şekilde kısaltan bazı geçerli eşitsizlikler sunulmuştur. Ayrıca özellikle büyük ölçekli örneklerin çözümü için çok aşamalı bir sezgisel geliştirilmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntemin, bir çözücünün kabul edilebilir bir süre içinde çözemediği

durumlarda daha kısa sürelerde kaliteli çözümler bulduğu ve belirtilen zaman limiti içerisinde modelin optimal çözümünü bulamadığı durumlarda ise sezgiselin modelin sunduğu *aralık (gap)* değerini yarıya düşürdüğü görülmüştür. Son olarak sunulan modelde kullanılan bazı parametrelerin model üzerindeki etkilerini incelemek için onların farklı değerleri ile birtakım testler yapıp elde edilen sonuçlar ile duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz algılayıcı ağ, koşullu çoklu kopya, çoklu yol atama, güvenilirlik, matematiksel modelleme.

**University** : TOBB Economics and Technology University  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Industrial Engineering  
**Supervisor** : Assoc. Prof. Dr. Ayşegül ALTIN-KAYHAN  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – December 2015

**Merve EKMEN**

**A CONDITIONAL MULTI-COPY STRATEGY WITH MULTIPLE  
CENTRAL NODES FOR MORE RELIABLE WIRELESS SENSOR  
NETWORKS**

**ABSTRACT**

Recent advances in micro-electronic mechanical systems (*MEMS*) led to the development of tiny, cost-efficient, independent and functional sensors with limited capabilities. Wireless Sensor Networks (*WSNs*) are information delivery systems and they consist of independent sensors generating data by sensing physical or environmental conditions such as temperature, humidity, sound, pressure etc., and transmit it to a special point or location within a cooperation.

In this thesis, we consider the Wireless Sensor Network (*WSN*) Design Problem under an energy efficient conditional multi-copy and multi-path routing strategy so as to improve network reliability. Our strategy is an improvement over the simple restricted multi-copy strategies where every sensor duplicates its data since we provide comparable levels of network reliability and yet extend network lifetime significantly. Hereunder, instead of whole data only the data routed through the central nodes which are more critical in terms of network reliability would be duplicated at its source and sent to the *BS* (*base station*) on another node disjoint path. Hence, instead of the whole data in the network only the data visiting central nodes is protected while safeguarding against malicious attacks or failures on nodes.

We offer two different mixed integer programming models for two variates of the our strategy. The novel conditional multi-copying with multiple central nodes strategy, *CM* (*Conditional Multi-copying*), and other multi-copying strategies are compared with respect to the network lifetime and reliability metrics. According to the test results, *CM* improves network reliability by giving of a little reliability in contrast with other strategies. Afterwards, we present several valid inequalities significantly shortening solution times in commercial solvers for both models. Moreover, we present a multi step heuristic method especially for tests on larger networks. The algorithm provides good solutions in reasonable times when compared

with the commercial solver. Finally, a series of sensitivity analyses are done on *CM* by changing the values of some parameters.

**Keywords:** Wireless sensor networks, conditional multi-copying, multi-path routing, reliability, mathematical modelling.

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren sevgili hocam Ayşegül ALTIN KAYHAN'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma, tezimi değerlendiren kıymetli jüri üyelerim sayın Oya KARAŞAN ve sayın Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER'e ve 112M226 numaralı ve "Topoloji Kontrolü Ve Kısmi Fazlılığa Dayalı Güvenlik Önlemleri ile Enerji Verimli Kablosuz Algılayıcı Ağ Tasarımı" adındaki araştırma projesi kapsamında sağladığı burs desteği için TÜBİTAK'a çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
KISALTMALAR .....	xiii
SEMBOL LİSTESİ .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR .....</b>	<b>11</b>
2.1 KAA'ların Uygulama Alanları.....	12
2.2 Sensörlerin Yapısı .....	13
2.3 Veri İletim Ortamı.....	15
2.4 Enerji Tüketimi .....	15
2.5 Protokol Katmanları .....	16
<b>3. LİTERATÜR TARAMASI.....</b>	<b>17</b>
<b>4. PROBLEM TANIMI .....</b>	<b>34</b>
4.1 Parametreler .....	39
4.2 Karar Değişkenleri .....	40
4.3 Formülasyon.....	43
4.4 Alternatif Model.....	45
4.5 Geçerli Eşitsizlikler .....	46
4.5.1 Bağlanırlık eşitsizliği (VI) .....	46
4.5.2 Aday küme indirgeme eşitsizliği (V2) .....	47
<b>5. TEST SONUÇLARI .....</b>	<b>50</b>
5.1 Ağ Ömrü ve Güvenilirliği Kıyaslaması .....	50
5.1.1 Parametre ve varsayımlar .....	55
5.1.2 Test kümeleri.....	56
5.1.3 Ağ ömrünün kıyaslanması .....	57
5.1.4 Ağ güvenilirliğinin kıyaslanması .....	59
5.2 Geçerli Eşitsizliklerin Etkisi .....	62
5.2.1 CM için gerçekleştirilen testler .....	62
5.2.2 $CM^{rest}$ için gerçekleştirilen testler .....	64
<b>6. SEZGİSEL YÖNTEM.....</b>	<b>67</b>
6.1 Algoritmanın İşleyişi.....	67

6.2	Algoritma Sonuçları .....	70
<b>7.</b>	<b>DUYARLILIK ANALİZİ.....</b>	<b>73</b>
7.1	“ $\alpha$ ” Parametresi İçin Duyarlılık Analizi.....	73
7.2	“ $K$ ” Parametresi İçin Duyarlılık Analizi .....	75
<b>8.</b>	<b>SONUÇLAR .....</b>	<b>77</b>
	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>81</b>
	<b>EKLER.....</b>	<b>84</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>86</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : $KAA$ 'da (a) tek sekmeli, (b) çok sekmeli veri iletimi.....	12
Şekil 2.2 : Tipik bir sensör cihazının bileşenleri.....	14
Şekil 4.1 : (a) Tek yol atamalı ve (b) Çok yol atamalı rotalama stratejisi.....	35
Şekil 4.2 : $CM$ 'de koşullu çoklu kopya stratejisi.....	37
Şekil 4.3 : $CM$ 'de kullanılan parametrelerin temsili gösterimi.....	39
Şekil 4.4 : $x_{ij}^k$ ve $a_j^k$ karar değişkeninin ağdaki işlevi.....	41
Şekil 4.5 : $h_j$ karar değişkeninin ağdaki işlevi.....	41
Şekil 4.6 : $y_{ij}^k$ karar değişkeninin ağdaki işlevi.....	42
Şekil 4.7 : $f_{kj}^l$ karar değişkeninin ağdaki işlevi.....	42
Şekil 4.8 : Örnek bir $KAA$ .....	48
Şekil 5.1 : (a) tek kopyalı ve (b) dengeli tek kopyalı strateji.....	53
Şekil 5.2 : (a) çok kopyalı ve (b) kısmi çok kopyalı strateji.....	53
Şekil 5.3 : (a) $bNM$ , (b) FDM ve (c) $CM$ stratejisi ile veri kaybı.....	54
Şekil 5.4 : Haberleşme mesafesi.....	56
Şekil 5.5 : Ortalama ağ ömrü değerleri.....	58
Şekil 5.6 : Bozulma oranı (a) %10, (b) %20, (c) %30, (d) %40, (e) %50 ve (f) %60 olduğu durumlarda ortalama korunan veri yüzdeleri.....	60
Şekil 5.7 : (a) Ağ büyüklüğü; (b) Hata oranına göre ortalama veri korunum yüzdeleri.....	61
Şekil 6.1 : Ortalama ağ ömrü değerleri.....	70
Şekil 6.2 : Ortalama çözüm süreleri.....	71
Şekil 6.3 : Cplex ve algoritma için yüzde aralık değerleri.....	72

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Literatür incelemesindeki çalışmaların sınıflandırılması.....	32
Çizelge 4.1 : Parametreler ve açıklamaları.....	39
Çizelge 4.2 : Karar değişkenleri ve açıklamaları.....	40
Çizelge 5.1 : Ortalama ağ ömrü değerleri.....	57
Çizelge 5.2 : $CM$ 'nin ağ ömrü üzerindeki iyileştirme yüzdesi.....	59
Çizelge 5.3 : $BS$ 'ye ulaşan ortalama veri miktarları.....	62
Çizelge 5.4 : $V2$ 'nin 41 düğümlü $CM$ 'nin çözüm süresi üzerindeki etkisi.....	63
Çizelge 5.6 : $V2$ 'nin 51 düğümlü $CM$ 'nin çözüm süresi üzerindeki etkisi.....	65
Çizelge 5.7 : $V1$ , $V2$ ve $V1-V2$ 'nin $CM^{rest}$ 'in çözüm süresi üzerindeki etkisi.....	66
Çizelge 6.1 : Algoritmanın sözde programı.....	68
Çizelge 6.2 : Cplex ve algoritmanın sağladığı ağ ömrü değerleri ve çözüm süreleri.....	71
Çizelge 7.1: $\alpha$ parametresinin farklı değerleri için 41 düğümlü ağlarda test sonuçları. ....	73
Çizelge 7.2: $\alpha$ parametresinin farklı değerleri için 51 düğümlü ağlarda test sonuçları. ....	74
Çizelge 7.3: $K$ parametresinin farklı değerleri için test sonuçları.....	75
Çizelge Ek.1 : 41 düğümlü örneklerde $CM^{rest}$ modeline $V1$ , $V2$ ve $V1-V2$ eklendiğinde gerçekleşen çözüm süresi değerleri.....	85
Çizelge Ek.2 : 51 düğümlü örneklerde $CM^{rest}$ modeline $V1$ , $V2$ ve $V1-V2$ eklendiğinde gerçekleşen çözüm süresi değerleri.....	85

## KISALTMALAR

<b>KAA</b>	: Kablosuz Algılayıcı Ağ
<b>BS</b>	: Baz İstasyonu (Base Station)
<b>CM</b>	: Koşullu Çoklu Kopyalama (Conditional Multi-copying)
<b>MD</b>	: Merkezi Düğüm
<b>CM<sup>rest</sup></b>	: Şatlı Koşullu Çoklu Kopyalama (Restricted Conditional Multi-copying)
<b>bNM</b>	: Dengeli Tek Kopyalama (Balanced No Multi-copying)
<b>FDM</b>	: Tamamen İkili Kopyalama (Fully Double Copying)
<b>V1</b>	: Geçerli Eşitsizlik 1 (Valid Inequality 1)
<b>V2</b>	: Geçerli Eşitsizlik 2 (Valid Inequality 2)

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$N$	Ağdaki düğümlerin kümesi
$N_0$	BS dışındaki düğümlerin kümesi
$A$	Yönlü bağlantıların kümesi
$E_{mi}$	Her bir sensörün başlangıç enerjisi
$s_k$	Birim zamanda üretilen veri miktarı
$PRX$	Birim veri almak için harcanan enerji miktarı
$PTX_{ij}$	$i$ düğümünden $j$ düğümüne birim veri göndermek için harcanan enerji miktarı
$\alpha$	Birincil veri iletim miktarı için eşik katsayısı
$K$	Ağda bulunabilecek azami merkezi düğüm sayısı
$C$	İkincil veri iletim oranı
$M$	Çok büyük pozitif bir sayı
$T$	Ağ ömrü
$x_{ij}^k$	$k \in N_0$ kaynağından çıkan ve $(i, j)$ ayrıtı üzerinden rotalanan birincil veri miktarı
$y_{ij}^k$	$k \in N_0$ kaynağından çıkan ve $(i, j)$ ayrıtı üzerinden rotalanan ikincil veri miktarı
$h_j$	$j \in N_0$ merkezi düğümse değeri 1'e; değilse 0'a eşit olan gösterge değişken
$a_j^k$	$j \in N_0$ düğümü $k \in N_0$ kaynağının verisini iletiyorsa değeri 1'e; iletmiyorsa 0'a eşit olan gösterge değişken
$f_{kj}^l$	$k \in N_0$ kaynağından çıkıp $l \in N_0$ merkezi düğümü üzerinden geçen birincil veriyi korumak için $k$ kaynağından $j \in N_0$ düğümüne aktarılan ikincil veri miktarı
$z_j^k$	$k \in N_0$ kaynağından çıkan veri $j \in N_0 \setminus \{k\}$ merkezi düğümünü kullanıyorsa değeri 1'e; kullanmıyorsa 0'a eşit olan gösterge değişken
$b_{j0}$	$j \in N_0$ düğümü $BS$ 'ye doğrudan bağlı ise değeri 1'e; değilse 0'a eşit olan parametre
$\Delta_0$	$BS$ 'ye doğrudan bağlı düğümler kümesi
$T_{maks}$	Maksimum ağ ömrü değeri
$N_{maks}$	$N_C$ kümesine eklenebilecek toplam düğüm sayısının maksimum değeri
$N_C$	Merkezi düğümler için oluşturulan aday küme
$l$	Algoritmadaki döngü sayısı
$\mathcal{P}_j$	$j \in N_0$ 'dan $BS$ 'ye olan en kısa yol
$SP_i$	Bir $i \in N_0$ düğümünün üzerinde bulunduğu toplam en kısa yol sayısı
$B$	En yüksek ağ ömrünü veren merkezi düğüm kümesi

## 1. GİRİŞ

Mikro-elektro-mekanik sistemler (*MEMS*) günümüzde kullanılan mekanik ve elektronik sistemlerin mikron boyutunda birbirine entegre edilmiş versiyonlarıdır (Url-1, 2015). *MEMS* teknolojisi ile, küçük mikro-işlemciler ve düşük enerjili radyo teknolojilerindeki gelişmeler düşük maliyetli, düşük enerjili ve çok işlevli bir yapıda olan ve çevresindeki fiziksel olayları gözleme ve değişikliklere tepki verme yeteneğine sahip minyatür algılayıcı cihazların oluşumuna olanak tanımıştır (Baronti ve diğ., 2007).

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (*KAA*'lar), kablosuz bir ortam aracılığı ile birbirlerine bağlanmış, sınırlı batarya enerjisi ve veri işleme yeteneğine sahip, birbirleriyle bilgi alışverişi yapan yüzlerce hatta binlerce algılayıcı düğümünden yani sensörden oluşur (Akyıldız ve Kasımoğlu, 2004). Ağı oluşturan her sensörün başlıca görevi; bulunduğu çevreye ait olan olay veya durumları görüntülemektir. Bu çalışmada görüntüleme fiili "sezme" veya "algılama" olarak da adlandırılmaktadır. Her sensör kendi etrafındaki durumlarla ilgili sezerek elde ettiği bilgileri baz istasyonu (*Base Station-BS*) olarak adlandırılan varış noktasına iletmekle yükümlüdür. Bir sensörden *BS*'ye veri iletimi doğrudan olabileceği gibi diğer sensörler üzerinden de olabilir. Dolayısıyla her sensör diğer sensörlerden kendisine gönderilen veriyi *BS*'ye doğru yönlendirmekle de görevlidir.

Sensörlerin sınırlı batarya enerjisine sahip olmaları *KAA*'larla ilgili çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. *KAA*'lar sensörlerden oluştuğu için bütün ağın ömrü sensörlerin bataryalarının tükenme süreleriyle ilişkilidir. Literatürde ağ ömrünü belirleyen farklı yaklaşım ve uygulamalar mevcuttur. Örneğin; ağ ömrü bazı yapılarda ağın kurulumundan başlayıp belirli büyüklükteki hedef bölgedeki veriler sezilemeyene kadar geçen süreyken; bazılarında ise ağdaki bir veya belirli sayıdaki sensörün bataryasının tükenmesine kadar olan süre olarak düşünülebilir (Alfieri ve diğ., 2007). Tercih edilen ağ ömrü metriği, *KAA*'nın kullanıldığı uygulamaya göre farklılık gösterebilir. Bu çalışmada ağ ömrünü ağdaki enerjisi en erken tükenen sensörün ömrü belirlemektedir. Yani ağ ömrü, ağın kurulumundan başlayıp ağdaki

bir sensörün batarya enerjisi tükenene kadar geçen süredir. Dolayısıyla sensörlerin verileri sezme, işleme, iletme ve alma süreleri de kısıtlıdır.

KAA'lar çoğunlukla uzak ve ıssız bir alana sensörlerin rastgele saçılmasıyla oluşturuldukları için pek çok uygulamada enerjisi biten sensörlerin bataryalarının yenilenmesi veya tekrar şarj edilmesi neredeyse imkansızdır. Bu sebeple ağ ömrünün mümkün olduğunca uzun olması istenmektedir. Ağ ömrü iyileştirmesi için literatür taramasında incelenen bazı çalışmalarda sensörlerin yer ve özelliklerinin bilindiği bir ağda enerji tüketim problemiyle başa çıkmaya yönelik yaklaşımlardan bahsedilmiştir. Gereksiz verileri azaltma, sensörlerin çalışır halde olup olmadıklarını gösteren açık/kapalı durumlarını çizelgeleme, enerji verimli rotalama başlıkları altında enerji tasarruf sistemleri sunulmuştur (Rault ve diğ., 2014). Enerji verimli rotalama başlığı beş kategoriye ayrılmaktadır: kümeleme yapısı, rotalama metriği olarak enerjinin kullanımı, çok yönlü rotalama, yedek düğüm yerleştirme ve *BS*'nin hareketliliği (Rault ve diğ., 2014). Bu çalışmada rotalama kararı verilirken enerji tüketimi de göz önünde bulundurulmaktadır. Ayrıca hiçbir düğüm, kendi ürettiği veriyi ve ona diğer düğümlerden gelen veriyi sadece bir paket halinde tek bir rota üzerinden göndermekle kısıtlanmamaktadır. Yani düğümlere rotalama kararı verilirken verileri parçalara bölerek iletme serbestliği sunulmaktadır. Dolayısıyla enerji kullanımını azaltmak için *çok yönlü rotalamaya* izin verilmektedir.

KAA tasarımında ağın potansiyel ömrü; yani teorik olarak azami ömrüne yakın süre boyunca sürdürülebilmesi için ağ ve veri bütünlüğünün sağlanması büyük önem taşımaktadır. Eğer verilerin iletildikleri yollarda iletişim bağlantıları veya düğümlerdeki sorunlar sebebiyle aksaklıklar olursa veri paketleri *BS*'ye ulaşamazlar. Bir bağlantı hatası veya arızası; kısa devre, parazit, düşük sinyal veya çevresel koşullardan kaynaklanabilmektedir. Bir düğümdeki başarısızlık ise yazılım veya donanımdaki hatalar nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. Ağdaki bağlantılarda veya düğümlerde bir sorun olsa bile verilerin *BS*'ye ulaştırabilmesi ağın *hata/arıza* toleransına sahip olduğunu göstermektedir ve bu tip ağlar *güvenilir* olma özelliği taşımaktadır. Veri iletim performansı ne kadar yüksek olursa o ağ o kadar daha güvenilir addedilir. Bu çalışmada ağ güvenilirliği dikkate alınarak ve enerji verimli



rotalama stratejisi kullanılarak ağ ömrünün mümkün olan en büyük değeri bulunmak istenmiştir.

*Hata/arıza toleransı*, bazı birimleri bozursa bile ağın doğru çalışmaya devam etmesi, yani ağ bütünlüğünün korunmasıdır. *KAA*'lardaki hata sebepleri üzerine farklı sınıflandırmalar yapılmıştır (Liu ve diğ., 2009, Souza ve diğ., 2007). Souza ve diğ. (2007)'ye göre hatalar düğüm, ağ veya *BS*'deki problemlerden kaynaklanmaktadır. Düğüm hataları, bir düğümdeki yazılım veya donanımdaki sorunlardan kaynaklanabilir. Bazı durumlarda donanım hatası, yazılım hatasına da sebep olabilir. Örneğin; çevre görüntülemesi sırasında eğer düğümdeki batarya enerjisi belli bir eşik değer altına düşerse sezme ünitesi hatalı algılamalar yapabilir. Enerjilerinin tükenmesi düğümleri hizmet sağlamaktan alıkoyduğu için bataryanın tükenmesi de genel ve kritik bir hata/arıza olarak düşünülebilir. Bu sebeple *KAA*'larda enerji tüketimini azaltan ve ağ ömrünü arttıran her mekanizma *engelleyici hata toleransı* tekniği olarak görülmektedir (Chouikhi ve diğ., 2015). Ağ hatalarında, ağdaki rotalama protokolüne göre kullanılan yollar veri kaybına yol açabilir. Bu sebeple rotalama protokolünde uygulama gereksinimlerine öncelik verecek şekilde yol seçimi yapılmalıdır. Örneğin; veri toplama işleminin periyodik olarak yapıldığı bir protokolda, her periyotta yeni yollar belirlenirken veri iletiminde meydana gelebilecek gecikmeler tolere edilebiliyorken; kritik bir yangın dedektörü uygulaması hata oluşsa bile acil veri paketlerinin *BS*'ye mümkün olduğunca gecikmeden ulaşmasını gerektirmektedir. Ayrıca verilerin *BS*'ye ulaşması için ağın bağlı olması gerekmektedir. *BS*'deki hatalar, düğümlerde olduğu gibi donanım veya yazılımdan da kaynaklanabilmektedir; ancak *BS* için enerji kısıtı yoktur.

Sensör düğümlerinin işleyişini yönlendiren bazı protokoller bulunmaktadır. Kullanılan protokol kümesi bazı katmanlardan oluşmaktadır. Bunlar: uygulama katmanı, iletim katmanı, ağ katmanı, veri bağlantı katmanı, fiziksel katman, güç yönetimi, hareketlilik yönetimi ve görev yönetimidir. Liu ve diğ. (2009)'a göre hatalar, gerçekleştikleri tabakaya göre dörde ayrılmaktadır. Bunlar: donanım, yazılım, ağ iletişimi ve uygulama tabakasındaki hatalardır. Donanım tabakasındaki hatalar, düğümdeki hafıza, batarya, sezme ünitesi ve kablosuz radyo gibi sensör bileşenlerindeki işlev bozukluklarıdır. Bu katmandaki başlıca hata sebepleri

bileşenlerin kalitesi, belli bir eşik değerinin altına düşmesiyle hatalı okumalara sebep olan kısıtlı enerji ve düşmanca saldırılardır. Yazılım tabakası sensörün işletim sistemi, iletişim ve rotalama gibi işlevlerini yöneten parçalardan oluşmaktadır. Bu tabakadaki temel hataların sebebi “*bug*” şeklinde adlandırılan yazılım hatalarıdır. Ağ iletişimi tabakasında sensörler arasında haberleşmeyi sağlayan bağlantılar hataya yatkın olduklarından bu tabaka oldukça hassastır. Bu tabakadaki hatalar, ağın üzerinde bulunduğu tehlikeli çevre koşullarının yansısı sensörler veya birlikte çalışan ağlar arasındaki radyo parazitlerinden kaynaklanır. Bu problemin üstesinden gelmek ve iletişimi sürdürebilmek için, çeşitli hata düzeltme mekanizmaları, veriyi yeniden gönderme stratejileri ve çok kanallı (*çok yollu*) iletişim sistemleri kullanılabilir. Uygulama tabakasındaki problemler uygulamaya özeldir. Çünkü her uygulama, gereksinimlerine bağlı olarak kendi hata toleransını belirler. Örneğin; ağdaki *kapsama* ve *bağlılık* hizmet gereksinimleri uygulamaya en fazla bağlı problemlerdir. Buna göre sensör ağı belli bir kapsama veya bağlılık seviyesinin altına düştüğünde ağın hata toleransı sistemi devreye girebilmektedir.

Hata toleransı teknikleri pek çok kritere göre sınıflandırılabilir. Anahtar sınıflandırma kriterlerinden birisi, hatadan önce veya sonra olmak üzere hata toleransı prosedürünün tetiklendiği andır. Buna göre bu teknikler “*önleyici*” ve “*düzeltilici*” olarak ikiye ayrılır. *Önleyici* teknikler; hafıza, hesaplama yeteneği, enerji gibi sensörlerdeki kısıtlı kaynakların kullanımı iyileştirilerek veya bir hatanın ağın sunduğu hizmetin bütünlüğünü etkilemeyeceği farklı alternatifler oluşturularak yapılandırılır. *Düzeltilici* teknikler ise ağda bir problem olduğunda tetiklenir. Hatayı düzeltme ise hatalı/arızalı bileşenleri yenileriyle değiştirmekle gerçekleşmektedir. Yeni bileşen eklenmesinin yansısı ağda yedekte bekletilen veya uyku modunda olan düğümlerin aktif hale getirilmesi de değiştirme kapsamında değerlendirilmelidir.

Bir diğer sınıflandırma kriteri hata toleransı tekniğinin uygulanma amacına göredir. *Amaç* kriterine göre mekanizmalar *enerji/güç* yönetimi, *akış* yönetimi, *veri* yönetimi ile *kapsama* ve *bağlantılılık* yönetimi olmak üzere dörde ayrılır. *Enerji yönetiminin* temel amacı, enerjinin erken tükenmesini engelleyerek ağ ömrünün mümkün olan en büyük değere ulaşmasına yönelik çeşitli mekanizmalar geliştirmektir. Böylece düğüm hatalarının enerji tükenmesi sebebiyle oluşan kısmı engellenmiş veya

ertelenmiş olur. *Akış yönetimi*, ağdaki sensör düğümlerinden çıkan veriler *BS*'ye iletilirken kullanılan rotaların güvenilir olmasını amaçlar. Akış yönetimi, en iyi yolları (rotaları) bularak ve herhangi bir rota hatasını kurtararak veri iletiminde sürekliliği sağlar. *Veri yönetiminde*, ağın performansını iyileştirmek için verinin nasıl yönetilmesi gerektiği araştırılır. Başka bir konu ise ağın bazı bileşenlerinin bozulmasına karşın hala bilgiye erişimin sağlanabilmesidir. Burada iki önemli faktör vardır: *kapsama* ve *bağlantılılık*. *Kapsama*, ilgili alanı sensör ağının ne kadar iyi görüntülediğini tanımlar. Örneğin, eğer ağdaki görüntülenene her bölge en az  $k$  tane sensörün kapsama alanı içindeyse  $k$ -kaplı bir ağdan bahsedebiliriz. *Bağlantılılık* ise ağdaki her sensörün tek ve/ya çok sekmeli bir rota üzerinden *BS*'ye veri iletebilme yeteneğidir. *Kapsama* ve *bağlantılılık* konuları, bir sensördeki hata/arızanın ağda boşluk veya parçalanmaya sebep olabilmesi nedeniyle oldukça önemlidir.

Bu çalışmada temel amaç, verilen bir ağ üzerindeki veri iletim yollarını belirleyerek enerji verimli ve güvenilir bir ağ ortamı sunmaktır. Chouikhi ve diğ. (2015)'te küçük ölçekli ağlarda enerji ve akış yönetimi için geliştirilmiş çözümler iki temel kısımda incelenmiştir. İlk teknik; literatürde "*retransmission*" şeklinde bahsedilen *yeniden iletim*dir. *Yeniden iletim* mekanizmasında kaynak düğüm belirlenen yol üzerinden kendi verisini gönderir ve eğer bu yol veriyi iletmeye başarısız olursa, kaynak bu veriyi başka bir yol üzerinden tekrar gönderir. Diğer teknik, literatürde "*data-replication*" diye geçen *veri kopyalamadır*. Veri kopyalama tekniğinde kaynak düğüm, hem kendi ürettiği orijinal veriyi hem de bu verinin en az bir kopyasını çoğunlukla *düğüm-ayrık* olan farklı yollar üzerinden gönderir. *Düğüm-ayrık* olan iki rota, kendi aralarında hiçbir ortak düğüme sahip değildir. Veri kopyalama tekniği yüksek derecede güvenilirlik sunarken hata toleransını *BS*'ye aynı veriden birden fazla kopya göndererek sağlar. Ancak bu uygulamalar enerji israfına yol açmaktadır. O halde tüm düğümlere aynı kopyalama prosedürünü uygulamak yerine hata toleransını sağlamada kritik göreve sahip düğümlere uygulamak daha mantıklıdır. Böylece güvenilirlik ve enerji kullanımı arasında kısmen de olsa bir dengeden söz edilebilir. Bu çalışmada *enerji* ve *akış* yönetiminde hata toleransını sağlamak üzere kısmi veri kopyalama tekniği kullanılmıştır.

Bir KAA'da veri ve ağ bütünlüğü, ağdaki düğüm ve bağlantılardaki hata ve/ya arızalar nedeniyle bozulabileceği gibi ağ dışından gelen saldırılar veya ağa izinsiz girişler nedeniyle de tehdit altındadır. Saldırı veya ağa izinsiz giriş toleransına sahip ağlar *güvenli* olarak nitelendirilmektedir. KAA'ların işleyişindeki zorluklar çoğunlukla sensörlerin hesaplama yeteneklerinin, hafıza kapasitelerinin ve sahip oldukları enerji miktarlarının sınırlı olması ile kablosuz haberleşme kanallarının yeterince güvenli olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu durum da KAA'larda güvenlik boyutuna özen gösterilmesini gerektirmektedir. Çünkü güvenlik, savaş alanlarında kullanılan hedef izleme ve takip sistemleri, kanun yaptırımı uygulamaları, otomotiv telemetrik uygulamaları, işyerlerinde odaların izlenmesi, benzin istasyonlarında sıcaklık ve basınç ölçümleri ile orman yangın tespit sistemleri gibi birçok KAA uygulamasında hayati öneme sahiptir. Örneğin; savaş alanlarında sensörler tarafından toplanılan mühimmat deposu, sığınaklar ve kritik noktalara ilişkin bilgilerin düşman tarafından ele geçirilmesi hayati bir tehdit oluşturabilmektedir.

KAA'da güvenliği arttırmaya yönelik teknikler kriptografi, anahtar yönetimi, güvenli rotalama, güvenli veri birleştirme ve izinsiz giriş tespiti olarak beş kategoride incelenebilir. Güvenlik hizmetlerinin temel görevi bilgi ve kaynakları saldırılardan korumaktır. KAA'larda pek çok saldırı tipi bulunmaktadır. Bunlar ağın güvenlik gereksinimlerine göre gizlilik/kimlik doğrulamaya, ağ kullanılabilirliğine ve hizmet bütünlüğüne karşı gerçekleşen saldırılar şeklinde üçe ayrılabilir (Wang ve diğ, 2006). Sharma ve Ghose (2010)'da, KAA'da güvenliği tehdit eden saldırı tipleri altı kategoride incelenmiştir. Bunlar: hizmet dışı bırakmaya yönelik saldırılar (*Denial of Service-DoS*), taşınan veriye yönelik saldırılar (*Attacks on information in transit*), *sybil*, karadelik (*blackhole/sinkhole*), *hello-flood*, *wormhole* saldırıları şeklindedir.

Bu çalışmada ağ bütünlüğüne olan saldırılara karşı ağı korumaya yönelik çok yollu koşullu kopyalama stratejisine sahip bir rotalama tekniği kullanılmıştır. *Çok yollu* rotalama daha önce de açıklandığı gibi kaynak düğümün ürettiği veriyi tek parça halinde tek bir rota üzerinden değil parçalara ayırıp birden fazla rota ile BS'ye iletmesidir (Kuo ve Zuo, 2003). Çok yollu rotalama, ağ dışından toplu halde gelen kötü niyetli (*malicious*) saldırıların etkisini minimum seviyeye indirmede oldukça

etkilidir. Çünkü veriler parçalara ayrılarak iletildiğinden, ağı hedef alan bir saldırı hedeflediği verinin tamamına sahip olmak için daha fazla düğümü ele geçirmek durumundadır (Damaso ve diğ., 2014). *Çok yollu* rotalama kriptolama gerektirmediğinden ve potansiyel izinsiz girişleri azalttığından oldukça basit ve etkili bir rotalama tekniğidir (Kuo ve Zuo, 2003); fakat yine de güvenli ve güvenilir ağlar oluşturmak için tek başına yeterli değildir. Bu sebeple, bu çalışmada çok yollu rotalama tekniği çok kopyalı strateji ile kuvvetlendirilmiştir.

*Çok kopyalı* rotalama stratejilerinde kaynak düğümler ürettikleri veriyi *BS*'ye bir defadan fazla kere göndermektedirler. Orijinal veri ve kopya verilerin kaynak düğümden çıkıp *BS*'ye iletildikleri rotalar çoğunlukla ortak bir düğüme sahip olmayan düğüm-ayrık yollardır. Stavrou ve Pitsillides (2010)'da, çok kopyalı rotalamanın olduğu durumlarda ağ güvenliği konusu ele alınmıştır. Kritik *KAA* uygulamalarında ağ güvenliği için gerekli en önemli özellikler uygunluk (*availability*), güvenilirlik (*reliability*), dayanıklılık (*resiliency*) ve kendi kendini iyileştirebilme (*self-healing*) olarak belirtilir. *Uygunluk*, bilgi veya servisin ihtiyaç duyulduğunda ulaşılabilir olmasıdır. Yani bazı tehditlere rağmen tüm verinin varış noktasına ulaşmasını garanti eden güvenilir bir ağ hizmeti sağlanması demektir. *Uygunluk* özelliği, *dayanıklılık* ve *kendi kendini iyileştirme* özelliği ile de ilişkilidir. *Dayanıklılık*, ağı saldırılara karşı tolerans göstermesi ve servis vermeye devam etmesidir. *Ağın kendi kendini iyileştirme* özelliği ağı güvenlik problemlerinden kurtarır ve hatta gelecekte ağ içerisindeki iletişimi tehlikeye atabilecek tehdit unsurlarını ağdan izole edebilir. Veri kopyalamanın yapılmadığı durumlarda ağ, *uygunluk*, *güvenilirlik* ve *dayanıklılık* özelliklerini hedef alan saldırılara karşı oldukça hassas ve dayanıksızdır. Düşman sadece bir veya birkaç düğümü ele geçirerek iletişim ağının bütünlüğünü bozabilir. Veri paketleri tek bir yol üzerinden gönderildiğinden veriler varış noktasına eksik veya değiştirilmiş olarak ulaşabilir ve kritik kararlar verilirken yanlış bilgi kullanılabilir. Böyle durumlarda hatalı veya eksik veriyi düzeltmek için hangi düğümden arıza veya yanlışlık olduğunu tespit edip veriyi tekrar göndermek için yeni rota bulmak gerekmektedir. Bu işlem ise hem fazla zaman alabilmektedir hem de risklidir. Verilerin birden fazla rota üzerinden gönderilmesi ağ güvenliğine karşı yapılan saldırıların etkisini azaltabilmektedir.

Veriyi birkaç rota üzerinden fazladan göndermek ağdaki bazı rotalar zarar görse bile verinin varış noktasına ulaşma ihtimalini arttırmaktadır. Bu durumda çoklu rotalama ağ güvenilirliğini desteklemiş olmaktadır. Ayrıca çok kopyalı rotalama ile veriler ağ bütünlüğü bozulsa bile varış noktasına ulaşabilmekte, ağ kesinti olmadan hizmet vermeye devam edebilmekte ve karar verme mekanizması ulaşan bilgi sayesinde devam edebilmektedir. Böylelikle ağın *uygunluk* ve *dayanıklılık* özellikleri de desteklenmiş olur. Bu durum ayrıca dışarıdan kötü niyetli isteklerde bulunup enerji tüketimine sebep olan *DoS* saldırılarına karşı bir savunma sistemi olarak da kabul edilebilir. Dolayısıyla çok kopyalı rotalama, ağın *sürdürülebilirlik* özelliğini de destekler ve ağ ömrünün uzamasına yardımcı olur.

*KAA*'larda, özellikle veri iletim menzili yani haberleşme mesafesinin kısıtlı olduğu durumlarda verilerin iletildiği rotalar kökü *BS* olan bir ağaç yapısındadır (Djukic ve Valaee, 2004).

Tek *BS*'ye sahip ağlarda ağacın üst seviyesinde ağdaki düğüm sayısına kıyasla daha az düğüm bulunmaktadır. Bu sebeple tüketilen enerjinin büyük bir kısmı *BS*'ye yakın düğümlere aittir. Böylece, *BS*'ye yakın olan düğümlerin bataryaları diğerlerinden daha çabuk tükenmektedir ve bu düğümler aynı zamanda birer darboğazdır. Bu çalışmada çok yollu rotalama stratejisine ilaveten ağın büyük bir kısmını kaplayan düğümler arasında adalet olgusunu oluşturan bir dengeleyici faktör bulunmaktadır. Kastedilen *adalet* kavramına göre, bir sensörün diğer sensörlere ait olup *BS*'ye iletilmesi için üzerinden transfer edebileceği azami veri miktarı ağ ömrü boyunca kendi sezdiği veri miktarının belli bir oranı kadardır. *Adalet* kısıtı sayesinde ağdaki veri trafiği ve dolayısıyla da sensörlerin enerji tüketimleri dengelenmiş olmaktadır.

Literatürde sensör özelliklerine dair farklı varsayımlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları: sensörlerin veri iletim menzillerinin ayarlanabilir olması, ağdaki *BS*'nin hareketli veya sabit olması, ağda bir veya birden fazla sayıda *BS* bulunması, sensörlerin başlangıç enerjilerinin homojen veya heterojen olması, sensörlerin birim zamanda veri üretim oranlarının birbirinden farklı olması, ağda veri trafiğinin yoğun olduğu bölgelere gerektiğinde devreye girecek yedek düğüm yerleştirme gibi durumlardır (Cheng ve diğ., 2008). Bu çalışmada pek çok sensör ve bir tane statik *BS*'nin bulunduğu, sensörlerin birim veri alırken ve iletirken harcadıkları enerji

miktarlarının, batarya enerjilerinin ve ağdaki konumlarının bilindiği bir KAA ele alınmaktadır.

Bu tez çalışmasında ilk olarak Şendil ve Altın-Kayhan (2015)'te önerilen kısmi kopyalama stratejisi birden fazla merkezi düğüm seçilmesine izin verilecek şekilde geliştirilmiştir. Bahsedilen *kısmi kopyalama* stratejisinde ağdaki bazı düğümler, bahsedilen veri transferi oranından daha fazla veri iletebilmektedirler. Bu düğümler *merkezi düğüm* olarak adlandırılmaktadır. *Merkezi düğümlere* diğer düğümlerden gelen asgari veri miktarı kendi sezdikleri veri miktarının belli bir oranı kadar olmalıdır. Yani ağdaki merkezi olmayan düğümler üzerinde başka düğümlerin verisini transfer ederken bir üst sınır; merkezi düğümler içinse bir alt sınır kısıtlaması vardır. Ağdaki bir sensörün merkezi düğüm olarak atanması eğer ağ ömründe iyileşme sağlanacaksa gerçekleşmektedir. Merkezi düğümler, dışarıdan gelen saldırılara karşı cazip olmaları ve diğer düğümlere göre daha fazla veri yüküne sahip olmalarından dolayı ağdaki iletişim için kritiktirler. Merkezi düğümler ağ bütünlüğü açısından hayati önem taşıdıklarından onlar aracılığıyla transfer edilen verileri korumak için bazı ek güvenlik önlemleri alınmalıdır.

BS'ye veri gönderirken çok kopyalı bir rotalama stratejisi ağ güvenliğini ve güvenilirliğini arttırmaktadır. Diğer yandan enerji verimli rotalama ile ağ ömrünün uzatılmaya çalışıldığı bir ağda her sensörün fazladan kopyalama yapmasını istemek önemli bir çelişkidir. Bu durumda enerji kullanımı ve ağ güvenliği arasındaki dengeyi sağlamak için farklı bir kopyalama stratejisi önerilmelidir. Bu sebeple bütün verilerin yerine sadece ağ bütünlüğü için kritik olan merkezi düğümlerin üzerinden geçen verilerin kopyalanarak gönderildiği *koşullu çoklu kopya* stratejisi sunulmuştur. Bu stratejiye göre ağdaki bir kaynak düğüm kendi sezdiği veriyi BS'ye gönderirken bir merkezi düğüm kullanıyorsa, bu veri kaynak düğümde bir kez daha kopyalanarak orijinal verinin rotasıyla düğüm-ayrık yollar üzerinden ayrıca BS'ye gönderilir. Bu çalışmayı kısmi kopyalamanın kullanıldığı Şendil ve Altın-Kayhan (2015)'ten ayıran en önemli özelliği birden fazla merkezi düğümün açılmasına izin verilmesidir. Yani *çoklu merkezi düğüm* varlığında çalışılmaktadır.

Kopyalama stratejisinin koşullu olması sayesinde sadece kritik düğümler üzerinden transfer edilen veriler kopyalandığından, her kaynağın verisinin kopyalandığı çoklu

kopyalama stratejisine göre üretilen toplam kopya veri miktarı önemli ölçüde azaltılmış olur. Dolayısıyla düğüm-ayrık yollar üzerinden kopyalama sayesinde veri güvenliği; kopyalamanın koşullu olması sayesinde de ağ güvenilirliği iyileştirilmektedir.

Bu çalışmada ağ güvenilirliği ve güvenliği göz önünde bulundurularak ağ ömrünü en çoklamaya yönelik çoklu merkezi düğüm varlığında koşullu kopyalamanın olduğu yeni bir çok yollu rotalama stratejisi sunulmuştur. Bahsedilen rotalama stratejisi varlığında ağ ömrü en büyüklemesi matematiksel programlama kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farkı, ağ ömrü en iyilemesinin ağ güvenliği göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmesidir. Önerilen matematiksel model, kaynak düğümlerin ağ ömrü boyunca verilerini en fazla bir tane merkezi düğüm üzerinden iletebileceğini belirten kısıtla sınırlandırılarak *alternatif* bir strateji sunulmuştur. Alternatif strateji ilk modelden daha sıkı güvenlik koşullarına sahiptir. Matematiksel modellerin çözüm süresini kısaltmak için iki farklı geçerli eşitsizlik sunulmuştur. Sonrasında ise temel modelin ağ ömrü ve güvenilirliği farklı kopyalama stratejileri ile kıyaslanarak stratejinin etkililiği tartışılmıştır. Ayrıca geçerli eşitsizliklerin temel ve alternatif modelin çözüm süreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son olarak matematiksel modelin optimal çözüm bulamadığı daha büyük ağlar için çok aşamalı bir algoritma sunulmuş ve uygulanan testler üzerinden algoritmanın etkinliği değerlendirilmiştir.

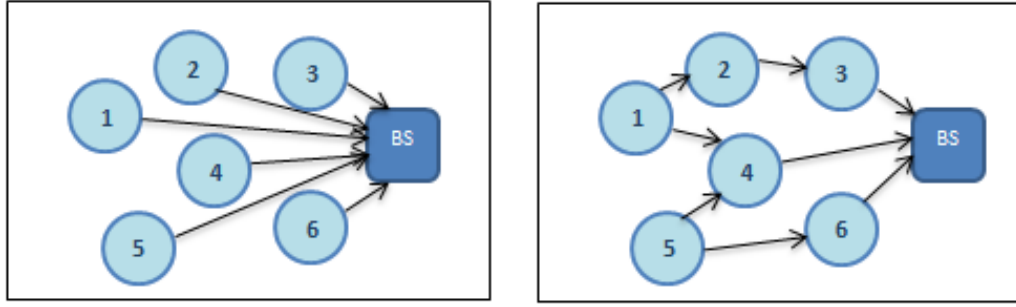


## 2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

Elektronik uygulamalarda algılama işlemini gerçekleştiren sistemlere *sensör* denmektedir. Mikro-elektro-mekanik sistemler (*MEMS*) teknolojisindeki ilerlemeler, düşük maliyette, kısıtlı batarya enerjisine sahip, küçük boyutta, fonksiyonel ve kısa mesafelerde birbirine fiziksel olarak bağlı olmadan birbiriyle iletişim kuran sensör düğümlerinin gelişimine olanak tanımıştır. Bu küçük boyuttaki sensörler kendi etrafını sezme, veri işleme ve iletişim birimlerinden oluşmaktadır. Çok sayıdaki sensörün bir arada bulunup işbirliği içinde iletişim sağlamasıyla sensör ağları oluşmaktadır. Başka bir deyişle Kablosuz Algılayıcı Ağlar (*KAA*), sıcaklık, nem, ses, basınç vb. fiziksel veya çevresel faktörleri gözlemlemeyerek veri üreten ve birbiri üzerinden verileri özel bir bölge veya noktaya ileten, belirli bir alana dağıtılmış bağımsız sensörlerden oluşan bilgi iletim sistemleridir (Dargie ve Poellabauer, 2010).

Sensör düğümleri birer işlemciye sahiptirler. Bu sayede *BS*'ye kendi çevrelerini sezerek ürettikleri ham veriyi değil basit hesaplamalar yaparak elde ettikleri kısmen işlenmiş verinin gerekli olan kısmını iletmektedirler.

Sensör ağları genellikle yoğun istiflenmiş; yani birbirine yakın olan çok sayıda sensörden oluşmaktadır. Bu sebeple komşu sensörler arasındaki ortalama mesafe oldukça kısadır. Böylece, ağın geneli düşünüldüğünde çok sekmeli; yani düğümlerin sezdikleri veriyi doğrudan *BS*'ye gönderdiği değil birbiri üzerinden *BS*'ye iletim yaptıkları iletişim şekli enerji yönetimi açısından çoğunlukla daha etkindir. Dolayısıyla çoğu rotalama protokolünde sensörler ürettikleri verileri birbirleri üzerinden yani işbirliğiyle *BS*'ye iletirler (Akyıldız ve diğ., 2002). Şekil 2.1'de *KAA*'da tek sekmeli ve çok sekmeli iletişim gösterilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 2.1 : KAA’da (a) tek sekmeli, (b) çok sekmeli veri iletimi.

Şekil 2.1.a’da tek sekmeli iletişim yapısında her sensör kendi verisini doğrudan *BS*’ye iletmektedir; b’deki çok sekmeli iletişim yapısında ise 1, 2 ve 5 numaralı sensörler verilerini 2, 3, 4 ve 6 numaralı sensörler aracılığıyla *BS*’ye iletmektedir. Tek sekmeli iletimde en önce *BS*’ye en uzakta olan sensörün enerjisi tükenecektir ve diğer sensörlerin hepsinde kullanılmadan kalmış enerji bulunacaktır. Fakat çok sekmeli durumda her sensör verisini çoğunlukla kendisine *BS*’den daha yakın sensörlere ilettiği için veriler çoğunlukla *BS*’ye doğrudan bağlı olan yakın sensörler üzerinden gönderilecektir. Dolayısıyla ağ ömrü açısından *BS*’ye yakın sensörler belirleyici olacaktır.

Sensör ağları kullanım alanlarına bağlı olarak sismik, manyetik, termal, görsel, kızılötesi, akustik ve radar gibi çok farklı tipte sensörlerden oluşabilmektedir. Sensörler sıcaklık, nem, araç hareketi, basınç, aydınlatma durumu, ses seviyesi, üzerine ilişitirildikleri objelerin mekanik stres seviyeleri ve objelerin hız, yön ve büyüklük gibi anlık özelliklerini görüntüleme yeteneğine sahiptir (Estrin ve diğ., 1999).

## 2.1 KAA’ların Uygulama Alanları

*KAA*’lar askeri uygulamalardan tıbbi hizmetlere kadar yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Aşağıda *KAA*’ların uygulama alanları ve bunlara dair bazı örnekler mevcuttur:

- Askeri Uygulamalar: Düşman keşfi, dost kuvvetlerle haberleşme, mühimmat ve sığınak tespiti, hedefleme, istihbarat ve gözetim;

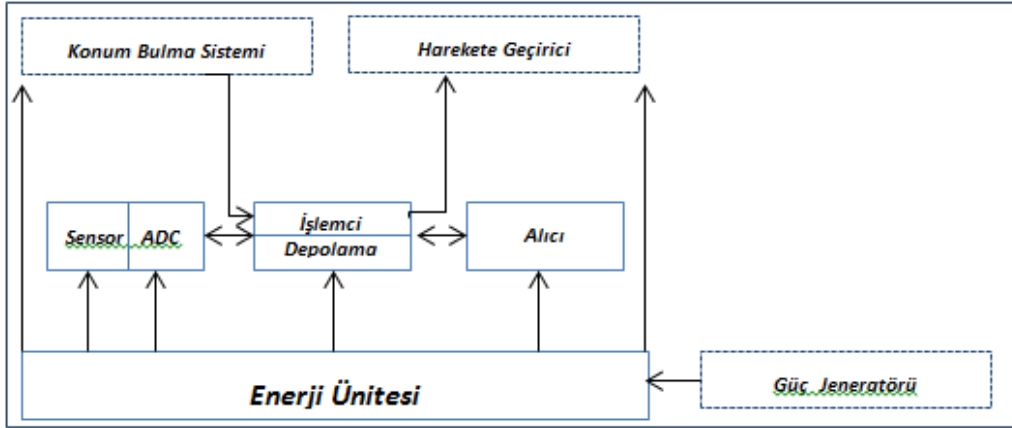
- Çevre Algılaması ve İzleme: Tarımda ekinlerin nem, sıcaklık, ışık gibi çevresel faktörlerinin takibinin yapılması, nesi tükenmekte olan hayvanların yeryüzündeki dağılımının tespiti, yanardağ hareketlerinin izlenmesi, güneş radyasyonu haritalama, hava durumu izleme;
- Felaketten Korunma ve Kurtarma: Orman yangınlarına sıcaklık sensörleri sayesinde erken müdahale, sismik algılayıcılarla depremin yönü ve büyüklüğünün tespiti, sel alarmı;
- Sağlık Uygulamaları: Hastaların izlenmesi, ilaç ve personel takibi ve yönetimi, uzaktan hastalık teşhisi ve takibi, engelli bireyler için geliştirilmiş yapay organ uygulamaları;
- Akıllı Ev Uygulamaları: Isıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri, duman algılayıcı sistemler, güneş ışınlarına duyarlı aydınlatma kontrolü, kapı ve pencerelerin açılmasına duyarlı ses ve titreşim sensörlerinden meydana gelen güvenlik sistemleri;
- Bilimsel Araştırmalar: Özellikle uzay ve okyanusun derinlikleri gibi fiziksel erişimi zor alanlar için gerçekleştirilen bilimsel çalışmalarda etkin kullanım;
- Envanter kontrolü: Envanter giriş-çıkışı takibi, stok kontrolü, güvenlik stoğu kontrolü ve otomatik sipariş uygulamaları (Agre ve Clare, 2000).

## 2.2 Sensörlerin Yapısı

Tipik bir sensör düğümü temel olarak dört basit bileşenden oluşmaktadır: çevreyi algılayan bir sezme ünitesi, sezilen ham verilerin kısmi işlenmiş yapıya dönüşmesini sağlayan bir işleme ünitesi, diğer sensörlerden ürettikleri verileri almaya yarayan bir alıcı ünitesi ve bataryanın muhafaza edildiği bir enerji ünitesi. Sensörler ayrıca uygulamaya göre farklılık gösteren konum tespiti sistemleri, jeneratör sistemleri ve harekete geçirici yapılar gibi bazı ek bileşenler de barındırabilirler (Akyıldız ve diğ., 2002).

Sezme birimleri genellikle iki alt bileşenden meydana gelmektedir: algılayıcı ve analog-dijital çevirici (ADC). ADC sayesinde ilgili objeyi görüntüleyerek elde edilen analog sinyaller dijital sinyallere dönüştürülür. Daha sonra bu sinyaller işleme

ünitesine aktarılır. Genellikle küçük bir depolama ünitesine bağlı olan işleme ünitesi sensörlerin birbirleriyle işbirliği içinde çalışmalarını sağlamaktadır. Bununla beraber alıcı ünitesi de düğümü ağa bağlamaktadır. Sensörlerin en önemli bileşenlerinden biri enerji ünitesidir. Enerji ünitesi güneş pili gibi birimler de barındırabilir. Pek çok sensör ağı rotalama teknikleri ve sezme görevleri konum bilgisi gerektirmektedir. Bu sebeple her sensör bir konum bulma sistemi de içermektedir. Ayrıca uygulamaya bağlı olarak sensörlerin içinde başka alt üniteler de bulunabilmektedir. Bahsedilen tüm bu alt üniteler kibrit kutusu büyüklüğünde bir kapsülün içine sığmak durumundadır. Gerekli boyut bazen havada asılı kalmayı sağlayacak kadar hafif olabilmek için bir santimetrekareden daha küçük olmak zorundadır. Küçük boyuta ek olarak sensörlerin düşük enerji tüketme, yüksek volümetrik yoğunluklarda çalışabilme, düşük maliyetli olma, bağımsız olma ve çevreye uyumlu olma gibi özellikleri de sağlamaları gerekmektedir (Akyıldız ve diğ., 2002). Şekil 2.2’de tipik bir sensör cihazının bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Tipik bir sensör cihazının bileşenleri.

Sensörler çoğunlukla erişilemez olduklarından bir sensör ağının ömrü düğümlerin batarya enerjilerine bağlıdır Enerji, sensörlerin küçük boyutlu olmalarının gerekmesi nedeniyle kıt bir kaynaktır. Bu sebeple enerji tasarrufu sağlamak için uygulamaya bağlı olarak bazı sensörlerin alıcı birimleri etrafı sezer halde yani aktif veya uyku halinde yani pasif modda olabilmektedir.

Sensör ağları, sensörlerin toplu bir şekilde belirli bir alana saçılması veya algılanacak nesnenin ya çok yakınına ya da doğrudan içine elle tek tek yerleştirilmesiyle

oluşturulur. Çoğunlukla uzak coğrafik bölgelerde gözetimsiz bir şekilde çalışmaktadırlar. Sensörler, yoğun kavşaklarda, büyük makinelerin içerisinde, okyanusun dibinde, bir hortumun içinde, biyolojik veya kimyasal olarak kirletilmiş bir bölgede, savaş alanındaki düşman hatlarında, evlerin içinde, depolarda, hayvanlara takılı bir biçimde, hızlı hareket eden araçlara takılı biçimde veya hareket halindeki bir nehrin içinde çalışabilmektedirler.

### **2.3 Veri İletim Ortamı**

Çok sekmeli bir sensör ağında iletişim halinde olan düğümler birbirlerine kablosuz bir ortam ile bağlıdır. Bu bağlantılar radyo frekansı, kızılötesi veya optik bir ortam tarafından oluşturulabilir.

### **2.4 Enerji Tüketimi**

Mobil ağlarda enerji tüketimi önemli bir tasarım faktörüdür; fakat enerji kaynakları kullanıcı tarafından değiştirilebildiğinden birincil öncelik değildir. Temel odak noktası servis kalitesinin sağlanması üzerindedir. Diğer yandan sensörler mikro-elektro-mekanik cihazlar oldukları için kısıtlı enerji kaynağına sahiptir ve bazı uygulamalarda enerji kaynaklarını değiştirmek neredeyse imkansızdır. Bu sebeple bir sensörün ömrü batarya ömrüne yani kısıtlı enerjisini ne derece verimli kullandığına bağlıdır. Dolayısıyla ağ tasarımcıları çoğunlukla enerji farkındalıklı protokollerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmışlardır.

Bir sensör düğümünün temel görevi olayları tespit etmek, veriyi hızlı bir şekilde işlemek ve bu veriyi iletmektir. Buna göre enerji tüketimi üç aşamadan oluşmaktadır: sezme, iletişim ve veri işleme. Bir sensör en fazla enerjiyi veri iletmeye ve almaya yani veri iletişimde harcamaktadır. Veri işleme aşaması iletişime göre daha az enerji gerektirmektedir (Akyıldız ve diğ., 2002).

## 2.5 Protokol Katmanları

KAA'larda kullanılan protokoller gerçekleştirilen işlere göre uygulama katmanı, iletim katmanı, ağ katmanı, veri bağlantı katmanı, ve fiziksel katman şeklinde sınıflandırılabilir.

*Fiziksel katmanda* frekans seçimi, taşıyıcı frekans üretici, sinyal sapması, modülasyon ve veri şifreleme yapılır. Sezme görevine bağlı olarak çeşitli uygulama yazılımları *uygulama katmanında* ise bulunur. *Veri bağlantı katmanındaki* işlemler veri akışı, veri akışını çoğaltma, veri çerçevesi algılama, ortam erişimi ve hata kontrolüdür. *Ağ katmanında* iletim katmanında tedarik edilen verinin rotalanmasını sağlamaktadır. Son olarak *iletim katmanında*, güvenilir veri akışının nasıl sağlanacağını belirler (Akyıldız ve diğ., 2002).

### 3. LİTERATÜR TARAMASI

*KAA* tasarımındaki temel amaçlar, ağın kullanılacağı uygulamaya göre veya ağın düğüm yayılım stratejisine göre farklılaşmaktadır. Bu konuşlandırma stratejilerinden bazıları: sensörlerin veri iletim menzillerinin ayarlanabilir olması; ağdaki *BS*'nin hareketli/sabit olması; ağda tek/çok sayıda *BS* bulunması; sensörlerin başlangıç enerjilerinin homojen/heterojen olması; sensörlerin birim zamanda veri üretim oranlarının birbirlerinden farklı olması; ağda veri trafiğinin yoğun olduğu bölgelere gerektiğinde devreye girecek yedek düğümler yerleştirilmesidir.

*KAA* tasarımında ve veri rotalama kararında ağ ömrü en çoklaması, sensörler arasında enerjinin dengeli kullanımı, *BS*'ye iletilen toplam verinin en çoklanması, ağ güvenliği ve güvenilirliğinin yüksek olması, ağın belirli bir oranı veya tamamı için kapsama, bağlılık veya *BS*'ye iletilen veri gecikmesini en azlama gibi kavramlar önemli rol oynamaktadır.

Literatürde incelenen pek çok *KAA* çalışmasında ağ ömrünün en çoklanması üzerinde çalışıldığı görülmüştür. Ağ ömrünün tanımı, bazı durumlarda ağın kurulumundan başlayıp belirli büyüklükteki hedef bölgedeki veriler sezilemeye kadar geçen süre olarak tanımlanırken bazılarında ise ağdaki bir veya belirli sayıdaki sensörün bataryasının tükenmesine kadar olan süre olarak ifade edilmiştir (Alfieri ve diğ., 2006). Ağ ömrünü belirleyen faktör *KAA*'nın kullanıldığı uygulamaya göre farklılık gösterebilir. Bu çalışmada ağ ömrünü ağdaki enerjisi en erken tükenen sensörün ömrü belirlemektedir. Yani ağ ömrü, ağın kurulumundan başlayıp ağdaki bir sensörün batarya enerjisi tükenene kadar geçen süredir. Dolayısıyla sensörlerin verileri sezme, işleme, iletme ve alma süreleri de kısıtlıdır.

Ağ ömrü iyileştirmesi ile ilgili olarak incelenen bazı çalışmalarda sensörlerin yer ve özelliklerinin bilindiği bir ağda enerji tüketim problemiyle başa çıkmaya yönelik yaklaşımlardan bahsedilmiştir. Gereksiz verileri azaltma, sensörlerin çalışır halde olup olmadığını gösteren açık/kapalı durumlarını çizelgeleme ve enerji verimli rotalama başlıkları altında enerji tasarruf sistemleri sunulmuştur (Rault ve diğ., 2014, Rajagopalan ve Varshney, 2006, Ba ve diğ., 2013, Akkaya ve Younis, 2005, Al-Karaki ve Kamal, 2004, Abbasi ve Younis, 2007).

KAA'larda ağ ömrünü en çoklamak için geliştirilen rotalama protokollerinin hemen hemen tamamı enerji verimliliğini sağlamaya yöneliktir (Krishnamachari ve Ordonez, 2003). Rault ve diğ. (2014)'e göre enerji verimli rotalama teknikleri kümelenme yapısı, kullanılan rotalama metriği, tek/çok yönlü rotalama tercihi, yedek düğüm olup olmaması ve *BS*'nin hareketli/statik olmasına göre beş kategoriye ayrılmaktadır. Bu çalışmada herhangi bir kümelenme yapısının olmadığı, enerji metriği dikkate alınarak belirlenen çoklu yollar üzerinden statik bir *BS*'ye verilerin iletildiği ve olası aksaklıklara karşı yedek düğüm yerleştirme yerine kısmi kopyalamanın yapıldığı bir tasarım önerilmektedir. Bazı çalışmalarda sensörlerin kısıtlı kaynakları göz önünde bulundurularak sadece ağ ömrü maksimize edilirken bazılarında birden fazla amacın belirli bir eşliğin üstünde sağlanmasına hizmet eden kısıtlar da bulunmaktadır.

Cheng ve diğ. (2008)'de ağ ömrü en çoklaması ele alınmıştır. Çalışmada küçük modifikasyonlarla farklı ağ tasarım stratejileri için kullanılabilir jenerik bir doğrusal programlama modeli sunulmuştur. Bahsedilen modelde, tasarım özellikleri bilinen bir ağın ömrü en çoklanırken sensörler arasında enerji tüketim dengesi de sağlanmaya çalışılmıştır. Model kullanılarak tek statik *BS*, mobil *BS*, çoklu statik *BS*, sensörler arasında homojen olmayan enerji dağılımı, ağa yedek düğüm yerleştirme ve kaynak sensörlerin veri üretim miktarının heterojen olması gibi durumlardan oluşan farklı ağ tasarım stratejilerinin ağ ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ağ tasarım stratejilerini kurulum maliyeti açısından kıyaslamak için bir de maliyet modeli sunulmuştur. Maliyet fonksiyonu ağdaki toplam düğüm maliyeti ve kompleks ağlar için ek yapıların maliyetinden oluşmaktadır. Belli bir ağ ömrüne erişmek için her bir tasarımda gerekli düğüm sayısı hesaplanarak stratejiler mali açıdan da kıyaslanmıştır. Test sonuçlarına göre, mobil *BS*'nin varlığı ağ ömründe kısıtlı iyileştirme sunarken çoklu *BS*'nin varlığında ağ ömrü ağdaki *BS* sayısı çoğaldıkça uzamaktadır. Düğümler arasında homojen olmayan enerji ataması hem enerji etkililiği hem de enerji dengesini sağlarken uygulama açısından zor ve maliyetlidir.

Ok ve diğ. (2009)'da ideal bir rotalamada sadece enerjinin etkili kullanımının değil; aynı zamanda ağ ömrü tükendiğinde her bir sensörde kalan enerji miktarının da göz önünde bulundurulması gerektiği savunulmuştur. Dolayısıyla sensörlerin enerji



kullanımlarının dengeli olmasını da dikkate alan DEBR (*Distributed Energy Balanced Routing*) rotalama yöntemini geliştirmişlerdir. DEBR’de yapılandırılmış bir ağda, her bir periyotta sensörlerin kalan enerjilerinin en azının en çoklanması hedeflenmektedir. Temelinde verilerin iletilmesi için gerekli olan enerji ile kalan enerji arasında denge gözetilmektedir. Öncelikle sensörlerin EC (energy cost) değerleri, yani enerji maliyetleri hesaplanmaktadır. EC değerleri, bir sensörden diğer bir sensöre veri gönderilmesi için gereken toplam enerji miktarının veriyi gönderecek sensörün sahip olduğu enerji miktarına oranıdır. Her sensör verisini en düşük EC değerine sahip komşusuna göndermektedir. Geliştirilen yöntem tamsayı programlama ile modellenmiş ve her bir periyot için çözülmüştür. Sonuç olarak algoritmanın performansının komşuluk mesafesine çok bağlı olduğu ve bazen en enerji etkin rotanın kullanımına izin vermediği görülmüştür. Algoritma, tüm ağda enerji dengesi sağladığından ağın herhangi bir bölümüne aşırı veri yüklenmesine izin vermemektedir. Bu durumun ağ güvenliği ve güvenilirliğini olumlu yönde etkileyebileceği sonucuna varılmıştır.

Askeri uygulamalar, felaketten korunma ve kurtarma uygulamaları ile sağlık hizmetleri uygulamaları gibi doğru bilgiye erişimin kritik olduğu iletişim ağlarında güvenlik konusu hayati önem taşımaktadır. Nasser ve Chen (2007)’de, ağ güvenliğini göz önünde bulundurarak ağ ömrünün en çoklanmasını amaçlayan SEEM (*Secure and Energy-Efficient Multipath*) rotalama protokolü geliştirilmiştir. Bu protokolda verinin kaynağından çıkıp hangi rota üzerinden BS’ye iletileceğine verilerin kaynakları değil BS karar vermektedir. Kısaca açıklamak gerekirse; BS, ilk olarak her düğümden kendisine ulaşabilen alternatif rotalar belirlemektedir. Veri iletimi sırasında, BS periyodik olarak ağdaki sensörlerin kalan enerjilerini kontrol etmekte ve her periyotta kaynak düğümlerden ona veri iletilirken farklı bir rota kullanmasını sağlamaktadır. Bir kaynak için bir periyotta kullanılmayan alternatif rotalar herhangi bir saldırı olasılığına karşılık yedekte tutulmaktadır. BS her periyotta, alternatif rotaların kalan enerji değerlerine göre veri iletim rotalarını seçmektedir. SEEM algoritması sensörlerin özdeş olduğu ve tek BS’nin bulunduğu ağlarda bir dinamik simülasyon programı kullanılarak test edilmiş ve performansı doğrudan difüzyon metoduyla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak hem sezilen veri miktarı

hem de ağ ömrü *SEEM* protokolünde daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca rotalama kararını *BS* verdiği için *SEEM*'in doğrudan difüzyondan daha korumacı bir rotalama protokolü olduğu belirtilebilir.

Kaynak düğümden çıkan verinin tek bir yol üzerinden değil de parçalanarak farklı rotalar üzerinden *BS*'ye iletilmesi, ağ güvenliği ve güvenilirliğini desteklemek için geliştirilmiş rotalama stratejilerinden birisidir. Nitekim, İncebacak ve diğ. (2015) bazı güvenlik önlemleri altında çok yollu rotalama stratejisini kullanarak veri iletimi için gerekli en düşük enerji miktarını bulmayı amaçlamıştır. Ele alınan problemdeki enerji tüketimi veri alma ve transfer etme esnasında olmaktadır. Sensörlerin homojen yapıda ve zamanın periyotlar halinde olduğu problem, lineer programlama (LP) metoduyla çözülmüştür. Bahsedilen koşullar doğrultusunda oluşturulan LP modeline ağı daha güvenilir kılmak için bazı kısıtlar eklenmiştir. Düğümleri ele geçirmeye yönelik saldırılara (*node capture*) karşı önlem almak için temel LP modeline her bir düğüm üzerinden geçen maksimum akış miktarını limitleyen kısıtlar eklenmiştir. Düğümler arasında gerçekleşen gizlice dinleme (*eavesdropping*) sorununa karşı ise düğümler arasındaki her bir bağlantıdan geçen maksimum veri miktarı kısıtlanmıştır. Böylelikle bir “kulak misafiri” iki düğüm arasındaki bağlantıyı dinlese bile verilerin en fazla limite belirlenen miktarı kadarına ulaşabilir. Yani bağlantı ve/ya düğümler üzerinden geçen veri miktarı kısıtlandığında, dışarıdan gelen bir saldırıda, düşmanların bir düğümden çıkan bir veri paketinin tamamına erişmek için daha fazla düğüm ve bağlantıyı kontrolü altına alması, dolayısıyla daha fazla çaba sarf etmesi gerekmektedir. Sadece düğümler üzerinde; sadece düğümler arasındaki bağlantılar üzerinde ve hem düğümler hem de bağlantılar üzerinde veri limitinin olduğu çok yollu rotalama stratejileri için testler yapılmıştır. Bahsedilen üç rotalama tekniğinin değişik düğüm yoğunluğu, ağ alanı genişliği ve ağ topolojisi tipleri için enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre güvenlik derecesi yükseldikçe tüketilen enerji miktarı da artmaktadır.

Karlof ve diğ. (2003)'te kablosuz sensör ağlarının arızalara karşı gürbüz ve kötü niyetli saldırılara karşı güvenli olması gereğinden yola çıkılarak çok yollu rotalama ve çoklu kopya gönderiminin kullanıldığı; amacın veri kaybını azaltmak ve güvenliği arttırmak olduğu *ARRIVE* adında bir olasılıksal algoritma geliştirilmiştir. *ARRIVE*,

iki muhtemel sebepten doğan paket kayıplarına karşı veri iletim rotalarında güvenilirlik ve direnç sağlar. Bunlar izole edilmiş bağlantı hatası ve kötü niyetli veya yanlış davranan (*malicious/misbehaving*) düğümlerdir. Problemin varsayımına göre birbirine ancak belli bir eşik mesafesinden daha kısa uzaklıkta bulunan düğümler veri alışverişinde bulunabilir. Ayrıca düğümler arasında *BS* en üst seviye olan 0. seviyede kabul edilip, onunla doğrudan iletişim kurabilen düğümler 1. seviyede; 1. seviyeyle iletişim kurabilenler ise 2. seviyede olacak şekilde derinleşmeye devam eden bir derecelendirme söz konusudur. Algoritmada her sensör kendisiyle aynı seviyede olan komşu sensörlerin ve kendisinden bir üst seviyede olan ebeveyn sensörlerin veri alışveriş geçmişiyle sahiptir. Herhangi bir sensör veri ürettiğinde veya başka bir sensörden veri aldığı zaman bu veriyi komşu düğüme mi yoksa ebeveyn düğüme mi iletileceğine komşu ve ebeveynlerinin veri alışveriş geçmişi ve seviyesini içeren olasılık fonksiyonuna göre karar vermektedir. Böylece *ARRIVE* algoritmasında rotalar sadece yerel bilgi kullanılarak belirlenir. Kaynak düğümlerin aynı veriden kaç kopya üreteceği algoritmanın bir parametresidir. Yani çoklu kopya durumu bir düğümün kendi verisini algoritmada istenildiği kadar düğüm ayrık yollar üzerinden *BS*'ye göndermesidir. Ayrıca *ARRIVE*, pasif katılım ile içsel yayın ortamının avantajına sahiptir. Yani eğer bir *A* düğümü *B* düğümünün *C* düğümüne veri paketi gönderdiğini gözlemlemiş ama *C* düğümünün bunu başka bir düğüme ilettiğini gözlemlememiş ise *A* düğümü bu paketi gönderme sorumluluğunu üstlenmektedir. Bu teknik, kötü niyetli düğümlere karşı bir savunma niteliğindedir. Geliştirilen yöntem simülasyon metodu kullanılarak farklı sayıda kopya verinin üretildiği durumlar için test edilmiştir. Sonuç olarak kopya veri sayısı arttıkça ağ güvenilirliği ve tüketilen enerji miktarı ortalama iki kat artmaktadır. Yani çoklu veri gönderildiğinden veri kaybı azalmıştır; ancak fazladan veri gönderimi sebebiyle enerji tüketimi olumsuz yönde etkilenmiştir. Çalışmada ağ ömrü ile ilgili bir değerlendirme yapılmamıştır.

Tek *BS*'ye sahip *KAA*'larda ağın *BS*'ye yakın olan kısmında ağın geriye kalan kısmına kıyasla daha az düğüm bulunmaktadır. Bu sebeple veri iletimi sırasında tüketilen enerjinin büyük bir kısmı *BS*'ye yakın düğümlere aittir. Dolayısıyla *BS*'ye yakın olan düğümlerin bataryaları diğerlerinden daha çabuk tükenmektedir ve *BS*'ye

yakın olan bir düğüm veri iletiminde bir darboğaz haline gelebilmektedir. Tam bağlı olmayan yani ağdaki her düğüm çifti arasında iletişim bağlantısı bulunmayan ve tek *BS*'li bir ağda rotalama yaparken iletimin son ayağının tasarımı aşamasında pek fazla alternatif bulunmamaktadır. Bu darboğazın üstesinden gelebilmek için Djukic ve Valaee (2004)'te, *BS*'ye veri iletiminin sadece *BS*'ye yakın olan düğümler üzerinden değil *BS*'ye bağlı ve ağ boyunca yayılmış bazı birimler aracılığıyla da sağlanabildiği bir ağ yapısı önerilmektedir. Bu yapıyı kısaca açıklamak gerekirse: *BS*, ona güvenilir ve yüksek veri iletim menziline sahip bağlantılarla bağlı olan “*prong*” adı verilen ve ağa yayılmış halde bulunan birkaç tane vekil alıcı kullanmaktadır. Bu alıcı düğümlere vekil denmesinin sebebi ise düğümlerin ağ içinde üretilen verileri *BS* yerine bu alıcı düğümlere iletmesidir. Kaynak düğümler bir vekil alıcıya doğrudan veya birkaç düğüm aracılığıyla bağlıdır ve bir kaynak düğümden çıkan verinin ağdaki son varış noktası vekil alıcılardır. Vekil alıcılara ulaşan veriler olduğu gibi *BS*'ye iletilmektedir. Böylece veri iletiminin son tabakasındaki trafik yükü daha büyük düğüm kümelerine yayılmaktadır. Çoklu vekil alıcının olması sayesinde düğümlerden *BS*'ye daha fazla yol alternatifi bulunmaktadır. Çalışmada sunulan rotalama stratejisine göre kaynak düğümler veri paketlerini parçalayarak çok sayıda düğüm ayrık yol üzerinden göndermektedir. Böylece hata toleransı arttırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca güvenilirliği daha yüksek seviyeye getirmek için Forward Error Correction (*FEC*) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre; sensörler veri paketlerini fragmanlara; yani parçalara ayırır ve bu fragmanları şifreler. Sonra şifreli fragmanlar düğüm ayrık rotalar üzerinden *BS*'ye gönderilir. *BS*, kendisine ulaşan veri fragmanlarını tekrar birleştirerek orijinal veri paketini oluşturur. Bu metotta veri kaybı olsa dahi *BS*'de verilerin tamamı tekrar oluşturulmaktadır. Tüm bunlara ilaveten, veri paketlerinin her bir rota üzerinden başarılı bir şekilde iletilme olasılığını gösteren bir olasılık fonksiyonu oluşturulmuştur. Enerji tüketimini en azlarken bu olasılık fonksiyonu sayesinde bir rota üzerinden iletilecek verinin *BS*'ye ulaşma olasılığı için bir alt sınır belirlenmiştir. Güvenilirlik kısıtı ile veri paketinin *BS*'de tekrar oluşturulma olasılığının en az verilen bir  $\epsilon$  değeri kadar olması sağlanmaktadır. Ayrıca her rota üzerinden iletilebilecek toplam ve maksimum fragman sayısı da sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada fragmanlar rotalara dağıtılarak enerji tüketimi minimize edilmiştir. Aynı anda güvenilirliği sağlarken enerji

kullanımını minimize eden ve doğrusal programlama içeren bir algoritma sunmuşlardır.

Kaynak düğümlerden *BS*'ye güvenli ve güvenilir veri iletimi için *FEC* metodunun kullanıldığı başka bir çalışma da Ma ve diğ. (2007)'dir. Güvenli ve güvenilir veri iletimini sağlamayı amaç edinen bu çalışmada *MVMP* (Multi-version multipath) adı verilen bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde veri segmentasyonu, *FEC* kodlama algoritması, çok yollu rotalama ve kriptografi kullanılmıştır. Çalışmadaki algoritmanın Djukic ve Valae (2004)'tekinden farkı; veri paketlerinin gruplandırıldıktan sonra her bir paketin birbirinden farklı kriptografi algoritmalarıyla ile şifrelenmesidir. Şifrelenmiş veriler *FEC* kullanılarak parçalara ayrılıp kodlanarak çoklu yollar üzerinden gönderilmektedir. Geliştirilen algoritma var olan benzer bir güvenlik mekanizmasıyla (*Shamir's (T,N)-threshold secret sharing scheme*) kıyaslanmış ve gereksiz veri fazlalığı, güvenlik ve güvenilirlik (*redundancy, security ve reliability*) açılarından daha verimli olduğu görülmüştür.

Ağ ömrünü iyileştirmenin bir başka yolu ağdaki gereksiz verileri indirgeyerek *BS*'ye iletmektir. Kalpakis ve diğ. (2002)'de ağdaki bazı düğümlerin veri birleştirme (*data aggregation*) yetisinin olduğu ağ yapısı üzerinde çalışılmıştır. Amaç; ağ ömrünü en çoklamak için verileri sensörlerden toplayıp *BS*'ye ileten etkili bir yol bulmaktır. Bu bir maksimum ağ ömürlü veri toplama (*Maximum Lifetime Data Gathering*) problemidir ve çözmek için veri birleştirmeye izin verilenin yanısıra verilmeyen veri toplama yöntemi de sunmuşlardır. Burada veri birleştirmeden kasıt; farklı sensörlerden veri toplayıp ağda dolaşan fazla iletileri elemektir. Özdeş sensörlerden oluşan, ağ ömrünü ilk enerjisi tükenen sensörün belirlediği bir ağda veri birleştirmenin olmadığı maksimum ağ ömürlü veri rotalama (*MLDR*) ve veri birleştirmeye izin verilen maksimum ağ ömürlü veri birleştirme (*MLDA*) problemleri çözülmüştür. Sonuçlar başka bir veri iletim çizelgeleme metodu olan *LRS* protokolü (*Lindsey, Raghavendra and Sivalingam's protocol*) ile kıyaslanmıştır. Problemi çözmek için geliştirdikleri sezgisel bir algoritmayla *BS*'den doğan ve ağdaki tüm sensörleri saran yönlü ağaçlar kümesi bularak veri akış çizelgesini oluşturmuşlardır. Düğüm sayısı 10-60 arasında değişen ağlar için veri birleştirmeye izin verilen ve verilmeyen durumlarda *MLDR*, *MLDA* ve *LRS* yöntemleri karşılaştırılmıştır. Sonuç

olarak veri birleştirmenin olduğu *MLDA* yönteminin hem *MLDR*'den hem *LRS*'den; veri birleştirmenin olmadığı *MLDR* yönteminin ise *LRS*'den daha uzun ortalama ağ ömrü değerleri verdiği gözlemlenmiştir.

*KAA*'larda ağ ömrünü en çoklamak için hemen hemen tüm rotalama protokolleri enerji verimliliğini sağlamaya yönelik tasarlanmaktadır. Ancak *KAA*'nın gereksinimleri hizmet verdiği uygulamaya göre farklılaşabilmektedir. Örneğin; video ve görüntüleme uygulamalarında, sensörlerin etkili kullanımı ve verilere etkin ulaşımı elde etmek için hem enerjiyi hem de hizmet kalitesini göz önünde bulduran rotalama tekniği gerekmektedir. Akkaya ve Younis (2003)'te enerjiye duyarlı hizmet kalitesi rotalama protokolü sunulmaktadır. Buradaki hizmet kalitesi, iletim aciliyeti olan yani gerçek zamanlı veri trafiğinin belirli bir üst sınırı aşmayacak gecikmeyle *BS*'ye ulaştırılmasıdır. Önerilen protokol, en az maliyetli ve enerji verimli olan aynı zamanda kaynaktan *BS*'ye belirli bir maksimum gecikmeyi aşmayan bir rotalama sunmaktadır. Rotalamada hem enerji verimliliğini hem de gerçek zamanlı trafiği aynı anda desteklemek için bir kuyruk modeli geliştirilmiştir. Kuyruk modeli gerçek zamanlı olan ve olmayan trafik için hizmet paylaşımı sunmaktadır. Rotalama protokolünde, izin verilen maksimum gecikme kısıtını sağlayan rotalar arasından en az maliyete sahip olanı bulunmaktadır. Ağdaki sensörler enerji ve yetenek bakımından özdeştir. Ağdaki bir  $i$  düğümü başka bir  $j$  düğümüne veri iletirken oluşan bağlantı maliyeti,  $j$  düğümünün kalan enerji miktarı, bir birim veri iletmek için gereken enerji miktarı, bağlantının hata oranı ve diğer iletişim parametrelerine bağlı bir fonksiyon ile belirlenir. Birim veri iletilirken harcanan enerji sensörler arasındaki uzaklığa bağlıdır ve bağlantının hata oranı düğümler arasındaki uzaklığa ve  $j$  düğümünün kalan arabellek boyutuna bağlı bir fonksiyondur. Kaynak düğümden *BS*'ye olan beklenen gecikme süresi, o rota üzerindeki her düğümde kuyrukta bekleme süreleri ve düğümler arasında veri paketi iletilirken geçen yayılım süresinden oluşmaktadır. Bahsedilen kuyrukta bekleme süresi; bir rota üzerinde bulunan düğümlerin gerçek zamanlı olan ve olmayan veri üretim oranları ve verileri işleme süreleri, komşuluklarındaki düğüm sayısı gibi stokastik metrikleri içeren kuyruk modellerinden faydalanarak hesaplanmiştir. Düğümler arasındaki yayılım süresi ise onların birbirine olan uzaklıklarına bağlı olan

bir fonksiyon kullanılarak elde edilmiştir. Belirtilen rotalama protokolü, Dijkstra'nın en kısa yol algoritmasının genişletilmiş bir versiyonunu kullanarak en az maliyetli yolların bir listesini oluşturmakta ve bu listeden gecikme gereksinimini karşılayan bir yol seçmektedir. Test sonuçları servis kalitesi ve enerji metriklerine göre önerilen protokolün etkili bir performans sunduğunu göstermektedir.

Düğümler arasındaki bağlantıyı maliyetlendirerek enerji verimli rotalama stratejisi sunan bir başka çalışma Ye ve diğ. (2001)'dir. Çalışmada, büyük sensör ağlarında en az maliyetli yolları bulmayı amaçlayan bir minimum maliyetli iletim protokolü önerilmektedir. Protokoldeki rotaların maliyeti bir kaynak düğümden *BS*'ye olan veri iletim süresi, tüketilen enerji miktarı veya verinin rota üzerinde ziyaret ettiği düğüm sayısı (*hop*) gibi popüler maliyet kriterlerinden birisi olabilmektedir. Basit ve ölçeklenebilir olan protokolde iki faz bulunmaktadır. Birinci fazda, *BS* tüm ağa bir keşif mesajı (*advertisement message*) yayınlamaya her bir kaynaktan *BS*'ye olan en düşük maliyetli yolların bilgisi elde edilmektedir. Her bir düğüm kendi maliyet bütçesini ona veri gönderen bir önceki düğümün maliyetine aralarındaki bağlantının maliyetini ekleyerek hesaplar. İkinci fazda kaynaklar veri üreterek birbiri üzerinden *BS*'ye iletir. Veri iletim sürecini açıklamak gerekirse; bir kaynak düğüm veri ürettiğinde o kaynaktan *BS*'ye olan en düşük maliyetli yolun maliyet bilgisi veri paketine maliyet bütçesi olarak eklenmektedir. Kaynak düğümün ürettiği veri paketi *BS*'ye kaynaktan daha yakın olan komşularına yayınlanır. Mesaj bir komşu düğüme ulaştığında kaynak düğüm ve mesajın vardığı komşu düğüm arasındaki bağlantının maliyeti veri paketinin bütçesinden düşülmektedir. Daha sonra komşu düğüm veri paketinde kalan bütçe ile kendi bütçesini kıyaslar. Paketin maliyeti onu alan bir düğümün maliyet bütçesinden fazlaysa paket düşer (atılır); değilse *BS*'ye bu düğümden daha yakın olan komşularına iletilir. Önerilen protokolde veri iletilirken harcanan ve iletilen yolun karesiyle orantılı olan enerji maliyet olarak varsayılarak simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Mevcut yöntem, 1500 düğümlü ağlar için her düğümün aldığı mesajı bütün komşularına ilettiği "*flooding*" veri iletim yöntemiyle kıyaslanmıştır. Test sonuçlarına göre *flooding* yönteminde her düğüm ortalama 50 kere mesaj yayınlarken önerilen yöntemde bu miktar düğüm başına ortalama 2'dir.

Sonuç olarak ağdaki optimal veri iletimine daha az sayıda düğüm ziyaret edilerek erişilmiştir.

Bazı KAA uygulamaları bağlı olmayan; yani ağdaki her düğüm çifti arasında iletişim bağlantısının olmadığı ağlardan oluşabilmektedir. KAA'lar için tasarlanmış zirai ve doğal çevre görüntüleme gibi bazı uygulamalarda mevcut ağlar oldukça geniş alanlara yayılmaktadır. Bu durumda, sensörler arasındaki uzaklıklar onların birbiriyle iletişim kurabilecekleri maksimum haberleşme mesafesini aşabilmektedir. Böylece tam ve kalıcı bir ağ yapısı elde edilememekte ve ağ birbirinden izole olmuş parçalara ayrılmaktadır. Bağlı olmayan ağ yapılarında düğümlerin gezer halde belirli bir düzen içinde hareket etmeleri sayesinde bağlı bir ağ yapısı oluşturmak mümkün olabilmektedir. Bu sayede birim zamanda ve sınırlı enerji kapasitesi altında daha fazla veri toplama imkânı oluşur. Ancak veri değiş tokuşu sadece düğümler birbirinin menzilindeyken olmaktadır. Bu yapıya *fırsatçı iletişim (opportunistic communication)* denmektedir. Soares ve diğ. (2010)'da *fırsatçı iletişimi* baz alınarak düşük yoğunluklu, yüksek hareket kabiliyetli ve stokastik yayılıma sahip ağlarda veri toplanmasıyla ilgilenilmektedir. Ele alınan problemde *düğüm hareketliliği* olduğundan problem deterministik değildir. Bu çalışmada iletilen verilerin varış noktasına ulaşma sürelerini en aza indirmenin ve ağ bütünlüğünü oluşturarak ağ güvenilirliğini sağlamanın amaçlandığı etkili ve verimli bir rotalama oluşturan CHARON adında bir çözüm yöntemi önerilmiştir. Gecikme optimize edilirken enerji, veri işleme süresi, arabellek alanı gibi kaynaklar da göz önünde bulundurulmuştur. Rotalama tekniğini açıklamak gerekirse; kararlar düğümlerin *EDD (estimated delivery delay)* diye adlandırılan tahmini teslimat gecikmesi değerleri ve fayda fonksiyon değerlerine göre verilmektedir. Her bir düğümün *EDD* değerleri düğümlerin *BS*'ye olan en kısa yol süreleridir. Fayda fonksiyonu ise gecikmeyi optimize ederken daha verimli bir uygulama sunabilmek adına dikkate alınan ve CHARON'da zorunlu olmayan bir özelliktir. Yani eğer CHARON'da fayda fonksiyonu tanımlı değilse rotalama kararlarında sadece gecikmeyi minimize etmeye odaklanılırken; tanımlıysa her düğümdeki kalan enerji ve hafıza miktarı ve/ya diğer uygulama içi metriklerle ilgili bilgiler de dikkate alınmaktadır. Eğer bir düğüm veri iletecekse *EDD* değeri kaynak düğümünden daha düşük olan ve fayda fonksiyonu



değeri onunkinden daha düşük olmayan bir düğüme verisini iletmektedir. Yöntemde bir düğümün bahsedilen kriterlere göre veri iletebileceği birden fazla düğüm olduğu durumlarda rotalamaya ne şekilde karar verileceği bilgisi bulunmamaktadır. Ağda tek kopya veri dolaşmaktadır. Ancak; verinin *BS*'ye ulaşmama ihtimaline karşı *zombie message* adı verilen saklı bir kopya tutulmaktadır. Bu kopyalar *BS*'ye yakın bölgelerde tutulmaktadır. Bu çoklu kopyalama stratejisine *hibrid replikasyon* yani *melez kopya* denmektedir. Soares vd. (2010) melez kopyalamanın yanı sıra tek ve çok kopyalı rotalamanın olduğu çeşitli durumları simülasyon tekniğiyle incelemiştir. Sonuç olarak melez kopyalama ile çok kopyalı rotalama stratejisine göre daha az kaynak tüketimi ve veri trafiği oluşmaktadır. Böylece düğümlerin ömürleri artmakta ve veri iletimindeki gecikmeler azalmaktadır. Ayrıca tekli kopya stratejisine göre verilerin iletilme olasılıkları daha yüksek olduğundan ağ güvenilirliği artmaktadır.

Kesik kesik (sürekli olmayan) bağlı mobil ağlar üzerinde bir başka çalışma da Spyropoulos ve diğ. (2005)' tir. Spyropoulos ve diğ. (2005)'te, geliştirilen *Spray and Wait* yani *püskürt ve bekle* rotalama yöntemini, *spray* ve *wait* olmak üzere iki fazdan oluşmaktadır. *Spray* fazında her bir kaynak düğüm ürettiği verinin *L* adet kopyasını *L* tane düğüme iletir ve bu verileri alan düğümler de aldıkları verinin *L* tane kopyasını oluşturup başka düğümlere iletirler. Ağdaki toplam kopya veri sayısı onlardan en az birinin *BS*'ye iletilme olasılığının belli bir seviyeye ulaşmasını sağlayacak kadar olunca *Spray* fazı sonlanır. *Wait* fazında ise *spray* fazında oluşturulan kopya verilerden en az biri *BS*'ye ulaşmazsa kopya verileri taşıyan düğümler bu mesajları doğrudan *BS*'ye iletir. Minimum gecikmeye ulaşmak için gerekli *L* kopya sayısının sadece ağdaki düğüm sayısına bağlı olduğu ispatlanıp, *L* sayısının nasıl seçileceği konusu da ele alınmıştır. *Spray and Wait* ve benzer rotalama teknikleri olan *epidemic* ve *flooding* rotalama artan trafik yükü ve ağın bağlılık (connectivity) derecesi ile çeşitli senaryolar altında toplam ileti miktarı ve gecikme süreleri bazında kıyaslanmıştır. Sonuç olarak *Spray and Wait* tekniğinin, uygulama basitliğine rağmen iletim sayısı ve gecikme performansı açısından diğer rotalama tekniklerine göre çok daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bazı durumlarda düğümlerin alıcılarını gerekmedikleri zamanlarda kapalı tutmak enerji tasarrufunu sağlamak ve dolayısıyla da ağ ömrünü iyileştirebilmek için etkili bir yöntem olabilir. Örneğin; Cerulli ve diğ. (2012), Alfieri ve diğ. (2006) ve Perillo ve Heinzelman (2003)'te ağ ömrünü arttırmak ve belirli bir kapsama seviyesinde hizmet kalitesi elde etmek için düğümlerin kapalı ve açık bulunma durumlarının süreleri çizelgelenmiştir. Cerulli ve diğ. (2012)'de hedef kapsama problemi ele alınmıştır. Kullanılan ağdaki sensörler, başlangıç enerjileri ve veri sezme menzilleri açısından farklı oldukları için heterojen bir ağ vardır. Ayrıca ağdaki sensörler açık/kapalı durumlarda bulunmaktadır. Problemin amacı; ilgili alandaki bütün hedefleri kapsayan sensör kümeleri (*cover set*) oluşturmak ve onların aktif durumda bulunma sürelerini ağ ömrünü en çoklayacak şekilde belirlemektir. Ağ ömrü sensörlerin aktif oldukları yani çevre görüntülemesiyle veri ürettikleri toplam süre olarak tanımlanmıştır. Problemi *Maksimum Ağ Ömrü Problemi (maximum network lifetime problem - MLP)* nin daha genel hali olan *ayarlanabilir menzillerle maksimum ağ ömrü problemi (maximum network lifetime with adjustable ranges problem- MLARP)* gibi modellemiştir. *MLARP* probleminin *MLP* probleminden farkı, sensörlerin veri sezme mesafelerinin ayarlanabilir olmasıdır. Problemi çözmek için kesin çözüm yöntemi olan sütun üretme (*column generation*) ve yerel arama tekniği ile bütünleştirilmiş açgözlü bir algoritma geliştirip kullanmışlardır. *MLARP* probleminde amaç fonksiyonu sensörlerin batarya ömürlerini dikkate alarak kapsar kümelerin aktivasyon sürelerini ve dolayısıyla da ağ ömrünü maksimize eder. Olurlu kapsar kümelerin sayısı üsteldir ve bu aşamada problemi optimal çözmek için sütun üretme yöntemi kullanılmıştır. Önerilen sezgisel ise iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama *AR-Greedy (Adjustable Ranges Greedy)* adında bir sezgisel metottur. *AR-Greedy* her seferinde bir kapsar küme inşa edip çözümü olurlu tutmak için verilen üst sınırı aşmayacak şekilde kümelere aktivasyon süresi atamaktadır. Algoritmadaki her kapsar küme boş bir küme ile başlar ve kapsanacak hedefler eklendikçe büyür. Algoritma, sensörlerin ömrü yeni bir kapsar küme oluşturmaya yetmeye kadar devam eder. İkinci aşama olan *AR-Iterative* adındaki sezgisel ise ilk aşama sonunda elde edilen amaç fonksiyonu değerini iyileştirmek için geliştirilmiştir. Bir saat zaman limiti altında *MLARP* ve *MLP* modelleri sütun üretme (*CG*) ve yerel arama algoritmasıyla çözülmüştür. Sonuç olarak, farklı senaryolar altında *MLARP*'nin ağ

ömrüne katkısı *MLP*'ye göre %24,72 ile- %88,81 arasında değişmektedir. Örneklerin çoğunda *CG* optimal çözümü kısa sürede bulmuştur. Optimal sonuçlar ve optimalin bulunamadığı durumlarda da elde edilen sınırlar karşılaştırıldığında en kötü durumda bile *CG* ile bulunan değer eldeki sınır değerinin %95'i kadardır. Yerel arama algoritması ise *CG*'den daha kısa sürede çözüm vermektedir ve sunduğu ağ ömrü değerleri *CG*'nin sunduklarının en az %89'u kadardır.

Alfieri ve diğ. (2006)'da ağ ömrünü dolaylı olarak kapsama kalitesi belirlemektedir. Yalnız Cerulli ve diğ. (2012)'den farklı olarak kapsama kalitesini tüm ağın kapsanması değil de minimal bir kapsama eşik değerinin sağlanması ifade etmektedir. Minimal sezme kalitesi diye adlandırılan kapsama için alt sınır değeri (*LB*) bulunmaktadır. Yani ağ, en az belirlenen *LB* tane hedefle ilgili verileri görüntüleyebiliyor olmak durumundadır. Çalışmanın amacı; böyle bir minimal kapsama kısıtı altında ağ ömrünü en çoklamaktır. Problemden sensörler özdeş ve açık/kapalı durumdadır. *Küme ayırımı (set-partitioning)* kullanılarak her hedefi kapsayan mümkün olduğunca çok sayıda ayrık (*disjoint*) sensör alt kümeleri oluşturulmasına ve neticesinde de ağ ömrünün en çoklanmasına çalışılmıştır. Bunun için kesin çözüm yöntemi olarak sütun üretme (*CG*) kullanılmıştır. *CG* yönteminde genel olarak rotalama ve çizelgeleme şeklinde iki ana aşama bulunmaktadır. Bu çalışmada ağdaki bazı sensörlerden oluşan alt ağlar belirlenerek bu iki aşama parçalanmıştır. Her alt ağ bağlıdır ve minimum kapsama gereksinimlerini karşılamaktadır. *CG*'nin ilk aşamasında; bağlı alt ağlar belirlendikten sonra hangi alt ağların ne kadar süre kullanılacağına karar verilmiştir. İkinci aşamada ise minimal kapsama koşulunu sağlayan olurlu alt ağların bulunması amaçlanır. İlk ve ikinci aşama yeni olurlu bir alt ağ bulamayan kadar iteratif olarak devam etmektedir. Alternatif çözüm yöntemi olarak açgözlü bir sezgisel de sunmuşlardır. Bu iki çözüm yöntemi ile farklı ağ büyüklükleri ve kapsama kalitesi *LB* değerleri üzerinde testler yapılmıştır. Test sonuçlarına göre kapsama kalitesi *LB* arttıkça *CG* yöntemi açgözlü sezgisel algoritmaya göre daha yüksek ağ ömrü değerleri sunmaktadır; fakat açgözlü algoritma için çözüm süreleri daha kısadır.

Perillo ve Heinzelman (2003)'te Cerulli ve diğ. (2012) ile Alfieri ve diğ. (2006)'ya benzer çözümler üretilmiştir. Bu çalışmada minimum seviyede servis kalitesi

gerektiren enerji kısıtlı bir KAA'nın ağ ömrünü en çoklama problemi ele alınmıştır. Varsayılan sistemde ağdaki tüm sensörler  $BS$ 'ye doğrudan bağlıdır ve tüm ağdaki sensörler açık/kapalı durumlarının çizelgelerine göre sensör kümeleri oluşturmaktadır. Amaç, olurlu sensör kümelerinin toplam çalışma süresini en çoklamaktır. Olurlu sensör kümeleri oluşturulurken güvenilirlik kısıtları, sensörlerin bant genişliği ve enerji kısıtları da düşünülmüştür. Kaynak düğümlerden çıkan veriler çok yollu rotalar üzerinden  $BS$  ile birleşmektedir. Problem *genellenmiş bir maximum akış diyagramı problemi* olarak modellenmiştir. Buna bazı ek kısıtlar eklenmiş ve problemi optimal çözmek için doğrusal programlama kullanılmıştır. İlk olarak model tek adımlı yol varsayımı altında geliştirilmiş ve daha sonra çok adımlı durum göz önünde bulundurularak genişletilmiştir. Optimizasyon sonucu bütün sensörlerin ne zaman açık ne zaman kapalı durumda olacağını gösteren bir çizelge elde edilmiştir. Tipik algılama uygulamaları için bazı simülasyon testleri yapılmıştır ve ağ ömrünün iki kata kadar uzatıldığı görülmüştür.

Krishnamachari ve Ordonez (2003)'te, farklı adalet gereksinimlerinin ağ performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bahsedilen çalışmada düğümlerin batarya enerjilerinin ve veri iletim oranı olarak adlandırdıkları  $\alpha_i$  değerlerinin eşit olduğu ağlar ele alınmıştır. İki adet doğrusal olmayan model sunulmuştur. Modeller her kaynaktan  $BS$ 'ye iletilen veri miktarını adalet oranı  $\alpha_i$  ile sınırlandırmaktadır. Yani hiçbir sensörün  $BS$ 'ye giden toplam verinin  $\alpha_i$  katından fazlasını iletmesine izin verilmemektedir. Birinci modelde amaç, bahsedilen adalet kısıtı altında  $BS$ 'ye ulaşan toplam veri miktarını maksimize etmektir. Ayrıca, modelde Shannon'un kapasite teoremi kullanılarak bir bağlantı üzerinden akabilecek maksimum akış için üst sınır belirlenmiştir. Önerilen ikinci modelde ise amaç, toplam tüketilen enerji miktarını en azlamaktır. Bunu yaparken  $BS$ 'ye gönderilecek minimum veri miktarı kısıtı da eklenmiştir. Böylece minimum enerji ve maksimum veri amaçları arasındaki denge sağlanır. İlk model ile aralarındaki fark, amaç fonksiyonunun toplam veri miktarını maksimize etmesi değil toplam harcanan enerji miktarını minimize etmesi ve harcanacak toplam enerji miktarı kısıtı yerine ağdan çıkması gereken minimum veri miktarı kısıtının olmasıdır. Düğümlerin veri üretim miktarlarının eşit olmadığı küçük ağlar üzerinde çalışılmıştır. Her iki model  $\alpha_i$ 'nin  $[0,2, 1]$  aralığında değerler aldığı

farklı veri setleri üzerinde test edilmiştir. Sonuç olarak ikinci model, daha az enerji harcayarak daha fazla veri ürettiği için ilk modelden daha etkili sonuçlar sunmuştur. Ayrıca sıkı adalet kısıtları genel olarak *BS*'ye iletilen veri miktarında azalmaya ve enerji kullanımında artışa sebep olmaktadır.

Çizelge 3.1'de literatür taramasındaki çalışmalar ilgilendikleri temel başlıklar altında sınıflandırılmıştır. *CM* için temel amaç ağ ömrünü en çoklamaktır. Belirtilen amaç ile beraber modelde bazı ek gereksinimleri yansıtan kısıtlar bulunmaktadır. İlk olarak *CM*'de herhangi bir düğüm merkezi değilse ona diğer düğümlerce iletebilecek toplam veri miktarı üzerinde bir üst sınır bulunmaktadır. Bu durumda sensörler arasındaki veri yükü dağılımında bir adalet olgusu söz konusudur. Ayrıca *CM*'deki veri akışı koşullu çok kopyalı ve çok yollu bir rotalama stratejisiyle sağlanarak ağ güvenilirliği ve güvenliği göz önünde bulundurulmaktadır. Yani düğümlere veri paketlerini parçalara ayırarak *BS*'ye iletme serbestisi sunan bir çok yollu strateji ve kaynak düğümlerin verisini *BS*'ye iletirken merkezi düğüm üzerinden gönderdiği veriyi kopyalayıp düğüm ayırık yollar üzerinden tekrar *BS*'ye iletildiği bir koşullu çok kopyalı strateji vardır. Son olarak merkezi olmayan düğümlere iletebilecek azami veri miktarı sınırlı olduğundan dolayı olarak bu düğümlerdeki veri trafiği de dengelenmektedir. Yani bu durumda her ne kadar bu çalışmada nicel bir şekilde analiz edilmemiş olsa da hizmet kalitesini destekleyici bir durum söz konusudur.

Çizelge 3.1: Literatür incelemesindeki çalışmaların sınıflandırılması.

Çalışma	Maks. Ağ Ömrü	Min. Harcanan Enerji	Güvenlik	Güvenilirlik	Adalet	Hizmet kalitesi
Nasser ve Chen (2007)	x		x			
Ma ve diğ. (2007)			x	x		
Karlof ve diğ. (2003)			x	x		
Ok ve diğ. (2009)			x	x	x	
İncebacak ve diğ. (2015)		x	x			
Soares ve diğ. (2010)				x		X
Spyropoulos ve diğ. (2005)				x		X
Djukic ve Valace (2004)		x		x		
Cerulli ve diğ. (2012)	x					X
Kalpakis ve diğ. (2002)	x					
Alfieri ve diğ. (2006)	x					x
Perillo ve Heinzelman (2003)	x					
Ye ve diğ. (2001)		x				x
Akkaya ve Younis (2003)		x				x
Cheng ve diğ. (2008)	x				x	
Krishnamachari ve Ordonez (2003)		x		x	x	
<i>CM</i>	x		x	x	x	x

Çizelge 3.1'deki çalışmalar; minimum ağ ömrü, minimum harcanan enerji, güvenlik, güvenilirlik, adalet ve hizmet kalitesi başlıkları altında toplanmıştır. Buradaki kriterleri sağlamayı amaç edinen veya göz önünde bulunduran çalışmalar

sınıflandırılmıştır. Çizelgenin sonunda ise *CM*'nin ilgilendiği metrikler belirtilmektedir. Çizelgeye göre ağ ömrünü en çoklamayı hedefleyen çalışmalarda çoğunlukla hizmet kalitesi göz önünde bulundurulmuş olup diğer konular üzerinde durulmamıştır. Toplam tüketilen enerjiyi en küçüklemeyi hedefleyen çalışmalar genellikle hizmet kalitesi, güvenilirlik ve/ya adalet olgusu barındırmaktadır. Bazı çalışmalar ise sadece belirli bir seviyede güvenlik, güvenilirlik ve/ya hizmet kalitesini sağlama amacı içermektedir. Sonuç olarak ağ ömrünü güvenlik ve güvenilirliği göz önünde bulundurarak en çoklamayı amaçlayan ve bunu sağlarken adalet olgusunu içeren ve dolaylı olarak ağdaki veri trafiğini de dengeleyen *CM*, incelenen diğer çalışmalara göre en fazla başlığı içeren çalışmadır.

#### 4. PROBLEM TANIMI

Bu çalışmada ele alınan problemde pek çok sensör ve bir baz istasyonu (*BS*) bulunmaktadır. Problemin amacı, ağ ömrünü en çoklayan enerji verimli bir veri trafiği oluşturmaktır. Yani ağdaki her sensörden çıkan veriyi *BS*'ye en enerji-etkin yollar üzerinden rotalayarak ağda enerjisi ilk olarak biten sensörün ömrünü dolayısıyla ağ ömrünü en çoklamaktır. Ağdaki her sensör birer kaynak algılayıcıdır. Yani her biri kendi çevresindeki veriyi sezen veri üretim kaynağıdır. Sensörlerin yerleri ve batarya enerjileri, birim zamanda sezdikleri veri miktarları, birim veri alırken ve gönderirken harcadıkları enerji miktarları gibi özellikleri bilinmektedir. Her sensör kendi çevresindeki veriyi algılar ve bunu komşu sensörlere veya doğrudan *BS*'ye iletir. Yani *BS* verilerin nihai varış noktasıdır ve ondan tekrar veri çıkamaz.

Bu çalışmadaki ağlarda her sensör diğer bütün sensörlere doğrudan bağlı değildir. Yani önceden belirlenmiş bir haberleşme mesafesi bulunmaktadır. Eğer iki sensör düğümü birbirinin *haberleşme mesafesi* içinde ise bu iki düğüm birbirine doğrudan bağlıdır. Sensör ağı tam bağlı değil bağlı bir ağdır. Yani her bir sensör ile *BS* arasında en az bir yol bulunmaktadır.

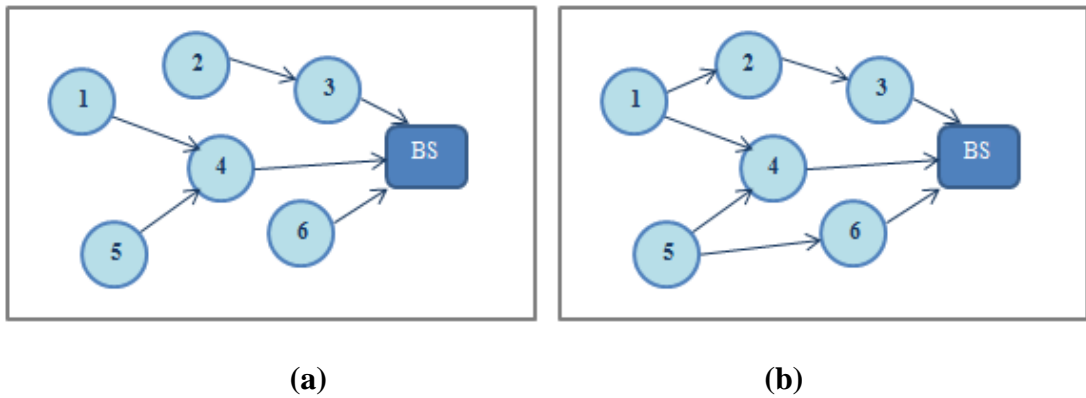
Ağdaki bir kaynak sensörün batarya enerjisinin tükenmesi demek o sensörün sezme ve iletim görevlerini yerine getirememesi demektir. Böylelikle ağın ve verinin bütünlüğü bozulmuş olur ve bazı sensörlerin *BS* ile bağlantısı kesilirken *BS*'ye eksik veri iletilir. Bu sebeple problem varsayımına göre bir *KAA*'da herhangi bir kaynak sensörün batarya enerjisinin tükenmesi ağ ömrünün de bittiği anlamına gelmektedir. Yani batarya enerjisi en erken tükenen kaynak sensör ağ ömrünü belirlemektedir. Sensörlerin sınırlı batarya ömürleri vardır; çok küçük cihazlardır ve uzak veya tehlikeli alanlara çoğunlukla yukarıdan serpilerek rastgele yerleştirilmektedir. Dolayısıyla çoğu uygulamada batarya enerjileri tükendiğinde sensörlerin yerlerini saptayıp bataryalarını yenilemek neredeyse imkansızdır. Tüm bu sebeplerden ötürü *KAA*'larda ağ ömrünün uzun olması istenmektedir ve buna sahip olmak için sensörlerin enerjilerinin verimli kullanılması gerekmektedir.



Ağdaki bağlantı veya düğümlerde bir sorun olsa bile ağdaki verilerin *BS*'ye ulaşması ağın *hata/arıza* toleransına sahip olduğunu göstermektedir ve bu tip ağlar *güvenilir* olma özelliği taşımaktadır. *Hata toleransı*, ağın bazı parçaları bozulsun bile ağın doğru çalışmaya devam etmesi, ağ bütünlüğünün korunmasıdır. Saldırı toleransına sahip ağlar *güvenli ağlar* olarak nitelendirilmektedir. Yani ağın *güvenli* olması demek; ağ bütünlüğünü bozup ağ hizmet dışı bırakmaya yönelik saldırılara ve ağ dışarıdan gizlice dinleme gibi ağ dışı tehditlere karşı korunaklı olması demektir. *KAA*'larda enerji verimliliğinin yanında *güvenilirlik* ve *güvenlik* de önemli konulardır. Bu çalışmada ağ güvenilirliğine yönelik engelleyici ve ağ güvenliğine yönelik düzeltici bir takım önlemleri içeren ve ağ ömrü en iyilemesini amaçlayan bir karma tamsayı optimizasyon modeli sunulmuştur. Bu model *CM* olarak adlandırılmıştır.

*CM*'de *KAA* ömrünün iyileştirilmesi amacıyla ağ güvenilirliği ve güvenliği göz önünde bulundurularak oluşturulmuş *çoklu merkezi düğüm* varlığında *koşullu çok kopyalı* ve *çok yollu* bir rotalama stratejisi geliştirilmiştir.

*CM*'de *çoklu yol atama* stratejisi bulunmaktadır. Yani herhangi bir kaynak düğümden çıkan veri paketi bir bütün olarak gönderilebildiği gibi parçalara ayrılarak *BS*'ye gönderilebilmektedir. Çoklu yol kullanımının ağ güvenliğine etkisini daha detaylı açıklamak adına Şekil 4.1'deki örnek ağ oluşturulmuştur.



Şekil 4.1 : (a) Tek yol atamalı ve (b) Çok yol atamalı rotalama stratejisi.

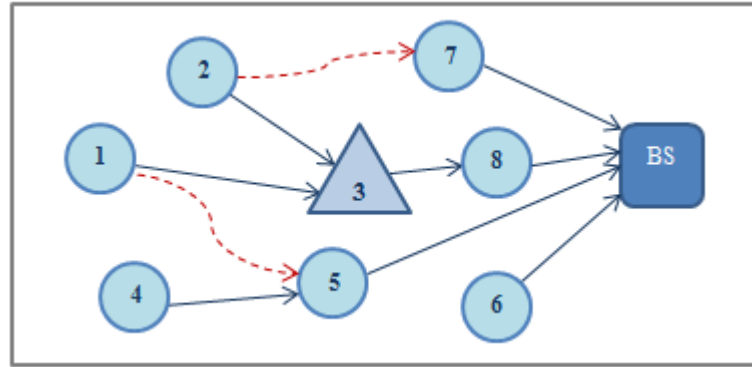
Şekil 4.1.a'da tüm sensörler için *tek yollu* rotalama bulunmaktadır. Ağdaki rotalar sırasıyla 1-4-*BS*, 2-3-*BS*, 3-*BS*, 4-*BS*, 5-4-*BS* ve 6-*BS* şeklindedir. Yani tüm düğümlerin ürettiği veriler parçalara ayrılmadan bir bütün halinde *BS*'ye

ulaştırılmaktadır. Şekil 4.1.b’de ise bazı sensörler için tek ve diğerleri için de çok yollu rotalama bulunmaktadır. Buna göre 2, 3, 4 ve 6 numaralı düğümler kendi verilerini tek bir yol üzerinden; 1 ve 5 numaralı düğümler ise ikişer rota üzerinden *BS*’ye transfer etmektedir. Bunlar 1 numaralı düğüm için sırasıyla 1-2-3-*BS* ve 1-4-*BS*; 5 numaralı düğüm için de sırasıyla 5-4-*BS* ve 5-6-*BS* rotalarıdır. Çoklu yol atama stratejisi sayesinde daha güvenilir bir ağ yapısı oluşmaktadır. Örneğin; her iki veri iletim stratejisinin uygulandığı ağlarda 4 numaralı düğümün arızalandığı bir senaryoyu ele alalım. Bu durumda tek yollu stratejiye göre verisini sadece 4 numaralı düğüm üzerinden *BS*’ye ileten 1 ve 5 numaralı düğümlerin verilerinin tamamı için kayıp yaşanacaktır. Çok yollu stratejide ise verisini iki farklı rota üzerinden ileten 1 ve 5 numaralı düğümlerin verilerinin sadece 4 numaralı düğüm üzerinden iletilen miktarı *BS*’ye erişemeyecektir. Böylelikle çok yollu strateji dolaylı olarak ağ güvenliğini de desteklemektedir.

Çalışmada önerilen strateji ile adaletli bir rotalama belirlenmesi de hedeflenmektedir. Buna göre, her sensör ancak kendi ürettiği verinin belli bir katı kadar başka sensörlerin verisinin iletiminde görev alabilir. Böylelikle düğümlerden birine veya bir kısmına aşırı trafik yükü verilmeyerek *adaletli* bir yük dağılımı sağlanmaktadır. Ağdaki dengeli veri trafiği sayesinde enerji tüketimi de dengelenerek ağ güvenilirliği iyileştirilmiş olmaktadır.

Tüm bunlara ek olarak *CM*’de bazı sensörlerin veri iletiminde merkezi rol oynamalarına izin verilmesi ve dolayısıyla da diğer sensörlerden daha fazla veri iletmeleri söz konusudur. Bu noktada bir sensörün merkezi olmasına izin verilmesi için o sensörün veri iletiminde diğerlerine oranla belirgin olarak daha yoğun kullanılmasının ağ ömrünü iyileştirmesi gerekmektedir. Mevcut tez çalışmasında bu tarz bir değerlendirmenin yapılması, merkezi düğümler üzerinden gönderilen verinin fazladan kopyalanmasının istenmesi nedeniyle gereklidir. Fazladan kopyalamanın motivasyonu ağ daha güvenilir kılmaktır. Şöyle ki merkezi düğümlerin üzerlerinden geçen veri miktarı diğer düğümlere göre daha fazla olduğundan arızalanma veya enerjilerini daha erken tüketme olasılıkları yüksektir. Ayrıca ağ dışından gelebilecek saldırılar için de cazip birer hedeftirler. Sonuç olarak ağ bütünlüğü için kritik olan merkezi düğümler için bazı ek önlemler alınmasının elzem olduğu düşünülmüştür.

*BS*'ye veri gönderirken *çok kopyalı* bir rotalama stratejisi uygulanması ağ güvenliğini ve güvenilirliğini arttıracaktır. Fakat bu durumda *BS*'ye fazladan veri gönderilmesi ve fazladan enerji harcanması nedeniyle ağ ömründe kısalma söz konusu olacaktır. Önlem olarak enerji kullanımı ve ağ güvenliği arasındaki dengeyi sağlamak için farklı bir kopyalama stratejisi önerilmelidir. Bu sebeple ağ bütünlüğü için kritik olan merkezi düğümlerin üzerinden geçen verilerin kopyalanarak fazladan *BS*'ye gönderildiği *koşullu çoklu kopya* stratejisi sunulmuştur. Yani bir kaynak düğümün *BS*'ye iletilirken merkezi düğümler üzerinden geçen verisi kaynağında kopyalanarak ikinci kez *BS*'ye gönderilmektedir. Bu tez çalışmasında ilk olarak Şendil ve Altın-Kayhan (2015)'te önerilen kısmi kopyalama stratejisi birden fazla merkezi düğüm seçilmesine izin verilecek şekilde geliştirilmiştir. Şekil 4.2'de koşullu çoklu kopya stratejisi gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : *CM*'de koşullu çoklu kopya stratejisi.

Şekil 4.2'deki ağda üçgen şeklinde gösterilen 3 numaralı sensör merkezi düğümdür. Ağdaki veri iletimini temsil eden düz oklar orijinal veriyi; kesikli oklar ise kopya veriyi ifade etmektedir. 1 ve 2 numaralı düğümler verilerini *BS*'ye iletirken 3 numaralı merkezi düğümü kullanmaktadırlar. Bu sebeple verilerini kopyalayarak düğüm ayrık rotalar üzerinden tekrar *BS*'ye iletmektedirler. 1 numaralı düğümün orijinal yani birincil verisi 1-3-8-*BS* üzerinden; kopya yani ikincil verisi ise ilk rota ile hiçbir ortak düğüme sahip olmayan 1-5-*BS* üzerinden rotalanmaktadır. 2 numaralı düğümün birincil verisi 2-3-8-*BS* üzerinden; ikincil verisi ise ilk rota ile düğüm ayrık olan 2-7-*BS* üzerinden rotalanmaktadır.

Bu çalışmada ağ ömrü iyileşecekse belirli sayıya kadar merkezi düğüm açılmasına izin verilmektedir. Yani *çoklu merkezi düğüm* durumu bulunmaktadır. *CM*'deki çoklu merkezi düğüm özelliği tek merkezi düğümlü durumun gevşetilmiş halidir. Bu durumda çoklu merkezi düğüm sayesinde ağ ömründe iyileşme sağlanabilmektedir.

*CM*'de, ikincil veriler iletilirken merkezi düğümün kullanılmasına izin verilmemektedir. Yani bu durumda hem ikincil veriler, saldırılara cazip hedef olan merkezi düğümlerden uzak tutulmaktadır hem de hali hazırda kopyalanmış verinin bir merkezi düğüm üzerinden geçerek tekrar kopyalanmasına engel olunmaktadır.

Son olarak bu çalışmanın bir diğer özelliği ikincil veri için de çok yönlü rotalamaya izin verilmesidir. Yani bir kaynak düğüm ikincil veriyi diğer düğümlere iletirken, herhangi bir düğüme kopyaladığı verinin belli bir oranından daha fazla kopya veri gönderememektedir. Böylelikle bir kaynaktan çıkan kopya veri zorunlu olarak parçalara bölünerek birden fazla rota üzerinden *BS*'ye iletilmektedir. Çok yönlü rotalama ağ güvenilirliği ve güvenliğini arttırmaktadır. Böylece ikincil verilerin de uygunluk ve bütünlüğünün korunabilme olasılığı arttırılmış olmaktadır.

Problemin genel rotalama özellikleri yukarıda belirtildiği gibidir. Verilen bir ağda konumları, batarya enerjileri, haberleşme mesafeleri, veri iletirken ve alırken harcadıkları birim enerji miktarları ve birim zamanda sezdikleri veri miktarları bilinen çok sayıda sensör ve sensörlere göre konumu bilinen bir adet statik *BS* bulunmaktadır.

$G = (N, A)$  yönlü çizgesinde  $|N|-1$  tane sensör ve 1 adet sınırsız enerjiye sahip baz istasyonundan (*BS*) oluşan düğüm kümesi  $N$  ile gösterilmektedir. Sensörlerin kümesi  $N_0 = N \setminus \{BS\}$  şeklinde tanımlanmaktadır. Ayrıca  $A$ , sensörler arasındaki yönlü doğrudan iletişim bağlantılarının kümesidir. Eğer  $j \in N$  sensörü  $i \in N_0 \setminus \{j\}$  sensörünün haberleşme mesafesi içindeyse bu iki sensör birbirine veri gönderebilmektedir; yani  $(i, j) \in A$  ve  $(j, i) \in A$ 'dır.

Bahsedilen stratejilere uygun olarak çalışan iletişim ağının tasarlanmasında matematiksel modelleme kullanılmıştır. Bu bölümde öncelikle geliştirilen modelin parametre ve değişkenleri açıklanacaktır. Devamında da önerilen asıl ve alternatif modeller sunulacaktır.

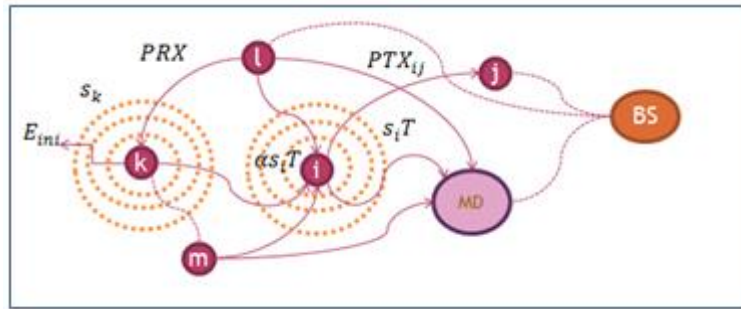
#### 4.1 Parametreler

Tasarım aşamasında değerlerinin bilindiği varsayılan parametreler, sensörlerin başlangıç enerjileri, veri alırken ve iletilirken harcanan birim enerji miktarları, izin verilen azami merkezi düğüm sayısı, veri üretimi ve iletimi ile ilgili katsayıları içermektedir. Parametrelerin gösterimleri ve tanımları Çizelge 4.1’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.1 : Parametreler ve açıklamaları.

Sembol	Açıklama
$E_{ini}$	Her bir sensörün başlangıç enerjisi
$s_k$	$k$ düğümünün birim zamanda ürettiği veri miktarı
$PRX$	Birim veri almak için harcanan enerji miktarı
$PTX_{ij}$	$i$ düğümünden $j$ düğümüne birim veri göndermek için harcanan enerji miktarı
$A$	Birincil veri iletim miktarı için eşik katsayısı
$K$	Ağda bulunabilecek azami merkezi düğüm sayısı
$C$	İkincil veri iletim oranı
$M$	Çok büyük pozitif bir sayı

Çizelge 4.1’de listelenen parametreler Şekil 4.3’teki ağdaki temsili gösterimleri üzerinden açıklanmıştır.



Şekil 4.3 : CM’de kullanılan parametrelerin temsili gösterimi.

Şekil 4.3’teki ağda bu çalışmada kullanılan parametreler gösterilmektedir. Öncelikle her  $t \in N_0 = \{k, l, m, n, i, j, MD\}$  sensörü başlangıçta aynı  $E_{ini}$  batarya enerjisine sahiptir ve birim zamanda  $s_t$  kadar veri üretmektedir. Bir  $k \in N_0$  sensörü başka bir  $l \in N_0 \setminus \{k\}$  sensöründen birim veri alırken  $PRX$  kadar enerji harcarken; bir  $i \in N_0$  sensörü başka bir  $j \in N \setminus \{i\}$  sensörüne birim veri iletirken  $PTX_{ij}$  kadar enerji

harcamaktadır. Ağ ömrü  $T$  kadardır ve bir  $i \in N_0$  sensörü  $T$  ağ ömrü boyunca  $s_i T$  kadar veri üretmektedir. Ağdaki sensörler arasında *adalet* olgusunu oluşturan dengeleyici faktör  $\alpha$  eşik katsayısıdır. Kastedilen adalet kavramına göre, merkezi düğüm olmayan kaynak düğümlere diğer düğümlerden gönderilen verinin toplamı en fazla kendi ürettiğinin  $\alpha$  katı kadar olabilir. Eğer bir  $i \in N_0$  sensörü merkezi düğüm ise ona diğer düğümlerden iletilen veriler kendi sezdikleri verinin en az  $\alpha$  katı kadar olmalıdır. Bu durumda bir  $i \in N_0$  sensörü merkezi düğüm değilse en fazla  $\alpha s_i T$  kadar; merkezi düğümse en az  $\alpha s_i T$  kadar diğer sensörlere ait veri transfer edebilmektedir. Bir  $i \in N_0$  kaynağından çıkan kopya verinin en fazla  $C$  katı kadarı bir  $j \in N_0 \setminus \{i\}$  düğümüne iletilebilir. Son olarak ağda en fazla  $K$  tane merkezi düğüm açılmasına izin verilmektedir.

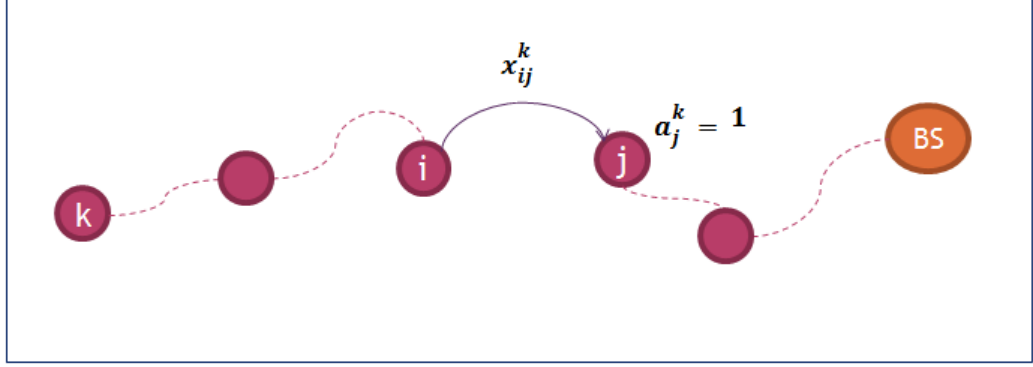
## 4.2 Karar Değişkenleri

Bu bölümde modelde kullanılan veri akışı ve merkezilikle ilgili karar değişkenleri açıklanmaktadır. Modelde veri akışını ifade eden birincil ve ikincil veriye özel karar değişkenleri bulunmaktadır. Burada birincil veriden kastedilen; her kaynak sensörün kendi çevresini sezerek ürettiği orijinal veridir. İkincil veri ise merkezi düğüm üzerinden rotalanarak  $BS$ 'ye gönderilen birincil verinin güvenliğini sağlamak için kaynak düğümde oluşturulmuş kopyasıdır. Çizelge 4.2'de karar değişkenlerinin gösterimleri ve tanımları mevcuttur.

Çizelge 4.2 : Karar değişkenleri ve açıklamaları.

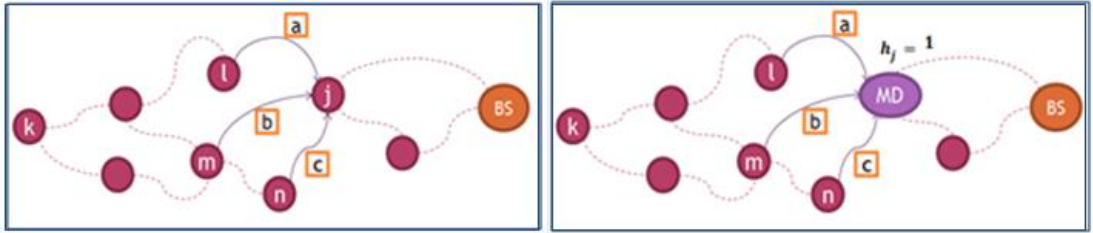
Sembol	Tanım
$T$	Ağ ömrü
$x_{ij}^k$	$k \in N_0$ kaynağından çıkan ve $(i, j)$ ayrıtı üzerinden rotalanan birincil veri miktarı
$y_{ij}^k$	$k \in N_0$ kaynağından çıkan ve $(i, j)$ ayrıtı üzerinden rotalanan ikincil veri miktarı
$h_j$	$= \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \in N_0 \text{ merkezi düğümse} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$
$a_j^k$	$= \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \in N_0 \text{ düğümü } k \in N_0 \text{ kaynağının verisini iletiyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$
$f_{kj}^l$	$k \in N_0$ kaynağından çıkıp $l \in N_0$ merkezi düğümü üzerinden geçen birincil veriyi korumak için $k$ kaynağından $j \in N_0$ düğümüne aktarılan ikincil veri miktarı

Çizelge 4.2’de tanımlanan karar değişkenlerinin işlevleri Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’deki alt ağlarda temsili olarak gösterilmiştir. Şekillerdeki ağlar KAA’ların bir kısmını göstermektedir.



Şekil 4.4 :  $x_{ij}^k$  ve  $a_j^k$  karar değişkeninin ağdaki işlevi.

Şekil 4.4’te  $k$  düğümünden çıkan akış rotalanırken sırayla  $i$  ve  $j$  düğümü üzerinden transfer edilmektedir. Şekildeki  $x_{ij}^k$  değişkeni ise bu akışın miktarını göstermektedir.  $a_j^k$  değişkeni bir gösterge değişkendir ve değerinin 1’e eşit olması  $k$  düğümünden çıkan birincil akışın  $BS$ ’ye iletilirken rotanın herhangi bir adımında  $j$  düğümüne uğradığını ifade etmektedir.

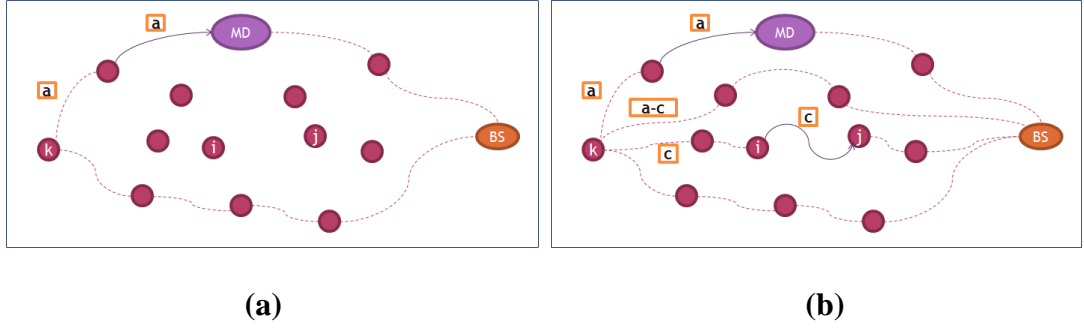


(a)

(b)

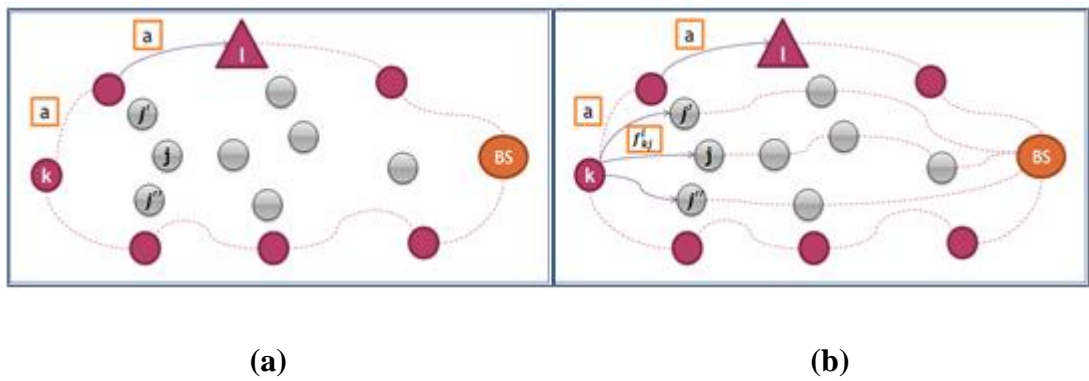
Şekil 4.5 :  $h_j$  karar değişkeninin ağdaki işlevi.

Şekil 4.5.a’da  $l$ ,  $m$  ve  $n$  düğümleri  $j$  düğümüne  $a$ ,  $b$  ve  $c$  kadar veri transfer etmektedirler. Şekildeki  $a$ ,  $b$  ve  $c$  verilerinin toplamının  $\alpha_j T$ ’den daha büyük olması ancak  $j$  düğümü merkezi ise mümkündür. Eğer bu toplam  $\alpha_j T$ ’den daha küçük ise de  $j$  merkezi olamaz. Şekil 4.5.b’de  $h_j$  değişkeni bir gösterge değişkendir; değerinin 1’e eşit olması  $j$  düğümünün bir merkezi düğüm olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.6 :  $y_{ij}^k$  karar değişkeninin ağdaki işlevi.

Şekil 4.6.a'da  $k$  düğümünden çıkan birincil verinin  $a$  kadarlık bir kısmı  $BS$ 'ye iletilirken bir merkezi düğüm üzerinden rotalanmaktadır. Bu sebeple bu orijinal veri  $k$  kaynağında kopyalanıp birincil verinin iletiildiği rotalarla düğüm ayrık olan rotalar üzerinden bir kez daha  $BS$ 'ye iletilmelidir. Şekil 4.6.b'de  $k$  düğümünden çıkan ve birden fazla rota üzerinden iletilen kopya verilerin toplamı  $a$  kadardır. Şekil 4.6.b'de  $k$  düğümünden çıkan ve sırasıyla  $i$  ve  $j$  düğümleri üzerinden rotalanan ikincil veriyi  $y_{ij}^k$  karar değişkeni ifade etmektedir ve miktarı  $c$ 'ye eşittir. Burada unutulmaması gereken şudur: ağdaki veri trafiğine  $CM$  ile önceden karar verildiğinden birincil ve ikincil veriler aynı anda rotalanmaktadır. Yani bir *yeniden iletim* değil; *veri kopyalama* stratejisi söz konusudur. Orijinal verinin bütünlüğü bozulsa da bozulmasa da kopya veri oluşturulmakta ve iletilmektedir.



Şekil 4.7 :  $f_{kj}^l$  karar değişkeninin ağdaki işlevi.

Şekil 4.7.a'da  $k$  düğümünden çıkan birincil verinin  $a$  kadarlık bir kısmı  $BS$ 'ye iletilirken bir merkezi düğüm üzerinden rotalanmaktadır. Bu sebeple  $a$  kadarlık veri  $k$  kaynağından tekrar kopyalanıp  $j$ ,  $j'$  ve  $j''$  düğümleri ile başlayan rotalar üzerinden



iletilmektedir. Şekil 4.7.b'de  $f_{kj}^l$  ile gösterilen karar değişkeni  $k$  kaynağından çıkıp  $BS$ 'ye iletilirken merkezi düğüm  $l$ 'ye uğrayan birincil verinin bir kısmının yine  $k$  kaynağından direkt  $j$  düğümüne aktarılan kopya veri miktarını belirtmektedir.

### 4.3 Formülasyon

Tez kapsamında önerilen stratejide amaç, ağ güvenliğini ve güvenilirliğini göz önünde bulundurarak ağ ömrünü en çoklamaktır. Bu strateji için geliştirilerek parametre ve değişkenleri Bölüm 4.1 ve 4.2'de detaylı bir şekilde açıklanan  $CM$  karma tamsayı programlama modeli aşağıda gösterildiği gibidir:

$$\text{maks } T \quad (4.1)$$

Öyle ki:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = \begin{cases} s_i T & i = k \\ -s_i T & i = 0 \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N_0 \quad (4.2)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{j: (i,j) \in A} PTX_{ij}(x_{ij}^k + y_{ij}^k) + \sum_{j: (j,i) \in A} PRX(x_{ji}^k + y_{ji}^k) \leq E_{ini} \quad \forall i \in N_0 \quad (4.3)$$

$$\sum_{i: (i,l) \in A} x_{il}^k - \sum_{j: (k,j) \in A} f_{kj}^l \leq M(1 - h_l) \quad \forall l, k \in N_0: l \neq k \quad (4.4)$$

$$- \sum_{i: (i,l) \in A} x_{il}^k + \sum_{j: (k,j) \in A} f_{kj}^l \leq M(1 - h_l) \quad \forall l, k \in N_0: l \neq k \quad (4.5)$$

$$f_{kj}^l \leq M h_l \quad \forall l, k \in N_0, j \in N \quad (4.6)$$

$$y_{kj}^k - \sum_{l \in N_0 \setminus \{k\}} f_{kj}^l = 0 \quad \forall (k,j) \in A \quad (4.7)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} y_{ij}^k - \sum_{j: (j,i) \in A} y_{ji}^k = 0 \quad \forall i, k \in N_0: i \neq k \quad (4.8)$$

$$\sum_{l: (l,0) \in A} y_{l0}^k - \sum_{k: (k,j) \in A} y_{kj}^k = 0 \quad \forall k \in N_0 \quad (4.9)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq M a_j^k \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k \quad (4.10)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^k \leq M(1 - a_j^k) \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k \quad (4.11)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,l) \in A} x_{il}^k \leq \alpha s_l T + M h_l \quad \forall l \in N_0 \quad (4.12)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,l) \in A} x_{il}^k \leq \alpha s_l T - M(1 - h_l) \quad \forall l \in N_0 \quad (4.13)$$

$$\sum_{j \in N_0} h_j \leq K \quad (4.14)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{i: (i,j) \in A} y_{ij}^k \leq M(1 - h_j) \quad \forall j \in N_0 \quad (4.15)$$

$$\sum_{i: (i,j) \in A} y_{ij}^k \leq C \sum_{l: (k,l) \in A} y_{kl}^k \quad \forall k, j \in N_0 \quad (4.16)$$

$$x_{ij}^k, y_{ij}^k, f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N_0 \quad (4.17)$$

$$a_k^j \in \{0,1\} \quad \forall j, k \in N_0 \quad (4.18)$$

$$h_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in N_0 \quad (4.19)$$

Burada 0 ile numaralandırılan düğüm  $BS$ 'dir. Kısıt açıklamalarında birincil veri orijinal veriyi; ikincil veri ise merkezi düğüm üzerinden iletilen birincil veriyi korumak için kaynak düğümde üretilen kopya veriyi ifade etmektedir. Amaç; (4.1) ile ağ ömrü  $T$ 'yi en çoklamaktır. (4.2) birincil veri için akış denge kısıtlarını oluşturmaktadır. (4.3) her bir düğümün ağ ömrü boyunca veri sezmek ve almak için harcadığı toplam enerji miktarının batarya enerjisini aşamayacağını gösterir. Her kaynak ve merkezi düğüm için kopyalanması gereken toplam veri miktarı (4.4-4.6) ile belirlenir. Buna göre (4.4) ve (4.5) merkezi düğüme giren birincil akışın kaynağından ikinci kez kopyalanmasını sağlarken (4.6) kopyalamanın sadece

merkezi düğüm üzerinden rotalanan veri için gerçekleşeceğini belirtir. Kısaca açıklamak gerekirse; bir  $k \in N_0$  düğümü birincil verisini iletirken  $l \in N_0$  merkezi düğümünü kullanıyorsa bu düğüm üzerinden iletilen veri  $k$  kaynağından tekrar kopyalanarak ikincil veri üretilmektedir. Ayrıca, ikincil veri için akış dengesi (4.7-4.9) ile sağlanır (4.7) kaynak düğümünden kopyalanan veri miktarının merkezi düğümünden geçen birincil veri miktarına eşit olmasını; (4.8) ve (4.9) da tüm kopya verilerin  $BS'$ ye ulaşmasını garanti eder. (4.10) ve (4.11) aynı kaynaktan çıkan birincil ve ikincil akışların düğüm ayrık yollardan rotalanmasını sağlamaktadır. Yani bir düğüm üzerinden birincil veri rotalanmışsa aynı kaynaktan çıkan ikincil verinin tekrar o düğümü kullanamayacağını belirtmektedir. (4.12) ve (4.13) dengeli kullanım kısıtlarını oluşturmaktadır ve merkezi düğüm dışındaki herhangi bir  $l \in N_0$  düğümüne diğer kaynak düğümlerden en fazla  $\alpha s_l T$  kadar veri girebileceğini; merkezi düğüme ise en az  $\alpha s_l T$  kadar veri girmesi gerektiğini belirtmektedir. Açılabilir toplam merkezi düğüm sayısı (4.14)'te  $K$  ile sınırlandırılmaktadır. (4.15) merkezi düğümlerin sadece birincil verilerin akışında kullanılabileceğini belirtir. İkincil veri için zorunlu çok yollu rotalama kaynak düğümün ikincil veriyi diğer düğümlere iletirken herhangi bir düğüme kopyaladığı verinin  $C$  katından daha fazla kopya veri göndermesini engelleyen (4.16) ile sağlanır. Son olarak, (4.17-4.19) işaret ve tamsayılı olma kısıtlarıdır.

#### 4.4 Alternatif Model

*CM* modelinde bir düğümün kendi verisini iletirken kullanabileceği merkezi düğümlere ilişkin herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır. Ancak; merkezi düğümler kötü niyetli saldırılara hedef olmaya ve daha çabuk bozulmaya yatkındır. Dolayısıyla kaynak düğümün birden fazla merkezi düğüm kullanmasına izin verilmesinin iki temel dezavantajı vardır. Bunlardan ilki birden fazla merkezi düğüm içeren bir iletim yolunda verinin özellikle merkezi düğümleri takip eden dış kaynaklarca ele geçirilme veya birincil akışının sekteye uğrama riskleri daha fazladır. Diğer yandan kopyalama yapılırken de aynı verinin kısmen veya tamamen ikiden fazla kopyasının oluşturulmasına neden olabilir. Bu duruma engel olup daha güvenli bir ağ modeli oluşturmak için alternatif bir strateji geliştirilmiştir. Alternatif modelde

(*restricted CM-CM<sup>rest</sup>*) her bir kaynak düğümün verisini iletirken kullanabileceği merkezi düğüm sayısı en fazla bir tanedir. Bu yaklaşım, belli durumlarda dışarıdan birden fazla merkezi düğüme aynı anda gerçekleştirilen saldırılardan ve merkezi düğüm bozulmalarından verileri korumaya karşı etkili bir yöntemdir. *CM<sup>rest</sup>* modeli *CM* modeline aşağıdaki karar değişkeni ve kısıtlar eklenerek elde edilmiştir:

$$z_j^k = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \in N_0 \text{ kaynağından çıkan veri } j \in N_0 \setminus \{k\} \text{ merkezi düğümünü kullanıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k.$$

Eklenen değişken için  $z_j^k = a_j^k h_j$  ilişkisi bulunmaktadır. Aşağıdaki kısıtlar  $z_j^k$  değişkeninin ifadesini doğrusallaştırmak ve kullanılan merkezi düğüm sayısı üzerinde bahsedilen kısıtlamayı oluşturmak için *CM* modeline eklenmiştir:

$$\sum_{j \in N_0 \setminus \{k\}} z_j^k \leq 1 \quad \forall k \in N_0 \quad (4.20)$$

$$z_j^k \leq a_j^k \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k \quad (4.21)$$

$$z_j^k \leq h_j \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k \quad (4.22)$$

$$z_j^k \geq a_j^k + h_j - 1 \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k \quad (4.23)$$

Sonuç olarak, *CM<sup>rest</sup>* modeli *CM* modeline (4.20-4.23) eklenerek elde edilmiştir.

## 4.5 Geçerli Eşitsizlikler

Bu bölümde sunulan modellerin çözüm sürelerini kısaltmak için kullanılan geçerli eşitsizlikler anlatılacaktır.

### 4.5.1 Bağlılık eşitsizliği (VI)

Bağlılık eşitsizliği (VI) *CM<sup>rest</sup>* için önerilmiştir ve *BS* ile aralarındaki mesafe haberleşme mesafesinden büyük olan yani *BS* ile doğrudan bağlantılı olmayan düğümler için etkindir. Eğer bir kaynak düğüm *BS*'ye doğrudan bağlı değilse ve verisini *BS*'ye iletirken kullandığı rotalarda hiç merkezi düğüm bulunmuyorsa; verisini iletmek için *BS*'ye doğrudan bağlı en az  $G = \left\lceil \frac{1}{\alpha} \right\rceil$  tane düğüm kullanmalıdır.

Burada bir  $j \in N_0$  düğümü  $BS$ 'ye doğrudan bağlı ise değeri 1; değilse 0 olan  $b_{j0}$  parametresi de kullanılarak  $VI$  elde edilmiştir. Aşağıdaki eşitsizlik (4.24)  $CM^{rest}$  için geçerlidir.

$$\sum_{j \in N_0} a_j^k b_{j0} \geq G \left( 1 - b_{k0} - \sum_{j \in N_0} z_j^k \right) \quad \forall k \in N_0 \quad (4.24)$$

**Önerme 4.1:** Ağdaki her  $k \in N_0$  düğümü için (4.24) geçerlidir.

**İspat:** Ağdaki her  $k \in N_0$  düğümü için  $a_j^k, b_{j0} \in \{0,1\}$  olduğundan  $\sum_{j \in N_0} a_j^k b_{j0} \geq 0$  geçerlidir. Elde edilen kısıta *negatif olmama eşitsizliği* diyelim.

- a) Eğer  $b_{k0} = 1$  ise, teoremdaki eşitsizlik (4.24),  $\sum_{j \in N_0} a_j^k b_{j0} \geq 0$  eşitsizliğine denk olur. Teoremdaki kısıtın sağ tarafı pozitif olmayan bir değere sahipken sol tarafı negatif olmayan bir değere sahiptir. Böylece, eşitsizliğin sağ tarafı işlevsiz olduğundan, kısıt negatif olmama eşitsizliği tarafından baskılanmaktadır ve sonuç olarak (4.24) sağlanmaktadır.
- b) Eğer  $b_{k0} = 0$  ise,
  - i. Eğer  $\sum_{j \in N_0} z_j^k = 1$  ise, teoremdaki kısıt  $\sum_{j \in N_0} a_j^k b_{j0} \geq 0$  şeklinde olmaktadır. Teoremdaki kısıtın sağ tarafı sıfıra eşit olduğundan negatif olmama eşitsizliği sağlanmaktadır ve böylelikle (4.24) geçerli olmaktadır.
  - ii. Eğer  $\sum_{j \in N_0} z_j^k = 0$  ise, teoremdaki kısıt  $\sum_{j \in N_0} a_j^k b_{j0} \geq G$  kısıtıyla aynı olmaktadır. Modeldeki kısıt (4.12) ve (4.13)'ten dolayı bir  $k \in N_0$  düğümü  $BS$ 'ye doğrudan bağlı değil ve verisini iletirken merkezi düğüm kullanmıyorsa ona doğrudan bağlı en az  $G$  tane düğüm kullanılmalıdır. Böylelikle  $\sum_{j \in N_0} a_j^k b_{j0} \geq G$  kısıtı da geçerli olduğundan ispat tamamlanmıştır. ■

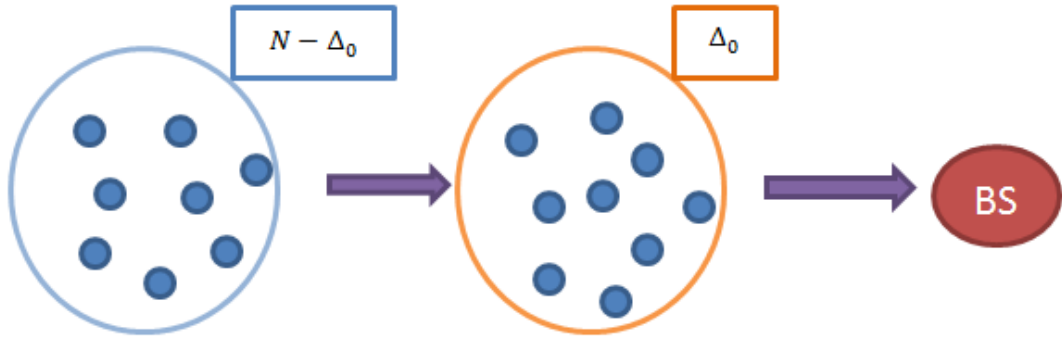
#### 4.5.2 Aday küme indirgeme eşitsizliği (V2)

$BS$ 'ye veri transferinin son ayağını ona doğrudan bağlı düğümler gerçekleştirmektedir. Fakat bu düğümlerin veri alma kapasiteleri (4.12) ve (4.13)'ten

dolayı ağın bütün veri trafiğini  $BS$ 'ye iletmede yeterli olmayabilir. Dolayısıyla da bu düğümlerden en az biri merkezi düğüm seçilmelidir.

$$\Omega \geq F \left( 1 - \sum_{j \in N_0} b_{j0} h_j \right) \quad (4.25)$$

Burada,  $\Delta_0 = \{j \in N_0: b_{j0} = 1\}$  ve  $\Omega = |\Delta_0|$  sırasıyla  $BS$ 'ye doğrudan bağlı düğüm kümesini ve böyle düğümlerin sayısını belirtmektedir. Ayrıca  $F = \left\lceil \frac{N}{1+\alpha} \right\rceil$  olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla (4.25), eğer  $\Delta_0$ 'daki sensörlerin toplam veri alma kapasitesi diğer düğümlerin toplam verisini  $BS$ 'ye ulaştırmaya yeterli değilse  $\Delta_0$ 'daki düğümlerden en az birinin merkezi düğüm olarak atanması gerektiğini belirtmektedir.



Şekil 4.8 : Örnek bir KAA.

Hiç merkezi düğümün olmadığı bir durumda Şekil 4.8'deki ağın olurlu olabilmesi için  $\Delta_0$  kümesinin veri transfer kapasitesinin en az  $N - \Delta_0$  kümesinden çıkan veri miktarını  $BS$ 'ye iletecek kadar olması gerekmektedir. Daha rahat anlaşılması adına bütün algılayıcıların birim zamanda veri sezme kapasiteleri bakımından homojen olduğu yani  $s_l = s \forall l \in N_0$  durumu ele alındığında:

$$\Omega \alpha s T \geq (N - \Omega) s T \Rightarrow \Omega \alpha \geq N - \Omega \Rightarrow \Omega(\alpha + 1) \geq N \Rightarrow \Omega \geq \left\lceil \frac{N}{1 + \alpha} \right\rceil$$

çıkarmasına ulaşılır.  $F = \left\lfloor \frac{N}{1+\alpha} \right\rfloor$  için  $\Omega \geq F$  ise olurlu bir ağ var demektir. Genel durumda (4.25)'nin geçerliliği aşağıdaki önermede ispatlanmaktadır.

**Önerme 4.2:** Eğer  $\Omega < F$  ise  $\Delta_0$  kümesindeki sensörlerden en az biri merkezi düğüm olarak seçilmelidir. Bu sebeple (4.25) geçerlidir.

**İspat:** (4.25)'nin ispatı tümevarım yöntemiyle gerçekleştirilecektir.

- a. Eğer  $\sum_{j \in N_0} b_{j_0} h_j = 0$  ise eşitsizlik  $\Omega \geq F$  haline gelir. Bu durumda problem olurludur.
- b. Eğer  $\sum_{j \in N_0} b_{j_0} h_j = 1$  ise eşitsizlik  $\Omega \geq 0$  olur ve bu durum da problem için olurludur.
- c. Eğer  $n \geq 1$  için  $\sum_{j \in N_0} b_{j_0} h_j = 1 + n$  ise eşitsizlik  $\Omega \geq -Fn$  olur ki bu durum da problem için olurludur. ■

## 5. TEST SONUÇLARI

Tezin bu bölümünde hem  $CM$ 'nin ağ güvenilirliği ve ağ ömrü üzerindeki etkisini hem de geçerli eşitsizliklerin çözüm süresine katkısını incelemek için gerçekleştirilen bazı testlerin sonuçları sunulmaktadır.

### 5.1 Ağ Ömrü ve Güvenilirliği Kıyaslaması

Tez kapsamında önerilen  $CM$  stratejisi, ağ güvenilirliğini arttırmak amacıyla izlediği yollar üzerinde aksaklık yaşanması ihtimali nispeten yüksek olan verilerin kopyalanmasını ve ağın enerji verimli bir şekilde işletilmesini içeren bir stratejidir. Burada kısmen kopyalama yapılmasına eğer sensörlerin dengeli kullanıldığı ve herhangi bir kopyalamanın yapılmadığı duruma göre ağ ömrü açısından daha avantajlı bir sonuca ulaşılabileceği izin verilmektedir. Dolayısıyla ağ ömrünü olumsuz yönde etkilemeden ağın güvenilirliğinin iyileştirilmesini sağlayacaktır. Bu bölümde  $CM$ 'nin herhangi bir kopyalama yapılmayan dengeli tek kopyalı strateji  $bNM$  ve her kaynağın bütün verisini kopyalayarak gönderdiği dengeli çift kopyalı strateji  $FDM$  ile ağ ömrü ve güvenilirliği açılarından karşılaştırması yapılacaktır. Sensörlerin kullanım oranlarının dengelenmesi koşulu olmadığında ağ ömrü açısından en avantajlı strateji tek kopyalı strateji olacaktır. Fakat tanım itibarıyla  $CM$  stratejisinde eğer ağ ömrü olumlu yönde değişecekse merkezi düğüm seçilmesine izin verilip merkezi düğümler için veri iletim kapasitesi genişletilirken bu durum avantajlı olmayacaksa merkezi düğüm açılmamakta ve dolayısıyla da  $CM$  stratejisi  $bNM$ 'ye indirgenmektedir. Bu nedenle  $bNM$  ile elde edilecek ağ ömrü  $CM$  için bir alt sınır tanımlayacaktır. Bununla beraber  $FDM$  ile elde edilecek ağ ömrü değerinin pek çok örnekte önemli derecede çok daha kısa olması beklenmektedir. Diğer yandan ağ güvenilirliğinde çift kopyalı strateji daha üstün olacaktır.  $CM$  için beklenti ağ ömrü açısından her iki stratejiden ve ağ güvenilirliği açısından da tek kopyalıdan daha iyi performans göstermesidir.

Kıyaslamalarda dikkate alınacak iki stratejide de amaç  $CM$ 'de olduğu gibi enerji-verimli veri iletimini sağlayarak ağ ömrünü en çoklamaktır. İlk strateji dengeli tek kopyalı veri iletiminin yapıldığı  $bNM$ 'dir. Dengeli tek kopyalı strateji ( $bNM$ )'de her



kaynak düğüm, ürettiği veriyi yalnızca bir sefer  $BS$ 'ye iletilir ve veriler iletilirken ağ güvenilirliğini arttırmaya yönelik olarak sadece sensörlerin enerjilerinin dengeli kullanımı göz önünde bulundurulmaktadır. Diğer strateji ise ağ güvenliğini arttırmak için her kaynak düğümün kendi verisinin iki kopyasını düğüm ayrık yollar üzerinden  $BS$ 'ye gönderdiği çift kopyalı ( $FDM$ ) stratejisidir. Sadece merkezi düğüm üzerinden geçen verinin kaynağı tarafından kopyalanarak iki kez  $BS$ 'ye iletiildiği  $CM$  bu bakımdan  $bNM$  ve  $FDM$ 'nin melezi olan bir çoklu kopyalama stratejisidir.

Bu açıklamalar ışığında 4. Bölümde yapılan tanımlar kullanılarak  $bNM$  stratejisine ait doğrusal programlama modeli aşağıdaki gibi kurulabilir:

$$\text{maks } T \quad (5.1)$$

öyle ki:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = \begin{cases} s_i T & i = k \\ -s_i T & i = 0 \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N_0 \quad (5.2)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} PT X_{ij} x_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A} PR x_{ji}^k \leq E_{ini} \quad \forall i \in N_0 \quad (5.3)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,l) \in A} x_{il}^k \leq \alpha s_l T \quad \forall l \in N_0 \quad (5.4)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N_0 \quad (5.5)$$

Burada (5.1)'de amaç  $CM$ 'de olduğu gibi ağ ömrünü en çoklamaktır. Ayrıca  $bNM$ 'de kopya veri olmadığından sadece birincil akışın planlanmasına çalışılmaktadır. (5.2) birincil veri için akış denge kısıtları ve (5.3) veri alış verişinde harcanan enerji tüketim kısıtlarıdır. Dengeli kullanım kısıtı (5.4), ağdaki hiçbir düğümün kendi ürettiği verinin  $\alpha$  katından fazlasını transfer edemeyeceğini belirtmektedir. (5.5) ise işaret kısıtlarıdır ve çoklu yollar kullanımına izin verilmesi nedeniyle karar değişkenlerinin sürekli değerler alabilmektedir.

Diğer yandan her sensörün verisini iki kopya halinde  $BS$ 'ye ilettiği  $FDM$  stratejisi için kullanılacak karma tamsayı programlama modeli aşağıdaki gibidir:

$$\text{maks } T \quad (5.6)$$

öyle ki.:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = \begin{cases} s_i T & i = k \\ -s_i T & i = 0 \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N_0 \quad (5.7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} y_{ji}^k = \begin{cases} s_i T & i = k \\ -s_i T & i = 0 \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N_0 \quad (5.8)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij}(x_{ij}^k + y_{ij}^k) + \sum_{(j,i) \in A} PR(x_{ji}^k + y_{ji}^k) \leq E_{ini} \quad \forall i \in N_0 \quad (5.9)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq M a_j^k \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k \quad (5.10)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^k \leq M(1 - a_j^k) \quad \forall j, k \in N_0: j \neq k \quad (5.11)$$

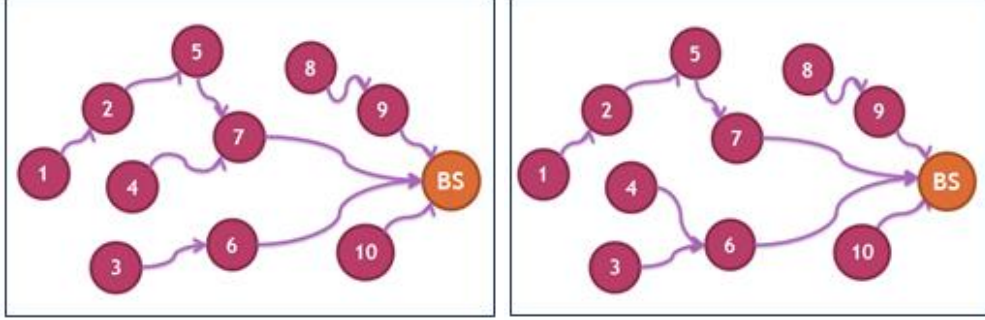
$$x_{ij}^k, y_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N_0 \quad (5.12)$$

$$a_k^j \in \{0,1\} \quad \forall j, k \in N_0 \quad (5.13)$$

Burada (5.7) ve (5.8) sırasıyla birincil ve ikincil veri için akış denge kısıtlarını oluşturmaktadır. (5.9) birincil ve ikincil veri alış verişinde harcanan enerji tüketim kısıtıdır. (5.10-5.11) orijinal ve kopya verilerin düğüm ayrık yollar üzerinden rotalanmasını sağlayan kısıt setini ifade etmektedir. (5.12)-(5.13) ise işaret kısıtlarıdır.

Belirtilen kopyalama stratejilerinin işleyişleri 10 özdeş sensör ve bir  $BS$ 'nin olduğu örnek durum için Şekil 5.1 ve 5.2'deki gibi gösterilmektedir. Her ne kadar ele alınan stratejilerin hepsinde çoklu yollar kullanılmasına izin verilse de gösterimin net olması açısından her kaynak için tek yöllü rotalama yapıldığı yani verilerin parçalara ayrılmadan tek bir yol üzerinden kaynağında  $BS$ 'ye iletiildiği durum gösterilmiştir.

Ayrıca  $bNM$ 'nin daha iyi anlaşılması açısından dengeleme yapılmayan tek kopyalı durum durum da Şekil 5.1.a'da gösterilmiştir. Şekillerde birincil verilerin takip ettiği rotalar düz çizgi; kopya verilerininki ise kesikli çizgi ile gösterilmektedir.



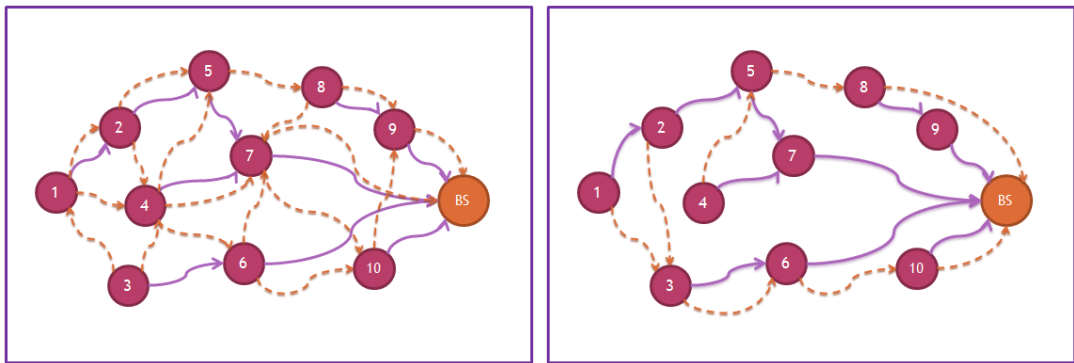
(a)

(b)

Şekil 5.1 : (a) tek kopyalı ve (b) dengeli tek kopyalı strateji.

Şekil 5.1.(a) ve (b)'deki ağlarda her düğüm kendi sezdiği veriyi tek kopya halinde  $BS$ 'ye göndermektedir. Şekil 5.1.a'daki veri iletim yapısında 7 numaralı düğüm, 1,2,4 ve 5 numaralı düğümlerin verisini transfer etmektedir. Böylelikle ağdaki diğer düğümlere kıyasla daha yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 5.1.b'deki ağda ise dengeli sensör kullanımı halinde olası çözüm gösterilmiştir.

Burada 7 numaralı sensörün yükünün hafifletilmesi adına 4 numaralı düğümün verisi 6 numaralı düğüm üzerinden yönlendirilmiştir.



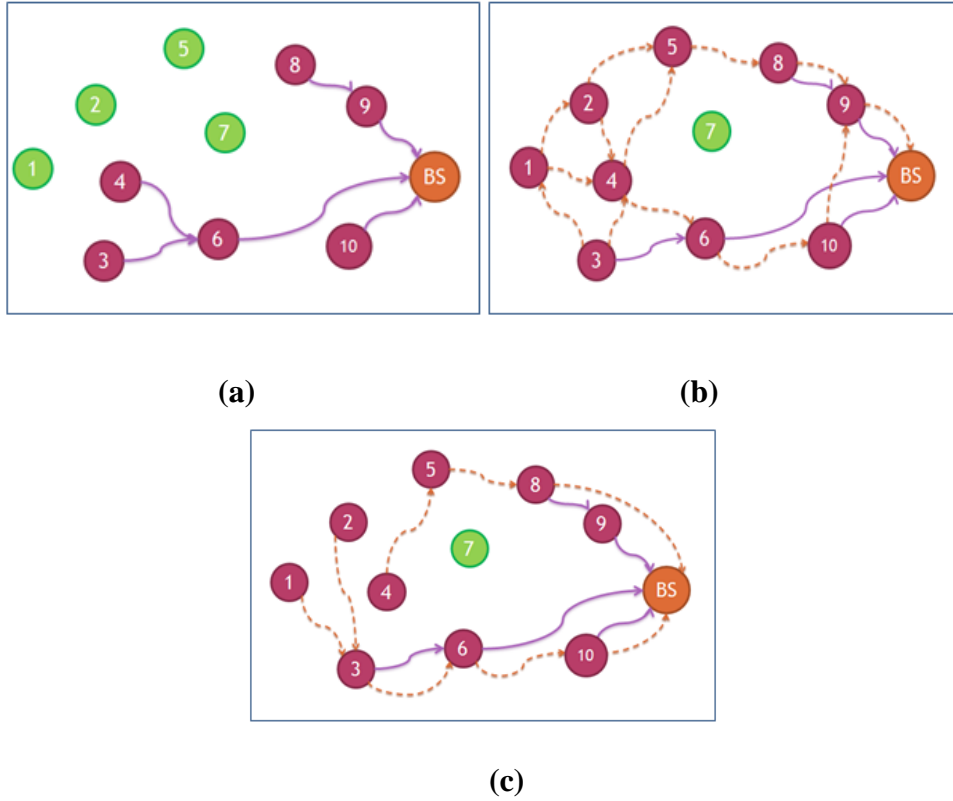
(a)

(b)

Şekil 5.2 : (a) çok kopyalı ve (b) kısmi çok kopyalı strateji.

Şekil 5.2.(a)'da her düğüm ürettiği verinin iki kopyasını *BS*'ye iletmektedir. Kaynak düğümden çıkan ikincil verinin iletimi orijinal verinin iletilirken kullanmadığı düğümler üzerinden gerçekleşmektedir. Şekil 5.2.b'de ise sadece orijinal verisini iletirken merkezi düğüm kullanan düğümler ilgili veriyi kopyalayarak tekrar *BS*'ye iletmektedir. Burada 7 numaralı düğümün transfer ettiği veri miktarı fazla olduğundan 7 numaralı düğüm bir merkezi düğümdür ve onu kullanan 1, 2, 4 ve 5 numaralı düğümler *BS*'ye kopya veri göndermektedir.

Bahsedilen üç farklı kopyalama stratejisini ağ bütünlüğü açısından kıyaslamak için Şekil 5.3'te 7 numaralı düğümün çalışmadığı durumlar ele alınmaktadır.



Şekil 5.3 : (a) *bNM*, (b) *FDM* ve (c) *CM* stratejisi ile veri kaybı.

Şekil 5.3.a'ya göre *bNM* stratejisinde, ağ güvenliği göz önünde bulundurulmadığından 1, 2, 5 ve 7 numaralı düğümlerin *BS* ile bağlantılarının kopmasından ötürü ağdaki verilerin %40'ı kaybedilmektedir. Diğer bir yandan, Şekil 5.3.b'ye göre *FDM* stratejisinin kullanıldığı durumda, bütün düğümler *BS*'ye iki kere veri gönderdiğinden bozulan 7 numaralı düğüm dışındaki tüm sensörler hala *BS* ile

iletişim kurabilmektedirler. Fakat sadece düğüm 1, 2, 4 ve 5 numaralı düğümlerin kopya verileri birincil veri kaybından ötürü gereklidir; yani geriye kalan düğümlerin ikincil verileri gereksiz yere üretilmiştir. Şekil 5.3.c'de *CM* ile ise 1, 2, 4 ve 5 numaralı düğümlerin birincil verilerinin transfer edildiği rotalar zarar görmüş dahi olsa ikincil veriler düğüm ayrık yollar üzerinden iletildiğinden *BS*'ye erişim hala sağlanabilmektedir. *FDM*'nin aksine *CM* stratejisinde gereksiz veri üretimi yapılmamıştır.

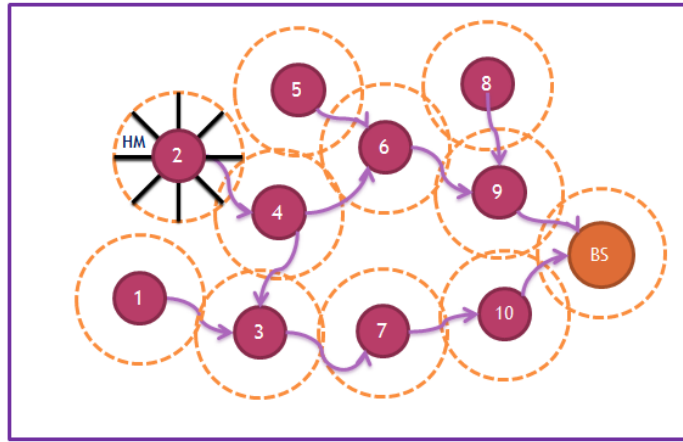
*FDM* ve *bNM* ile elde edilecek ağ ömrü değerleri *CM* için alt sınır oluşturmaktadır. *FDM* stratejisinde her kaynak düğüm kendi verisini iki kez *BS*'ye göndermektedir; fakat *CM*'de koşullu kopyalama bulunmaktadır. Bu durumda *FDM* stratejisinin kullanıldığı bir ağın ömrü *CM* stratejisinin kullanıldığı bir ağinkinden daha uzun olamayacaktır. Ayrıca *CM*'nin ağ ömrü en kötü durumda *bNM*'dekine eşit olacaktır. Bunun nedeni *CM*'de sadece ağ ömrünü iyileştirecekse merkezi düğüm açılmasına izin verilmesi ve aksi durumda *CM*'nin *bNM*'ye indirgenmesidir.

### 5.1.1 Parametre ve varsayımlar

Tez kapsamında çalışılan güvenilir KAA tasarımı problemi homojen KAA yapısı üzerinde ağ akış problemi şeklinde modellenmiştir. Testler sırasında kullanılacak ağlardaki  $G = (N, A)$  yönlü çizgesinde  $N$ , başlangıç enerjisi ve birim zamanda sezilen veri miktarı bakımından özdeş  $|N|-1$  tane sensör ve 1 adet sınırsız enerjiye sahip baz istasyonundan (*BS*) oluşan düğüm kümesidir. Yani  $N_0 = N \setminus \{BS\}$  ilişkisi bulunmaktadır. Ayrıca  $A$ , sensörler arasındaki yönlü doğrudan iletişim bağlantılarının kümesidir. Eğer  $j \in N$  sensörü  $i \in N_0 \setminus \{j\}$  sensörünün haberleşme mesafesi içindeyse bu iki sensör birbirine veri gönderebilmektedir; yani  $(i, j) \in A$  ve  $G$  yönlü bir çizge olduğundan aynı zamanda  $(j, i) \in A$ 'dır. Veri iletiminde kullanılan enerji modeli Cheng ve diğ. (2008)'deki gibidir. Yani;  $(i, j) \in A$  için  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne bir bit veri gönderilirken harcanan enerji miktarı  $P_{TX_{ij}} = P_{elec} + \epsilon d_{ij}^\beta$  şeklinde hesaplanmaktadır. Burada  $P_{elec}$ , elektronik enerjisini;  $\epsilon$ , verici yükseltici etkililiğini ve kanal durumunu belirten bir katsayıyı;  $d_{ij}$  ise  $i$  ve  $j$  sensörleri arasındaki Öklid mesafesini ifade etmektedir.

### 5.1.2 Test kümeleri

Performans analizi için dairesel alanlar üzerinde rastgele oluşturulmuş farklı büyüklükteki ağlar üretilmiştir. Sensörlerin ve *BS*'nin yerleri rastgele dağılıma göre belirlenmiştir. Sensörlerin konuşlandırıldığı alanın büyüklüğü sensör sayısı ile orantılı olarak değişmektedir. İncelenen örnek büyüklükleri 21 düğümlü ağlardan 71 düğümlü ağlara kadardır. Her boyut için 10 farklı rasgele ağ üretilmiştir. Tüm örneklerde  $E_{ini} = 10^6$ ,  $PRX = 50$  ve  $C = 0,6$  olarak alınmıştır. Ayrıca tüm testlerdeki sensörler özdeşdir ve ağdaki her  $i \in N_0$  sensörü için  $s_i = 1$  kabul edilmiştir. Diğer parametreler ağ büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir. Ağdaki tüm sensörler için azami haberleşme mesafesinin sezilen ağın alanının yarıçapı kadar olduğu varsayılmıştır. Yani ağdaki iki sensör birbirine en fazla haberleşme mesafesi kadar uzaklıktaysa doğrudan veri alışverişinde bulunabilirler. Bu durum Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.4 : Haberleşme mesafesi.

Şekil 5.4'te 10 düğümlü bir ağda düğümlerin haberleşme mesafeleri ve birbiriyle olan veri alışveriş durumu gösterilmektedir. Düğümlerin etrafındaki kesikli çizgiler haberleşme alanlarını, düğümler arasındaki düz çizgili oklar da veri akış rotalarını ifade etmektedir. Örneğin; düğüm 2'den çıkan siyah çizgiler onun diğer düğümlere veri gönderebilmesi ve onlardan veri alabilmesi için aralarında olması gereken maksimum uzaklığı belirtmektedir. Düğümden bu şekilde çıkan sonsuz sayıda hayali çizgi düğüm etrafında yarıçapı haberleşme mesafesi kadar olan bir çember oluşturmaktadır. Böylelikle her düğümün etrafında hayali bir disk şeklinde olan

iletişim çemberi oluşmaktadır. Herhangi iki düğümün iletişim çemberleri kesişiyorsa bu düğümler veri alış verişinde bulunabilmektedir. Örneğin; düğüm 4, sadece düğüm 2, 3, 5 ve 6 ile doğrudan iletişim kurabilirken diğer düğümlere ancak belirtilen düğümler üzerinden veri gönderebilmektedir.

Bir  $(i, j) \in A$  ayrıtı üzerinde  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne birim veri aktarılırken  $i$ 'nin harcadığı enerji miktarı olan  $PTX_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  arasındaki uzaklığın karesiyle ( $d_{ij}^2$ ) orantılı olarak artmaktadır. Ağda açılmasına izin verilen azami merkezi düğüm sayısını ifade eden  $K$  parametresinin değeri  $K = 0,1 * |N_0|$  olacak şekilde belirlenmektedir.  $\alpha$  parametresi ise  $|N| \leq 51$  için ağ büyüklüğüyle orantılı olarak  $\alpha = 0,1 + 0,02 * |N_0|$  formülüne göre hesaplanmaktadır. 51 düğümden daha çok düğüme sahip ağlar için  $\alpha$  değeri 1,1 olarak kabul edilmiştir.

Son olarak bu tezdeki bütün örneklerde ticari çözücü ile çözüm süresi limiti dört saat olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla çalışmada sunulan tüm test sonuçları maksimum dört saatlik süre içerisinde elde edilmiş sonuçlardır. Ayrıca tüm testler Java 4.4.1 programı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

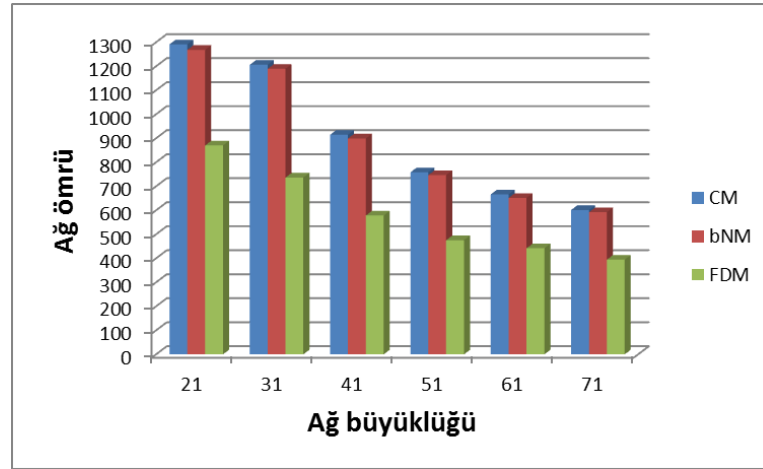
### 5.1.3 Ağ ömrünün kıyaslanması

CM ve diğer kopyalama stratejileri 21 düğümlü ağlardan başlayıp 71 düğümlü ağlara kadar olan ağ büyüklükleri üzerinde test edilmiştir. Her büyüklük için 10 farklı rastgele veri seti oluşturulmuştur ve bahsedilen üç strateji aynı veri setleri üzerinde test edilmiştir. Çizelge 5.1'de ortalama ağ ömrü değerleri sunulmaktadır.

Çizelge 5.1 : Ortalama ağ ömrü değerleri.

$ N $	FDM	bNM	CM	Açılan MD Sayısı
21	870,3±94,4	1268,2±167,4	1291,3±160,8	1,1
31	736,6±169,5	1189,2±313,3	1206,2±306,4	1,3
41	578,0±137,1	899,3±249,7	915,0±246,3	1,5
51	475,4±54,5	746,5±92,0	758,5±89,6	1,6
61	441,8±39,5	651,5±68,4	666,4±67,1	2,5
71	394,3±39,1	591,9±73,7	601,2±136,4	4,0
<b>Ort.</b>	<b>582,7</b>	<b>906,4</b>	<b>891,1</b>	<b>2,0</b>

Çizelge 5.1’de *CM* ve diğer kopyalama stratejileri ile farklı ağ büyüklüklerine ait onar örnek için elde edilen ortalama ağ ömrü ve %95 güven aralığı değerleri bulunmaktadır. *FDM*’nin sunduğu değerler *CM*’ninkilerden her zaman daha küçüktür. Çünkü *FDM*’de her düğüm iki kez *BS*’ye veri gönderirken *CM*’de sadece merkezi düğümler üzerinden veri ileten düğümler yalnızca merkezi düğüm üzerinden giden kadar verilerini iki kez *BS*’ye göndermektedirler. Diğer bir taraftan çizelgeye göre *CM* ile her zaman *bNM*’den daha büyük ağ ömrü değerleri bulunmuştur. Sebebi ise *CM*’de ağ ömründe iyileşme sağladığı için merkezi düğüm açılmasına izin verilmesidir. Çizelgenin en sağındaki sütun incelendiğinde ağ büyüklüğüyle orantılı olarak artan merkezi düğüm sayısı görülmektedir. Merkezi düğümlerin sayısı ile beraber *CM* ve *bNM* ile elde edilen ağ ömrü değerleri arasındaki fark da artmıştır. Dolayısıyla, beklenildiği gibi *CM*, *FDM* ve *bNM*’den daha büyük ağ ömrü değerleri sunmaktadır. Şekil 5.5’te Çizelge 5.1’deki verilerin ağ büyüklüğüne göre değişimi belirtilmektedir.



Şekil 5.5 : Ortalama ağ ömrü değerleri.

Şekil 5.5’te net bir şekilde *CM*’nin *FDM* ve *bNM*’ye göre daha yüksek ağ ömrü değerleri sunduğu görülmektedir. Çizelge 5.2’de *CM*’nin diğer stratejilere göre ağ ömrü üzerindeki ortalama iyileştirme yüzdeleri bulunmaktadır.



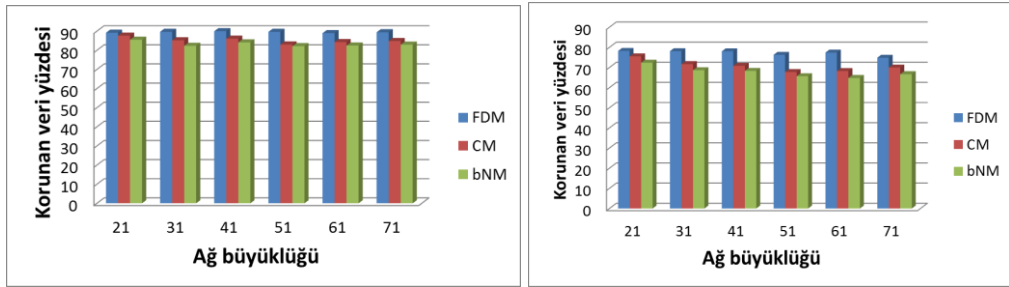
Çizelge 5.2 : *CM*'nin ağ ömrü üzerindeki iyileştirme yüzdesi.

Test	% <i>CM</i> - <i>FDM</i>	% <i>CM</i> - <i>bNM</i>
21	48,4	1,8
31	63,8	1,4
41	58,3	1,8
51	59,6	1,6
61	50,8	2,3
71	52,5	1,6

Çizelge 5.2'de ilk ve ikinci sütunda sırasıyla *CM*'nin, *FDM*'ye ve *bNM*'ye göre ağ ömründe sağladığı iyileşme yüzdeleri belirtilmiştir. Sonuç olarak tüm testlerin ortalaması alındığında *CM*, *FDM*'den % 55,5 ve *bNM*'den % 1,8 daha iyi ağ ömrü değerleri sunmaktadır.

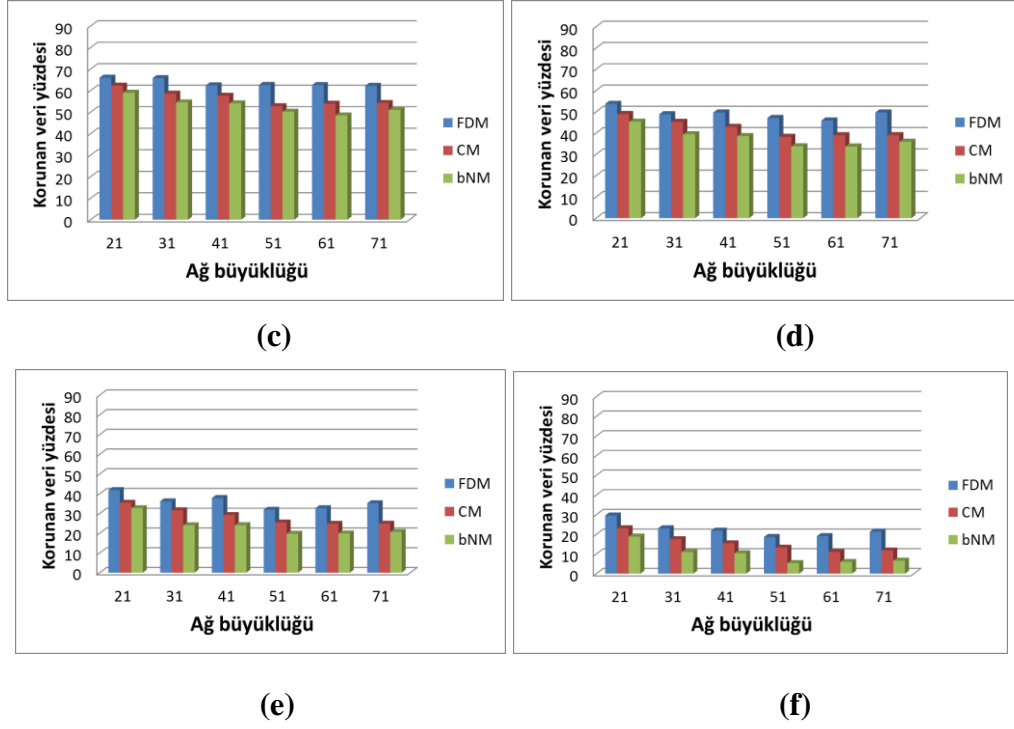
#### 5.1.4 Ağ güvenilirliğinin kıyaslanması

Bu bölümde *bNM*, *FDM* ve *CM* stratejileri ağ güvenilirliği açısından kıyaslanmıştır. Ağ güvenilirliği arıza/aksaklık durumunda başarıyla *BS*'ye iletilebilen veri miktarı cinsinden ölçülmüştür. Bu amaçla her strateji için ağdaki belli oranlarda düğümün hatalı/arızalı olduğu varsayıp ağdaki toplam veri kaybı yüzdeleri incelenmiştir. Oluşturulan senaryolarda hatalı/arızalı düğüm sayısının *BS* dışındaki toplam düğüm sayısına oranı %10-%60 arasında değişmektedir. Ağdaki bir düğümün bozulan düğüm olarak seçilme olasılığı o düğümün üzerinden geçen veri miktarıyla orantılı olarak artmaktadır. Belirtilen şekilde bir olasılık fonksiyonu kullanılarak büyüklüğü 71 düğümlü ağlara kadar değişen ağlarla her kopyalama stratejisi için korunan veri yüzdeleri hesaplanmıştır. Belirtilen ölçümler Şekil 5.6'da mevcuttur.



(a)

(b)

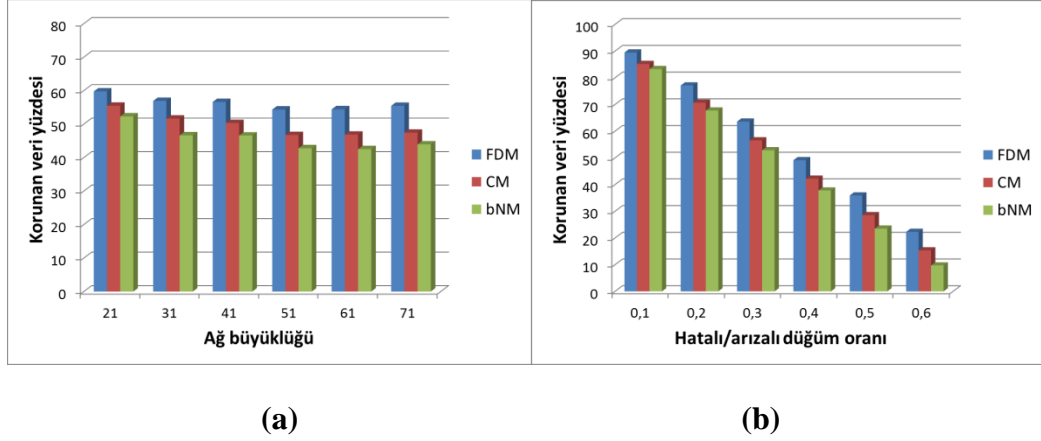


Şekil 5.6 : Bozulma oranı (a) %10, (b) %20, (c) %30, (d) %40, (e) %50 ve (f) %60 olduğu durumlarda ortalama korunan veri yüzdeleri.

Şekil 5.6'ya göre en fazla veri korunumunu sağlayan strateji *FDM*'dir. *FDM*'de veriler *BS*'ye düğüm ayrık yollar üzerinden iki kez iletiildiğinden en yüksek veri korunum yüzdesinin *FDM* ile elde edilmesi beklenen bir durumdur. Herhangi bir kopyalama yapılmayan *bNM*'nin hata toleransı *FDM* ve *CM*'ye göre daha düşük olduğundan korunan veri yüzdesi de tüm bozulma senaryolarında onlardan daha düşüktür.

Şekil 5.6'daki grafikler mercek altına alındığında, hata oranının % 10 ve % 20 olduğu durumlarda ağ büyüklüğü artsa bile her bir strateji içerisindeki korunan veri yüzdesinde belirgin bir fark görülmemektedir. Diğer hata oranlarının varlığında ağ büyüklüğü arttıkça her bir strateji ile elde edilen veri korunumu genellikle azalmaktadır. Bunun sebebi ise ağ büyüdükçe hem hatalı düğüm sayısının hem de birbiriyle iletişimde bulunan düğüm sayısının artmasıdır. Ayrıca hata oranı ve ağ büyüklüğü arttıkça stratejilerin korunan veri yüzdeleri birbirinden farklılaşmaktadır. Yukarıdaki grafikte düşük bozulma oranları göz önünde bulundurulduğunda *bNM* ve *CM*'nin korunan veri yüzdeleri birbirine yakın görülmektedir. Hatalı/arızalı düğüm sayısı arttıkça *bNM* ve *CM*'nin korunan veri yüzdeleri arasındaki fark da artmaktadır.

Görüldüğü gibi farklı bozulma senaryoları altında ağ büyüklüğü arttıkça *FDM*, *bNM* ve *CM*'nin kendi içlerinde oluşturduğu sonuçlar benzerdir. Böylelikle Şekil 5.7'de her bir strateji için hem ağ büyüklüğüne göre hem de hatalı/arızalı düğüm oranına göre ortalama korunan veri yüzdelerinin grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 5.7 : (a) Ağ büyüklüğü; (b) Hata oranına göre ortalama veri korunum yüzdeleri.

Şekil 5.7.a'daki grafik her bir strateji ve ağ büyüklüğü için elde edilen sonuçların hata oranına göre gruplandırılarak ortalama değerlerinin alınmasıyla elde edilmiştir. Belirtilen grafiğe göre stratejilerin kendi içlerinde sağladıkları veri korunum yüzdelerinin ağ büyüklüğü değişse bile birbirine benzer olduğu görülmektedir. Şekil 5.7.b'deki grafik ise her bir strateji ve hata oranı için elde edilen sonuçların ağ büyüklüklerine göre gruplandırılarak ortalama değerlerinin alınmasıyla elde edilmiştir. İkinci grafiğe göre ağ büyüklüğünden bağımsız bir şekilde her bozulma oranı senaryosunda üç stratejinin de korunan veri yüzdesi ilişkisinin birbiriyle benzer olduğu görülmektedir.

Ağ ömrü ve güvenilirliği testi sonuçlarına göre kolaylıkla söylenebilir ki *FDM* en güvenilir *bNM* ise en az güvenilir stratejilerdir. *CM* ise ağ ömrü ve güvenilirliği arasındaki ödünleşimi dengeleyen *FDM* ile *bNM* arasında bir stratejidir. Sonuçlara göre *CM*'nin ağ ömrü *FDM*'den ortalama %55,5 ve *bNM*'den de %1,8 daha yüksektir. Şekil 5.7.a'daki değerler kullanılarak *CM*, *FDM* ve *bNM* için çeşitli bozulma senaryoları altında elde edilen ortalama korunan veri yüzdeleri ise sırasıyla % 50, %56 ve % 46'dır. *CM*'de, *FDM*'ye göre % 10 daha az veri korunumuna razı olarak % 56 daha yüksek ağ ömrü elde edilmiştir. Çizelge 5.3'te her bir strateji için

ağ ömrü boyunca  $BS$ 'ye ulaşan ortalama veri miktarları belirtilmektedir. Çizelgedeki değerler tüm testlerin ortalama sonuçlarını yansıtmaktadır.

Çizelge 5.3 :  $BS$ 'ye ulaşan ortalama veri miktarları.

Strateji	$FDM$	$CM$	$bNM$
$BS$ 'ye ulaşan veri miktarı	327,8	450,8	408,1
Ağ ömrü	582,7	906,4	891,1
Korunan veri yüzdesi (%)	% 56,2	% 49,7	% 45,8

Test sonuçlarına göre teorik olarak  $FDM$ ,  $CM$ 'ye göre daha güvenilir bir strateji olsa da sağladığı ağ ömrü değerleri  $CM$ 'den daha düşüktür. Burada  $BS$ 'ye ulaşan toplam veri miktarı da önem kazanmaktadır. Çizelge 5.3'te  $CM$  ve diğer kopyalama stratejilerinin sundukları ağ ömrü ve veri korunum yüzdeleri kullanılarak  $BS$ 'ye ulaşan ortalama veri miktarları elde edilmiştir. Sonuçlara göre  $BS$ 'ye ulaşan veri miktarı açısından  $CM$ ,  $FDM$ 'den ortalama %38 ve  $bNM$ 'den %11 daha yüksek değerler sunmaktadır.

## 5.2 Geçerli Eşitsizliklerin Etkisi

Bu bölümde önerilen geçerli eşitsizliklerin  $CM$  ve  $CM^{rest}$  modellerinin çözüm süreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak aday küme indirgeme eşitsizliğinin  $CM$ 'nin çözüm süresi üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Daha sonra bağlantılık eşitsizliği ve aday küme indirgeme eşitsizliğinin  $CM^{rest}$ 'in çözüm süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Testler 41 ve 51 düğüme sahip 10'ar adet rastgele üretilmiş ağ üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geçerli eşitsizlik testlerinde kullanılan parametreler ağ ömrü ve güvenilirliğini ölçmek için gerçekleştirilen testlerde kullanılan parametrelerle aynıdır.

### 5.2.1 $CM$ için gerçekleştirilen testler

İlk olarak aday küme indirgeme eşitsizliği ( $V2$ ) kısıtı olan (4.25)'nin  $CM$  için etkinliğini incelemek amacıyla birtakım testler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.4'te 41 düğümlü 10 farklı rastgele veri seti için sonuçlar görülmektedir. Burada ikinci sütun  $CM$  modeli için; üçüncü sütun  $CM$ 'ye  $V2$  eklenmiş hali için çözüm sürelerini

göstermektedir. Son sütun ise sonuç verme süresi açısından *CM* modeline göre iyileşme yüzdesini göstermektedir.

Çizelge 5.4 : *V2*'nin 41 düğümlü *CM*'nin çözüm süresi üzerindeki etkisi.

Test	<i>CM</i> (sn)	<i>CM+V2</i> (sn)	$\Delta_{V2}$ %
1	328,6	308,3	6,2
2	545,5	553,0	-1,4
3	2256,2	2328,6	-3,2
4	2514,3	2219,5	11,7
5	8101,4	8352,1	-3,1
6	3485,1	3010,2	13,6
7	1125,6	926,4	17,7
8	458,3	364,2	20,5
9	4125,2	3718,2	9,9
10	1398,0	1185,3	15,2
<b>Ort.</b>	<b>2433,8</b>	<b>2296,6</b>	<b>8,7</b>

Çizelge 5.4 incelendiğinde *V2*'nin çözüm süresi üzerinde çoğunlukla pozitif etkisinin olduğu görülmektedir. *CM*'nin çözüm süresi *V2* eklendikten sonra ortalama % 8,7 kısalmaktadır. Ancak test 2, 3 ve 5 dışındaki örneklerde iyileşme ortalama % 13,6 olmaktadır. Çizelge 5.5'te aynı testler 51 düğümlü örnekler üzerinde de gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.5 : V2'nin 51 düğümlü CM'nin çözüm süresi üzerindeki etkisi.

Test	CM	% Aralık	CM+V2	% Aralık	$\Delta_{V2}$ %
1	952,9	0,0	912,5	0,0	4,2
2	14400,0	16,3	14400,0	16,3	0,0
3	14400,0	7,6	14400,0	7,6	0,0
4	7048,3	0,0	5930,8	0,0	15,9
5	6307,6	0,0	5835,9	0,0	7,5
6	9298,3	0,0	8613,5	0,0	7,4
7	14400,0	1,2	14400,0	0,4	0,0
8	14400,0	14,3	14400,0	14,3	0,0
9	5214,7	0,0	5255,0	0,0	-0,8
10	13057,6	0,0	11421,0	0,0	12,5
<b>Ort.</b>	<b>9947,9</b>	<b>3,9</b>	<b>9556,9</b>	<b>3,9</b>	<b>4,7</b>

Çizelge 5.5'te ikinci ve dördüncü sütunlar sırasıyla yalnızca CM ve ona V2 eklenmiş durumların sonuç verme sürelerini; son sütun V2'nin süre iyileştirme yüzdesini belirtmektedir. Üçüncü ve beşinci sütunlar her bir durum için dört saat sonunda ağ ömrü için bulunan üst sınır ve en iyi olurlu çözüm arasındaki yüzde farkı ifade etmektedir. 51 düğümlü ağlar için incelenen örneklerde CM'ye V2 eklendikten sonra çözüm süresi ortalama % 4,7 azalırken yüzde "Aralık" değerleri üzerinde örnek 7 dışında bir azalma görülmemektedir. Dört saat zaman limitine takılmayan 1, 4, 5, 6, 9 ve 10 numaralı örnekler için V2'nin süre üzerinde sağladığı ortalama iyileştirme % 6,8'dir. Tüm örnekler incelendiğinde V2'nin yalnızca örnek 9 için sonuç alma zamanını olumsuz etkilediği görülmektedir.

### 5.2.2 $CM^{rest}$ için gerçekleştirilen testler

Bu bölümde VI ve V2'nin  $CM^{rest}$ 'in çözüm süresi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge Ek-1'de 41 düğümlü ağlar için yalnızca  $CM^{rest}$  ve ona VI, V2 ve VI-V2 eklenmiş durumların çözüm süreleri bulunmaktadır. Çizelge 5.6'da sonuçları anlamlı bir şekilde yorumlayabilmek için tüm durumların baz durum olan  $CM^{rest}$ 'e göre sağladıkları iyileşme yüzdeleri belirtilmiştir. Burada pozitif değerler çözüm süresindeki iyileşmenin yani kısalmanın miktarını göstermektedir.

Çizelge 5.6 :  $V1$ ,  $V2$  ve  $V1-V2$ 'nin  $CM^{rest}$ 'in çözüm süresi üzerindeki etkisi.

Test	$\Delta_{V1}$ %	$\Delta_{V2}$ %	$\Delta_{V1+V2}$ %
1	8,1	4,5	5,7
2	3,1	-4,6	9,2
3	-4,2	12,5	-7,7
4	11,8	1,9	6,4
5	-5,1	1,2	-5,8
6	9,8	-2,8	9,1
7	9,6	5,6	13,8
8	-6,8	-6,2	-6,9
9	8,8	14,7	1,3
10	13,1	1,2	6,7
<b>Ort.</b>	<b>4,8</b>	<b>2,8</b>	<b>3,2</b>

Çizelge 5.6'ya göre tüm durumlar genel olarak pozitif etki sunsa da bazı örneklerde negatif etki görülmektedir.  $V1$ ,  $V2$  ve  $V1-V2$  çözüm süresini sırasıyla ortalama % 4,8; 2,8 ve 3,2 azaltmaktadır. Dolayısıyla  $CM^{rest}$  için sonuç alma zamanını ortalamada en fazla  $V1$  azaltmıştır. Çizelge Ek-2'de benzer testlerle 51 düğümlü örnekler için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge Ek-2'de 51 düğümlü ağlar için yalnızca  $CM^{rest}$  ve ona  $V1$ ,  $V2$  ve  $V1-V2$  eklenmiş durumların çözüm süreleri bulunmaktadır. Çizelge Ek-2'deki sonuçlar için de Çizelge 5.6 gibi bir tablo oluşturularak Çizelge 5.7 elde edilmiştir.

Çizelge 5.7'de ilk dört sütun her bir durumda çözülen örnek için 4 saat sonunda elde edilen yüzde *aralık* değerlerini; son üç sütun  $V1$ ,  $V2$  ve  $V1$  ile  $V2$ 'nin ayrı ayrı modelin sonuç alma süresine sağladığı katkının yüzdesini belirtmektedir. Burada *aralık* değerlerinin sıfır olması optimal sonucun 4 saat içinde bulunduğu anlamına gelmektedir. Sonuçlar incelendiğinde  $V1$  ve  $V1-V2$ 'nin model içinde kullanıldığı durumlarda ortalama yüzde *aralık* değerinin % 6,7'den % 6,3'e düştüğü;  $V2$ 'nin kullanıldığı durumda ise % 7,1'e çıktığı görülmektedir. Ayrıca  $V1$ ,  $V2$  ve  $V1-V2$ 'nin çözüm süresi üzerindeki ortalama faydası sırasıyla % 7,6; 4,4 ve 7,4'tür. Geçerli eşitsizliklerin bulunduğu tüm senaryolarda çözüm süresi kısalmıştır; fakat yalnız

V2'nin olduğu durumda ortalama yzde *aralık* olumsuz etkilenmiştir.  $CM^{rest}$  modeline en bzyk katkıyı V1 sağlamaktadır.

Çizelge 5.7 : V1, V2 ve V1-V2'nin  $CM^{rest}$ 'in çzyüm süresi üzerindeki etkisi.

Test	$CM^{rest}$ % Aralık	V1 % Aralık	V2 % Aralık	V1-V2 % Aralık	$\Delta_{V1}$ %	$\Delta_{V2}$ %	$\Delta_{V1+V2}$ %
1	0,0	0,0	0,0	0,0	23,6	-3,4	22,2
2	15,9	16,1	15,9	16,2	0,0	0,0	0,0
3	14,4	12,7	18,1	12,6	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	8,1	11,0
5	2,9	2,9	0,0	2,9	0,0	21,7	0,0
6	0,0	0,0	1,4	0,0	22,1	-8,6	22,7
7	8,2	5,7	10,7	5,5	0,0	0,0	0,0
8	16,9	16,9	13,1	16,9	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	25,8	18,5
10	8,7	9,0	11,5	9,0	0,0	0,0	0,0
<b>Ortalama</b>	<b>6,7</b>	<b>6,3</b>	<b>7,1</b>	<b>6,3</b>	<b>7,6</b>	<b>4,4</b>	<b>7,4</b>



## 6. SEZGİSEL YÖNTEM

Problem için sunulan modelin çözüm süresini kısaltmak için bazı geçerli eşitsizlikler önerilmiş ve testler sonucunda etkileri gözlemlenmiştir. Fakat temel model ( $CM$ )'i daha kısa sürede çözebilmek ve büyük ağlar için daha iyi sonuç alabilmek amacıyla bir sezgisel geliştirilmiştir.

### 6.1 Algoritmanın İşleyişi

Bu algoritmadaki temel motivasyon, merkezi düğüm olmaya aday düğümlerin kümesini daraltmaktır. Çizelge 6.1'de algoritmanın sözde kodu gösterilmektedir.

Algoritma başlatıldıktan sonra öncelikle programa girilen parametre değerleri okunmakta ve başlangıç düzeni oluşturulmaktadır. Başlangıç düzeninde maksimum amaç fonksiyonu değerini ifade eden  $T_{maks}$  ve her  $j \in \overline{N_0}$  düğümü için o düğümün merkezi düğüm olup olmadığını ifade eden  $h_j$  değişkenlerinin değerleri sıfıra eşitlenmektedir. Ayrıca algoritmanın on birinci adımındaki döngüde sayaç olarak kullanılan  $l$  de sıfıra eşitlenmektedir. Burada başlangıçta boş bir küme ifade eden  $N_C$ , merkezi düğümler için oluşturulan aday kümeyi tanımlamaktadır.  $N_{maks}$ ,  $N_C$  kümesine eklenebilecek toplam düğüm sayısının maksimum değerini ifade etmektedir ve  $BS$  dışındaki düğüm sayısının onda biri kadardır ( $N_{maks} = 0,1 * |N_0|$ ).  $\overline{N_0}$ , merkezi düğüm olmaya adaylığı hiç değerlendirilmemiş düğümlerin kümesidir ve başlangıçta  $N_0$ 'a denktir.  $B$  kümesi, eldeki en iyi amaç fonksiyonu değerini sağlayan durumda açılan merkezi düğümler kümesidir ve başlangıçta boş bir kümeyi ifade etmektedir. Üçüncü adımda  $CM$  hiç merkezi düğüm açılmasına izin verilmeyerek; yani  $bNM$ 'ye indirgenerek çözümlü; elde edilen ağ ömrü değeri sonraki adımda  $T_{maks}$ 'a eşitlenmektedir. Beşinci adımda aynı veri seti kullanılarak her  $i \in N_0$  düğümü için ayrıt uzunluklarının  $PTX_{ij}$  olarak belirlendiği ağda her  $i \in N_0$ 'dan  $BS$ 'ye olan en kısa yol ( $\mathcal{P}_i$ ) bulunmaktadır.

Çizelge 6.1 : Algoritmanın sözde programı.

1. Başla.
2. Başlangıç düzenine getir.
 
$$T_{maks} \leftarrow 0;$$

$$\overline{N}_0 \leftarrow N_0;$$

$$h_j \leftarrow 0 \quad \forall j \in \overline{N}_0;$$

$$l \leftarrow 0;$$

$$N_{maks} \leftarrow 0,1|N_0|;$$

$$N_C \leftarrow \{\};$$

$$B \leftarrow \{\};$$
3.  $CM$ 'yi çöz.
4. Eğer  $T > T_{maks}$  ise;
 
$$T_{maks} \leftarrow T;$$
  5.  $\forall j \in N_0$  için  $j$ 'den  $BS$ 'ye en kısa yolu ( $\mathcal{P}_j$ ) bul.
  6.  $\forall i \in \overline{N}_0$  için  $SP_i \leftarrow |\{j \in N_0 : i \in \mathcal{P}_j\}|;$
  7.  $j^* \leftarrow \underset{i \in \overline{N}_0}{\operatorname{argmaks}} \{SP_i\};$
  8.  $N_C \leftarrow \{j^*\}; B \leftarrow \{j^*\}; h_{j^*} = 1; \overline{N}_0 \leftarrow \overline{N}_0 \setminus \{j^*\};$
  9.  $CM$ 'yi çöz.
  10. Eğer  $T > T_{maks}$  ise;
 
$$T_{maks} \leftarrow T$$
    11.  $l < N_{maks} - 1$  olduğu sürece tekrarla,
 
$$i^* \leftarrow \underset{i \in \overline{N}_0}{\operatorname{argmaks}} \{SP_i\};$$

$$N_C \leftarrow N_C \cup \{i^*\};$$

$$h_{i^*} \leftarrow 1;$$

$$CM$$
'yi çöz.

Eğer  $T > T_{maks}$  ise;

$$T_{maks} \leftarrow T;$$

$$\overline{N}_0 \leftarrow \overline{N}_0 \setminus \{i^*\};$$

$$h_{i^*} \leftarrow 0;$$

$$l \leftarrow l + 1;$$

$$B \leftarrow N_C;$$

$$N_C \leftarrow N_C \setminus \{i^*\};$$

Değilse;

$$h_{i^*} = 0;$$

$$N_C \leftarrow N_C \setminus \{i^*\};$$
12.  $T_{maks}$  ve  $B$ 'yi yazdır.
13. DUR.

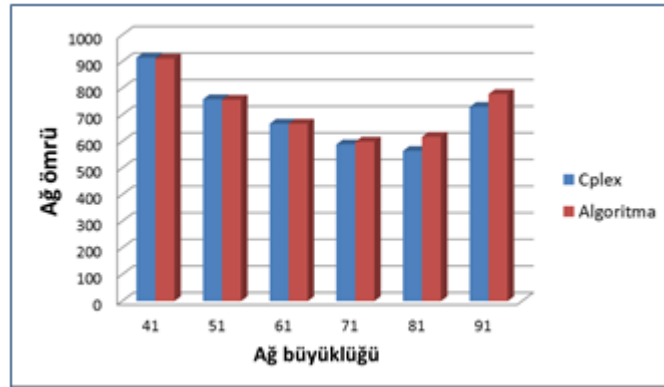
Altıncı adımda ise her  $i \in N_0$  düğümü için  $SP_i$  değerleri hesaplanmaktadır. Burada  $SP_i$ , bir  $i \in N_0$  düğümünün üzerinde bulunduğu toplam en kısa yol sayısını ifade etmektedir. Yedinci adımda, en yüksek  $SP_i$  değerine sahip  $j^* \in N_0$  düğümü belirlenerek sekizinci adımda sırasıyla  $j^*$  düğümü  $N_C$  ve  $B$  kümesine eklenir;  $h_{j^*}$ 'nin değeri bire eşitlenerek  $j^*$  düğümü merkezi düğüm olarak sabitlenir ve  $\overline{N_0}$  kümesinden  $j^*$  düğümü çıkarılıp  $CM$  tekrar çözülür. Elde edilen  $T$  değerine göre gerekirse  $T_{maks}$  değerinin güncellenmesi onuncu adımda gerçekleştirilir. Onbirinci adımdaki döngü  $N_{maks} - 1$  defa tekrarlanır. Bu adımdaki her döngüde ilk olarak  $\overline{N_0}$  kümesindeki düğümler arasından en yüksek  $SP_i$  değerine sahip düğüm olan  $i^*$  belirlenip  $N_C$ 'ye eklendikten sonra  $h_{i^*}$ 'in değeri bire eşitlenerek  $CM$  çözülür. Elde edilen  $T$  değeri  $T_{maks}$ 'tan büyük ise  $T_{maks}$ 'ın değeri güncellenir. Ardından  $i^*$  düğümü  $\overline{N_0}$  kümesinden çıkarılır. Daha sonra sırasıyla  $h_{i^*}$ 'in değeri sıfıra eşitlenip  $l$ 'nin değeri bir artırılır;  $N_C$  kümesi  $B$  kümesine atanır ve  $i^*$  düğümü  $N_C$  kümesinden çıkarılarak on birinci adımın başına tekrar gidilir. Eğer bu döngüde  $T_{maks}$  değeri güncellenmediyse  $i^*$  aday merkezi düğüm kümesinden çıkarılarak yeni döngü ile devam edilir. Son olarak on ikinci adımda mevcut  $T_{maks}$  değeri ve  $B$  kümesi ekrana yazdırıldıktan sonra on üçüncü adım ile algoritma durur.

Yukarıdaki açıklamada algoritmanın kodu adım adım anlatılmaktadır. Fakat algoritmanın özde işlevini kısaca açıklamak gerekirse; ilk olarak  $bNM$  yani hiç merkezi düğümün açılmasına izin verilmeyen model çözülmektedir. Ardından her  $i \in N_0$  düğümü için ayrıt uzunluklarının  $PTX_{ij}$  olarak belirlendiği ağda en kısa yol problemi çözülüp  $SP_i$  değerleri hesaplanmaktadır. Burada  $SP_i$ , bir  $i \in N_0$  düğümünün üzerinde bulunduğu toplam en kısa yol sayısını ifade etmektedir. Daha sonra düğümler  $SP_i$  değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanmaktadır. İlk  $K$  sıradaki düğüm aday merkezi düğüm kümesi olarak seçilir. Sonrasında ilk sıradaki düğüm merkezi düğüm olarak sabitlenip tek merkezi düğümün olduğu  $CM$  modeli çözülmektedir. Buradan elde edilen sonuç  $bNM$ 'den elde edilen sonuçtan büyük değilse durulmakta; büyükse devam edilmektedir. Sonrasında ilk sıradaki düğüm sabit kalarak yanına sırasıyla ondan sonraki  $K-1$  tane düğüm ikinci merkezi düğüm olarak eklenip  $K-1$  tane iki merkezi düğümlü  $CM$  çözülmektedir. Son olarak en yüksek amaç fonksiyonu değerini veren durum ağ ömrü olarak seçilmektedir. Her

seferinde iki merkezi düğümlü seçimlerin oluşturulmasının sebebi ise daha önceki örneklerde çoğunlukla en fazla iki merkezi düğümün açılmasıdır.

## 6.2 Algoritma Sonuçları

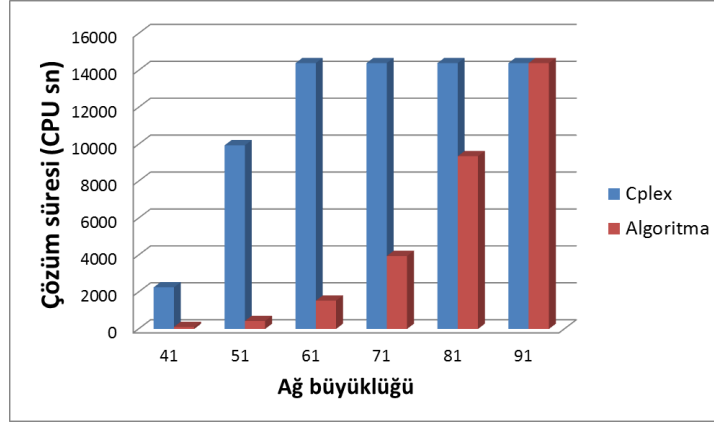
Bölüm 5’te kullanılan parametre değerleri bu bölümdeki testlerde de aynen kabul edilmiştir. Algoritma 41 düğümlü ağlardan 91 düğümlü ağlara kadar olan örnekler için çalıştırılmıştır. Her ağ büyüklüğü için 10 farklı örnek 4 saat zaman limiti belirtilerek test edilmiştir. Testler bir önceki bölümdeki testlerin gerçekleştirildiği program üzerinden yürütülmüştür. *CM* için kesin çözüm yöntemiyle elde edilen sonuçlar *Cplex*; geliştirilen sezgisel yöntemle elde edilen sonuçlar ise *algoritma* şeklinde adlandırılacaktır. Şekil 6.1’de *Cplex* ve algoritmanın farklı ağ büyüklüklerine göre değişen ağ ömrü sonuçları bulunmaktadır.



Şekil 6.1: Ortalama ağ ömrü değerleri.

Ağ büyüklüklerine göre *Cplex* ve algoritmadan elde edilen ortalama ağ ömrü değerleri Şekil 6.1’deki grafikte belirtilmektedir. Grafikte *Cplex*’in sunduğu ortalama ağ ömrü değerlerinin 41 ve 51 düğümlü ağlar için algoritmanınkinden yüksek; 61 düğümlü ağlar için onunkilere eşit ve daha büyük ağlar için daha düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla algoritmanın geliştirilme amacına uygun olarak özellikle büyük ölçekli ağlarda çözüm bulmak anlamında faydalı olduğu söylenebilmektedir.

Uygulanan çözüm yöntemlerinin verdikleri sonucun tatmin edici olması kadar çözüm sürelerinin de makul olması gerekmektedir. Şekil 6.2’de her iki yöntemin de ağ büyüklüğüne göre ortalama çözüm süreleri bulunmaktadır.



Şekil 6.2: Ortalama çözüm süreleri.

Grafikte açıkça görülmektedir ki 91 düğümlü ağlar dışındaki tüm ağ büyüklüklerine ait örneklerde algoritma Cplex'ten oldukça düşük sürelerde çözüm vermiştir. Algoritma 91 düğümlü ağlara kadar olan örneklerde belirtilen 4 saat zaman limitine ulaşmadan çözüm sunmaktadır.

Çizelge 6.2 : Cplex ve algoritmanın sağladığı ağ ömrü değerleri ve çözüm süreleri.

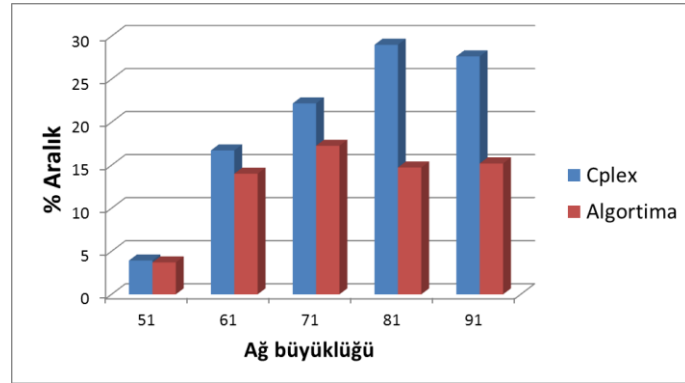
Test	Ağ ömrü			Çözüm süresi (CPU sn.)		
	Cplex	Algoritma	% $\Delta_{\text{Algoritma}}$	Cplex	Algoritma	% $\Delta_{\text{Algoritma}}$
41	915	911	-0,5	2254	110	95,1
51	758	756	-0,3	9948	434	95,6
61	666	666	0,0	14400	1532	89,4
71	589	599	1,9	14400	3950	72,6
81	564	617	9,8	14400	9354	35,0
91	729	778	7,7	14400	14400	0,0

Çizelge 6.2'de ikinci ve üçüncü sütunlar Cplex ve algoritmanın her bir ağ büyüklüğü için sunduğu ortalama ağ ömrü değerlerini; beşinci ve altıncı sütunlar çözüm sürelerini; dördüncü ve son sütunlar ise algoritmanın sağladığı ağ ömrü ve çözüm süresi değerlerinin Cplex'inkilerden yüzde farkını belirtmektedir. Burada ağ ömrü değerindeki yüzde farkın negatif olması algoritmanın Cplex'ten ortalamada daha düşük ağ ömrü değerleri verdiği anlamına gelmektedir. Çizelgedeki 41 ve 51 düğümlü ağların satırları incelendiğinde, algoritmanın Cplex'ten optimal çözümüne ortalama % 0,4 yakınlıkta değere sahip çözümleri Cplex'e göre ortalama % 95,4

daha kısa sürede bulunduğu görülmektedir. Algoritma, 61 düğümlü ağlar için ticari çözücüyle *CM*'yi çözerek süre limiti sonunda bulunan ağ ömrü değerlerini ortalama % 89,4 daha kısa sürede bulmuştur. Son olarak 71, 81 ve 91 düğümlü daha büyük ağlar için ise Cplex'ten ortalama % 6,5 daha iyi çözümler % 35,9 daha kısa sürede bulunmuştur.

Algoritmanın zaman limitine ulaşmadan sonuç verdiği ağlarda; yani 91 düğümlü ağlar dışındaki ağlar için *CM*'nin çözüm süresi üzerindeki ortalama iyileştirme miktarı % 77,5'tir.

Cplex'te 51 düğümlü ağlardan 91 düğümlü ağlara kadar dört saat sonunda optimal sonuca ulaşamamış örneklerde yüzde *aralık* miktarları ve üst sınır değerleri elde edilmiştir. Böylece Cplex'ten elde edilen üst sınır değerleri ile algoritmanın sunduğu sonuçlar arasındaki yüzde fark değerleri de hesaplanmıştır. Şekil 6.3'te Cplex ve algoritmanın verdiği sonuçlar ile Cplex'ten elde edilen üst sınır değerleri arasındaki ortalama yüzde *aralık* miktarları belirtilmektedir.



Şekil 6.3 : Cplex ve algoritma için yüzde *aralık* değerleri.

*Aralık* değerlerinin belirtildiği Şekil 6.3'teki grafiğe göre tüm ağ büyüklüklerinde algoritmanın vermiş olduğu ortalama *aralık* miktarları Cplex'inkinden daha düşüktür. Grafik daha ayrıntılı incelendiğinde; 51 düğümlü ağlar için Cplex ve algoritmanın *aralık* değerleri birbirine yakinken ağ büyüklüğü arttıkça aralık değerleri arasındaki fark da açılmaktadır. Öyle ki; 81 düğümlü ağlarda algoritma Cplex'in verdiği *aralık* değerlerini yarıya kadar indirebilmiştir.

## 7. DUYARLILIK ANALİZİ

Bu bölümde  $CM$ 'de kullanılan birincil veri iletim miktarı için eşik katsayısını ifade eden  $\alpha$  ve ağda bulunabilecek azami merkezi düğüm sayısı olan  $K$  parametrelerinin değerleri değiştirilerek model üzerinde birtakım duyarlılık analizi testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde  $\alpha$  ve  $K$  dışındaki parametreler diğer bölümlerde belirtildiği şekilde alınmıştır. Takip eden bölümlerde sırasıyla  $\alpha$  ve  $K$  için yapılan testlerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

### 7.1 “ $\alpha$ ” Parametresi İçin Duyarlılık Analizi

$\alpha$  parametresini değiştirmenin ağ ömrü üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 41 ve 51 düğümlü ağlar ile testler yapılmıştır. Daha önceki testlerde  $\alpha = 0,1 + 0,02 * |N_0|$  ilişkisi kullanılmıştır. Bu bölümde ise  $\alpha^* \in \{-0,1 + \alpha, \alpha, 0,1 + \alpha\}$  değerleri için testler tekrarlanmıştır. Dolayısıyla 41 düğümlü ağlar için  $\alpha^* \in \{0,8; 0,9; 1\}$  olmaktadır. Çizelge 7.1’de 41 düğümlü ağlar için sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 7.1:  $\alpha$  parametresinin farklı değerleri için 41 düğümlü ağlarda test sonuçları.

$A$	0,8		0,9		1,0	
Test	Ağ Ömrü	Açılan MD sayısı	Ağ Ömrü	Açılan MD sayısı	Ağ Ömrü	Açılan MD sayısı
1	688,9	1	701,2	0	710,1	1
2	1641,6	1	1667,1	1	1691,2	0
3	897,9	3	923,3	2	945,5	2
4	562,0	2	569,4	2	575,7	1
5	841,8	3	863,2	3	892,1	2
6	561,8	2	569,4	2	575,6	1
7	682,6	2	691,1	1	699,6	1
8	721,8	1	730,7	1	740,7	1
9	807,9	3	828,9	2	846,5	2
10	1581,1	1	1605,6	1	1629,6	1
<b>Ortalama</b>	<b>898,7</b>	<b>1,9</b>	<b>915,0</b>	<b>1,5</b>	<b>930,7</b>	<b>1,2</b>

Çizelge 7.1’de “Test” sütunundan sonraki ilk iki sütun  $\alpha$  değerinin 0,8; ortadaki iki sütun 0,9; son iki sütun ise 1,0 alındığı durumlar için elde edilen ağ ömrü değerleri

ve açılan merkezi düğüm sayısını belirtmektedir.  $\alpha$  değerinin küçük olması bir düğüm merkezi olmadığı sürece ona diğer düğümlerden iletilen veri miktarının daha fazla kısıtlanması anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle parametrenin değeri azaldığında modeldeki (4.12) ve (4.13) kısıtları daha sıkı hale geldiğinden ağ ömrü değerinin iyileşmesi beklenmemektedir.  $\alpha$  değerinin büyümesi durumunda ise tam tersi bir çıkarımdan söz edilebilir. Çizelgedeki ağ ömrü değerlerine göre  $\alpha$  değerinin 0,9 olduğu durumla kıyaslandığında  $\alpha^* = 0,8$  olduğunda ağ ömrü değerleri beklenildiği gibi azalmakta;  $\alpha^* = 1,0$  olduğunda ise ağ ömrü değerleri de artmaktadır. Açılan merkezi düğüm sayısı incelendiğinde  $\alpha^* = 0,8$  olduğunda baz duruma göre açılan merkezi düğüm sayısının ortalama değeri artmakta;  $\alpha^* = 1,0$  olduğunda ise azalmaktadır.  $\alpha$  değerinin artması sonucunda en kısa yollar üzerinden iletelebilen veri miktarı da artacağı için bu sonuç beklentileri destekler niteliktedir.

Sonuç olarak  $\alpha$ 'nın değeri 0,8 olduğunda ortalama ağ ömrü baz duruma göre % 1,8 azalmakta ve 1,0 olduğu zaman ortalama % 1,7 artmaktadır.  $\alpha^* \in \{0,8; 0,9; 1\}$  olduğunda açılan ortalama merkezi düğüm sayısı sırasıyla 1,9; 1,5; 1,2'dir. Benzer şekilde 51 düğümlü ağlarda  $\alpha^* \in \{1,0; 1,1; 1,2\}$  için elde edilen sonuçlar Çizelge 7.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.2:  $\alpha$  parametresinin farklı değerleri için 51 düğümlü ağlarda test sonuçları.

$A$	1,0		1,1		1,2	
Test	Ağ Ömrü	Açılan MD sayısı	Ağ Ömrü	Açılan MD sayısı	Ağ Ömrü	Açılan MD sayısı
1	617,5	1	623,0	1	626,1	1
2	688,2	3	694,9	3	709,9	2
3	828,2	1	847,0	1	861,3	1
4	1041,3	0	1061,2	0	1079,3	0
5	614,7	2	625,2	2	637,2	1
6	661,0	3	671,4	2	682,9	1
7	718,5	1	734,7	1	748,6	0
8	615,0	3	626,8	2	642,4	2
9	897,9	2	904,7	2	910,9	1
10	784,7	3	795,9	2	809,4	2
<b>Ortalama</b>	<b>746,7</b>	<b>1,9</b>	<b>758,5</b>	<b>1,6</b>	<b>770,8</b>	<b>1,1</b>



Çizelge 7.2'deki sonuçlara göre  $\alpha$  ve ağ ömrü değerleri paralel yönde değişmektedir. Yani  $\alpha = 1,1$  baz alındığında  $\alpha$  ve ağ ömrü beraber artmakta veya azalmaktadır. Sonuç olarak  $\alpha = 1,0$  olduğunda ortalama ağ ömrü baz duruma göre % 1,6 azalmakta ve  $\alpha = 1,2$  olduğunda da ortalama % 1,6 artmaktadır.  $\alpha$ 'nın değeri 1,0; 1,1; 1,2 olduğunda açılan ortalama merkezi düğüm sayısı sırasıyla 1,9; 1,6; 1,1'dir.

41 ve 51 düğümlü ağlar için  $\alpha$ 'nın değeri baz durumlara göre 0,1 birim azaltıldığında ve artırıldığında elde edilen ağ ömrü değerlerinin ortalamasındaki yüzde azalma ve artış birbirine oldukça yakın ve küçüktür.

## 7.2 “K” Parametresi İçin Duyarlılık Analizi

Bu bölümde sadece  $K$  parametresinin değerleri değiştirilip diğer parametrelerin önceki bölümlerle aynı alınmasıyla gerçekleştirilen testler mevcuttur. Bölüm 5.1.3'te yapılan denemelerde iki adet merkezi düğüm açılmış olan 31, 41 ve 51 düğümlü ağlar üzerinde  $K=0$  ve 1 kullanılarak testler yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları Çizelge 7.3'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 7.3:  $K$  parametresinin farklı değerleri için test sonuçları.

Test	$K=0$	$K=1$	$K_{\text{baz}}$	$\% \Delta_{01}$	$\% \Delta_{12}$
31	925,3	949,2	957,5	2,6	0,9
41	726,9	743,4	750,8	2,3	1,0
51	721,2	733,6	738,7	1,7	0,7
<b>Ortalama</b>	<b>791,1</b>	<b>808,8</b>	<b>815,7</b>	<b>2,2</b>	<b>0,8</b>

Çizelge 7.3'te baştan ikinci sütun  $K$  değerinin sıfıra eşit olduğu durumlar için farklı ağ büyüklüklerinin ortalama ağ ömrü değerlerini göstermektedir.  $K$  parametresinin değerini sıfır alınması aslında tek kopyalı strateji olan  $bNM$ 'nin çözülmesi anlamına gelmektedir. Bölüm 5.1.3'teki sonuçlara göre ikiden fazla merkezi düğüm açılmadığından  $K$  parametresi bire eşitlenerek bu örnekler üzerinde tekrar testler yapılmıştır. Tüm örneklerde bir tane merkezi düğüm açılmıştır. Çizelgedeki üçüncü sütun bu testlerden elde edilen ortalama ağ ömrü değerlerini göstermektedir. Bir sonraki sütun  $K$  değerinin temel hali ( $K=0, I^*/N_0$ ) kullanılarak elde edilen sonuçların her bir ağ büyüklüğü için sunduğu ortalama ağ ömrü değerlerini ifade etmektedir.

Buradaki 31, 41 ve 51 düğümlü ağlar iki merkezi düğümün açıldığı örneklerden oluşmaktadır. Sondan ikinci sütun bir tane merkezi düğüm açılmasının ( $K=1$ ) hiç açılmadığı duruma ( $K=0$ ) göre ağ ömründe sağladığı ortalama yüzde artışı belirtmektedir. Son sütun ise benzer şekilde iki tane merkezi düğümün açıldığı baz durumun tek merkezi düğümlü duruma göre ağ ömründe sağladığı faydanın yüzdesini göstermektedir. Yani son iki sütun merkezi düğüm sayısının sıfırdan ikiye birer artmasının ağ ömrü üzerindeki marjinal faydasını ifade etmektedir. Sonuçlara göre merkezi düğüm sayısının sıfırdan bire yükselmesinin ağ ömrüne faydası ortalama % 2,2 ve birden ikiye yükselmesinin ise % 0,8'dir.

## 8. SONUÇLAR

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (*KAA*'lar), kablosuz bir ortam aracılığı ile birbirlerine bağlanmış, sınırlı batarya enerjisi ve veri işleme yeteneğine sahip, birbirleriyle bilgi alışverişi yapan çok sayıda bağımsız sensörden oluşan bilgi iletim sistemleridir. *KAA*'lar çoğunlukla uzak ve ıssız bir alana sensörlerin rastgele saçılmasıyla oluşturuldukları için pek çok uygulamada enerjisi biten sensörlerin bataryalarının yenilenmesi neredeyse imkansızdır. Bu sebeple ağ ömrünün olabildiğince uzun olması istenmektedir. Bu tez çalışmasında *KAA*'lar için ağ güvenilirliği ve sensörler arasındaki veri transferi yükünün adaletli dağılımı göz önünde bulundurularak ağ ömrü en iyilenmiştir.

Problem matematiksel modelleme yöntemiyle ele alınmış olup oluşturulan model *CM* olarak adlandırılmaktadır. *CM*, temel bir ağ akış modelinde olması gereken kısıtların yanısıra bir takım karakteristik özellikleri barındıran bir yaklaşım sunmaktadır. İlk olarak *CM*, herhangi bir kaynak düğüme ondan çıkan veri paketinin bir bütün olarak gönderilebildiği gibi parçalara ayrılarak *BS*'ye gönderilebilme imkanı tanımaktadır. Yani *CM*'de çoklu yol atama stratejisi bulunmaktadır. Çok yönlü strateji dolaylı olarak ağ güvenliğini desteklemektedir.

*CM*'de her sensör ancak kendi ürettiği verinin belli bir katı kadar başka sensörlerin verisinin iletiminde görev alabilir. Böylelikle düğümlerden birine veya bir kısmına aşırı trafik yükü verilmeyerek adaletli bir yük dağılımı sağlanmaktadır. Ağdaki veri trafiği ve dolayısıyla enerji tüketimi de dengelenerek teknik aksaklıklar bir nebze azaltılmış ve ağ güvenilirliği iyileştirilmiş olmaktadır.

Tüm bunlara ek olarak *CM*'de bazı sensörlerin veri iletiminde merkezi rol oynamalarına izin verilmesi ve dolayısıyla da diğer sensörlerden daha fazla veri iletmeleri mümkündür. Bir sensörün merkezi olmasına izin verilmesi için o sensörün veri iletiminde diğerlerine oranla belirgin olarak daha yoğun kullanılmasının fazladan veri üretilip iletilecek olmasına rağmen ağ ömrünü iyileştirmesi gerekmektedir. Şöyle ki merkezi düğümler daha fazla veri yüküne sahip olmalarından dolayı ağ bütünlüğü için kritik rol oynarlar. Bu nedenle dışarıdan gelebilecek saldırılara veya yoğun kullanıma dayalı teknik aksaklıklara maruz kalma

ihtimalleri nispeten daha yüksektir. Sonuç olarak sadece onlar üzerinden geçen verilerin kopyalanması ağ güvenilirliğini olumlu yönde etkileyecektir.  $CM$ 'de birden fazla merkezi düğümün açılmasına izin verilmektedir ve eğer bir kaynak düğümün verisi iletilirken merkezi düğümler kullanılıyorsa verinin bu kısmı kaynağında tekrar kopyalanıp ikinci kez  $BS$ 'ye gönderilmektedir.

Önerilen matematiksel model ( $CM$ ), kaynak düğümlerin ağ ömrü boyunca verilerini en fazla bir tane merkezi düğüm üzerinden iletebileceğini belirten kısıtla sınırlandırılarak alternatif bir strateji ( $CM^{rest}$ ) sunulmuştur. Bu kısıtlama ile birden fazla merkezi düğümü hedef alan saldırılara karşı korunaklılığın artırılması ve gereksiz kopyalamanın azaltılması hedeflenmiştir.

Tez çalışması dahilinde matematiksel modellerin çözüm süresini kısaltmak için iki farklı geçerli eşitsizlik sunulmuştur. Sonrasında ise temel modelin ağ ömrü ve güvenilirliği farklı kopyalama stratejileri ile kıyaslanarak stratejinin ağ ömrü ve güvenilirliği açılarından etkililiği tartışılmıştır. Ayrıca geçerli eşitsizliklerin temel ve alternatif modelin çözüm süreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra matematiksel modelin optimal çözüm bulamadığı daha büyük ağlar için çok aşamalı bir algoritma sunulmuş ve uygulanan testler üzerinden algoritmanın etkinliği değerlendirilmiştir. Son olarak bazı parametrelerin değerleri değiştirilerek  $CM$  için duyarlılık analizleri yapılmıştır.

$CM$  ilk olarak dengeli tek kopyalı strateji olan  $bNM$  ve çift kopyalı strateji olan  $FDM$  ile ağ ömrü ve güvenilirliği açısından kıyaslanmıştır.  $CM$  ve diğer kopyalama stratejileri 21 düğümlü ağlardan başlayıp 71 düğümlü ağlara kadar olan ağ büyüklükleri üzerinde test edilmiştir. Her büyüklük için 10 farklı rasgele veri seti oluşturulmuştur ve bu üç strateji aynı veri setleri üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre  $CM$ ,  $FDM$ 'den ortalama % 55,5 ve  $bNM$ 'den % 1,8 daha iyi ağ ömrü değerleri sunmaktadır.

Sonrasında  $bNM$ ,  $FDM$  ve  $CM$  stratejileri ağ güvenilirliği açısından kıyaslanmıştır. Ağ güvenilirliği arıza/aksaklık durumunda başarıyla  $BS$ 'ye iletebilen veri miktarına göre değerlendirilmiştir. Bu amaçla her strateji için ağdaki belli oranlarda düğümün hatalı/arızalı olduğu varsayıp ağdaki toplam veri kaybı yüzdeleri incelenmiştir.

Oluşturulan senaryolarda hatalı/arızalı düğüm sayısının *BS* dışındaki toplam düğüm sayısına oranı %10-%60 arasında değişmektedir. Ağdaki bir düğümün bozulan düğüm olarak seçilme olasılığı o düğümün üzerinden geçen veri miktarıyla orantılı olarak artmaktadır. Belirtilen şekilde bir olasılık fonksiyonu kullanılarak büyüklüğü 71 düğümlü ağlara kadar değişen ağlarla her kopyalama stratejisi için korunan veri yüzdeleri hesaplanmıştır. *CM*, *FDM* ve *bNM* için çeşitli bozulma senaryoları altında elde edilen ortalama korunan veri yüzdeleri yaklaşık olarak sırasıyla % 50, %56 ve % 46'dır. *CM*'de, *FDM*'ye göre % 10 daha az veri korunumuna razı olarak % 56 daha yüksek ağ ömrü elde edilmiştir. Ayrıca *BS*'ye ulaşan veri miktarı açısından *CM*, *FDM*'den ortalama %38 ve *bNM*'den %11 daha yüksek değerler sunmaktadır.

*CM*'nin ağ ömrü ve güvenilirliği farklı çoklu kopya stratejileriyle kıyaslandıktan sonra *CM* ve *CM<sup>rest</sup>*'in çözüm sürelerini kısaltmak için önerilen geçerli eşitsizliklerin etkileri incelenmiştir. İlk olarak aday küme indirgeme eşitsizliğinin (*V2*) *CM*'nin çözüm süresi üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Daha sonra bağlanırlık eşitsizliği (*VI*) ve aday küme indirgeme eşitsizliğinin (*V2*) *CM<sup>rest</sup>*'in çözüm süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Testler 41 ve 51 düğüme sahip onar adet rasgele üretilmiş ağ üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre *V2* *CM* için; *VI* *CM<sup>rest</sup>* için olumlu etki sunmuştur.

*CM*'yi daha kısa sürede çözebilmek ve büyük ağlar için daha iyi sonuçlar alabilmek için bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. *CM*'de aday merkezi düğümler *BS* dışındaki tüm düğümlerdir. Aday merkezi düğüm kümesini küçültme fikri önerilen algoritmanın temel mantığını oluşturmaktadır. Algoritma ve Cplex ticari çözücüsü kullanılarak 41 düğümlü ağlardan 91 düğümlü ağlara kadar olan örnekler için denemeler yapılmıştır. Her ağ büyüklüğü için 10 farklı örnek 4 saat zaman limiti koyularak test edilmiştir. 41 ve 51 düğümlü ağlar için sonuçlar incelendiğinde, algoritmanın Cplex'in bulduğu en iyi çözüme ortalama % 0,4 uzaklıktaki çözümleri Cplex'e göre ortalama % 95,4 daha kısa sürede bulduğu görülmektedir. Algoritma, 61 düğümlü ağlar için Cplex'in çıkardığı ağ ömrü değerleriyle aynı değerleri ortalama % 89,4 daha kısa sürede bulmuştur. Son olarak 71, 81 ve 91 düğümlü daha büyük ağlar için ise Cplex'ten ortalama % 6,5 daha iyi çözümleri % 35,9 daha kısa sürede vermiştir.

Algoritmanın zaman limitine ulaşmadan sonuç verdiği ağlarda; yani 91 düğümlü ağlar dışındaki ağlar için  $CM$ 'nin çözüm süresi üzerindeki iyileştirme miktarı % 77,5'tir. 51 düğümlü ağlardan 91 düğümlü ağlara kadar elde edilen *aralık* değerleri incelendiğinde tüm ağ büyüklüklerinde algoritmanın vermiş olduğu ortalama *aralık* miktarlarının Cplex'inkinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. 51 düğümlü ağlar için Cplex ve algoritmanın *aralık* değerleri birbirine yakınken ağ büyüklüğü arttıkça aralık değerleri arasındaki fark da açılmaktadır. Öyle ki; 81 düğümlü ağlarda algoritma  $CM$ 'nin verdiği *aralık* değerlerini yarı yarıya azaltabilmiştir.

Son olarak  $\alpha$  ve  $K$  parametrelerinin değerleri değiştirilerek  $CM$  üzerinde duyarlılık analizi yapılmıştır. Öncelikle 41 ve 51 düğümlü ağlar için  $\alpha$  parametresinin değeri 0,1 birim artırılarak ve azaltılarak testler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre  $\alpha$ 'nın değeri azaltıldığında ağ ömrü azalmakta ve arttırıldığında da ağ ömrü de artmaktadır. Daha sonra  $K$  parametresi 1 alınarak 31, 41 ve 51 düğümlü ağlar için testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre açılan merkezi düğüm sayısı azaldığından ağ ömrü değerleri de azalmıştır.

Bu tezdeki çalışmada merkezi olarak seçilen düğümlere herhangi bir iltimas tanınmamaktadır. Sensörlerin belirli bir alana rastgele bir şekilde yerleştirildiği varsayımı söz konusu olduğundan merkezi olarak seçilecek düğümler başlangıçta bilinmemektedir. Bu sebeple merkezi düğümlere özellikle fazladan enerji yüklemesi yapılmamaktadır. Fakat uygulama aşamasına gelindiğinde lokasyonu belli ağlarda merkezi olarak seçilen düğümlere fazladan enerji verilebilir. Böyle bir varsayım altında bu tezdeki çalışma türetilerek gelecekte yeni bir çalışma konusu elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abbasi, A.A. ve Younis, M., A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks, *Computer Communications*, 30 (14-15) (2007) 2826-2841.
- Agre, J. ve Clare, L., An integrated architecture for cooperative sensing networks, *IEEE Computer Magazine* (May 2000) 106-108.
- Akkaya, K. ve Younis, M., An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks, *Proceedings, 23rd International Conference*, 710-715, 2003.
- Akkaya, K. ve Younis, M., A survey on routing protocols for wireless sensor networks, *Ad hoc Networks.*, vol. 3, no. 3, pp. 325--349, 2005.
- Akyıldız, F. ve Kasımoğlu, I. H., Wireless sensor and actor networks: Research challenges, *Ad Hoc Networks*, 2 (4) 351-367, 2004.
- Akyıldız, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. ve Çayırıcı, E., Wireless sensor networks: A survey, *Computer Networks*, 38 (4), 393-422, 2002.
- Alfieri, A., Bianco, A., Brandimarte, P. ve Chiasserini, C.F., Maximizing system lifetime in wireless sensor networks, *European Journal of Operational Research*, 181(1) 390-402, 2007.
- Al-Karaki, J. ve Kamal, A., Routing techniques in wireless sensor networks, *Comuter Communications*, 11 (6) (2004) 6-28.
- Ba, H., Demirkol, I. ve Heinzelman, W., Passive wake-up radios:from devices to applications, *Ad Hoc Networks*, 11 (8) (2013) 2605-2621.
- Baronti, P., Pillai, P., Chook, V.W.C., Chessa, S., Gotta, A. ve Hu, Y.F., Wireless sensor networks:A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards, *Computer Communications*, 30 (2007) 1655-1695.
- Cerulli, R., Donato, R. D. ve Raiconi, A., Exact and heuristic methods to maximize network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing rannges, *European Journal of Operational Research*, 220 (2012) 58-66.
- Cheng, Z., Perillo, M. ve Heinzelman, W.B., General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(4) 484-497, 2008.
- Chouikhi, S., El Korbi, I., Doudane, Y.G. ve Saidane, L.A., A survey on fault tolerance in small and large scale wireless sensor networks, *Computer Communications*, (2015) 1-16.
- Damaso, A., Rosa, N. ve Maciel, P., Reliability of wireless sensor networks, *Sensors*, 2014, 14, 15760-15785.

- Dargie, W. ve Poellabauer, C., *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*, John Wiley and Sons, 2010 ISBN 978-0-470-99765-9, 168-183, 191-192.
- De Souza, L., Vogt, H. ve Beigl, M., *A survey on fault tolerance in wireless sensor networks*, Interner Bericht. Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe: Karlsruhe, Germany, 2007.
- Djukic, P. ve Valaee, S., *Minimum energy fault tolerant sensor networks*, Proceedings of GlobeCom Conference, 22-26, December 2004.
- Estrin, D., Govindan, R. ve Heidemann, J., *Embedding the Internet*, Communication ACM 43 (2000) 38-41.
- İncebacak, D., Bıçakçı, K. ve Tavlı, B., *Evaluating energy cost of route diversity for security in wireless sensor networks*, Computer Standards and Interfaces, 39 (2015) 44-57.
- Kalpakis, K., Dasgupta, K. ve Namjoshi, P., *Maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks*, Proceedings of IEEE Networks, 2 685-696, 2002.
- Karlof, C., Li, Y.P. ve Polastre, J., *ARRIVE: Algorithm for robust routing in volatile environments*, Teknik Rapor UCB/CSD-03-1233 Kaliforniya Üniversitesi, 2003.
- Krishnamachari, B. ve Ordóñez, F., *Analysis of energy efficient, fair routing in wireless sensor networks through non-linear optimization*, Vehicular Technology Conference, 5, 2844-2848, 2003.
- Kuo, W. ve Zuo, M.J., *Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications*, Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2003; p. 560.
- Liu, H., Nayak, A. ve Stojmenovic, I., *Fault tolerant algorithms/protocols in wireless sensor networks*, Handbook of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks (2009) 261-291.
- Ma, R., Xing, L. ve Michel, H.E., *A new mechanism for achieving secure and reliable data transmission in wireless sensor networks*, in: Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, Woburn, MA, 274-279.
- Nasser, N. ve Chen, Y., *SEEM: Secure and Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*, Computer Communications, 30 (11-12), 2401-12, 2007.
- Ok, C.S., Lee, S., Mitra, P. ve Kumara, S., *Distributed energy balanced routing for wireless sensor networks*, Computers and Industrial Engineering , 57 (2009) 125-136.
- Perillo, M. A. ve Heinzelman, W. B., *Optimal sensor management under energy reliability constraints*, Wireless Communications and Networking, 3 (2003) 1621-1626.



- Rajagopalan, R. ve Varshney, P.K., Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey, *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 8 (4) (2006) 48-63.
- Rault, T., Bouabdallah, A. ve Challal, Y., Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey, *Computer Networks*, 67 (2014) 104-122.
- Sharma, K. ve Ghose, M.K., Wireless sensor networks: An overview on its security threats, *IJCA Special Issue on "Mobile Ad-hoc Networks" MANETs*, 2010.
- Soares, J.M., Franceschinis, M., Rocha, R.M., Zhang, W. ve Spirito, M.A., Opportunistic data collection in sparse wireless sensor networks, *EURASIP Journal on Wireless Communications and networking*, Article ID 401802, 2010.
- Spyropoulos, T., Psounis, K. ve Raghavendra, C.S., Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks, in *Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking*, Philadelphia, Pa, USA, 2005, pp. 252– 259.
- Stavrou, E. ve Pitsillides, A., A Survey on secure multipath routing protocols in WSNs, *Computer Networks*, 54 2215-2238, 2010.
- Ye, F., Chen, A., Lu, S. ve Zhang, L., A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks, In: *Proceedings of 10th International Conference on Computer Communications and Networks*, 304-309, IEEE, Scottsdale, AZ, 2001.
- Y. Wang, G. Attebury. ve B. Ramamurthy, A survey of security issues in wireless sensor networks, *IEEE Comm. Surveys*, vol. 8, no. 2, 2006.
- Url-1 [https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems)  
alındığı tarih: 22.09.2015.

## **EKLER**

EK 1: 41 düğümlü  $CM^{rest}$  için geçerli eşitsizliklerin etkisi.

EK 2: 51 düğümlü  $CM^{rest}$  için geçerli eşitsizliklerin etkisi.

**EK 1**

Çizelge Ek.1 : 41 düğümlü örneklerde  $CM^{rest}$  modeline VI, V2 ve VI-V2 eklendiğinde gerçekleşen çözüm süresi değerleri.

Test	$CM^{rest}$	$CM^{rest}+V1$	$CM^{rest}+V2$	$CM^{rest}+V1+V2$
1	4116,2	3782,7	3932,5	3883,2
2	5637,7	5462,2	5896,4	5117,3
3	4238,8	4418,1	3708,2	4564,5
4	2872,7	2533,2	2818,7	2690,2
5	5894,8	6196,1	5826,7	6237,0
6	3435,2	3098,6	3530,3	3122,6
7	2673,2	2416,6	2522,6	2303,7
8	3976,1	4247,3	4221,4	4251,4
9	6019,1	5491,0	5132,4	5938,0
10	7506,3	6524,2	7414,5	7007,1

**EK 2**

Çizelge Ek.2 : 51 düğümlü örneklerde  $CM^{rest}$  modeline VI, V2 ve VI-V2 eklendiğinde gerçekleşen çözüm süresi değerleri.

Test	$CM^{rest}$	$CM^{rest}+V1$	$CM^{rest}+V2$	$CM^{rest}+V1+V2$
1	7278,4	5561,4	7524,2	5663,7
4	11657,6	10396,4	10711,3	10381,0
5	14400,0	14400,0	11281,5	14400,0
6	13265,3	10338,7	14400,0	10253,0
9	5748,3	4630,7	4265,8	4685,1

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : **Merve Ekmen**  
**Uyruğu** : **T.C.**  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : **06,11,1989 Hatay**  
**E-posta** : **m.ekmen.etu@gmail.com**

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

### YABANCI DİL: İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN SUNUMLAR:

- **Ekmen, M.** and Altın-Kayhan, A., 2015. A conditional multi-copy strategy with multiple central nodes for more secure wireless sensor networks, Proceedings of INOC-2015: International Network Optimization Conference, May 18-20, Warsaw, Poland.
- **Ekmen, M.** ve Altın-Kayhan, A., 2015. Güvenli kablosuz algılayıcı ağlar için çok merkezi düğümlü şartlı çok kopyalı bir yol atama stratejisi, YAEM-2015: 35. Ulusal Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi, 9-11 Eylül, Ankara, Türkiye.