

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

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA FAZLALIĞA DAYALI  
GÜVENİLİRLİK STRATEJİSİ İLE ENERJİ VERİMLİ AĞ TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tuğçe YÜCEL**

**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 131311013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tuğçe YÜCEL**'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA FAZLALIĞA DAYALI GÜVENİLİRLİK STRATEJİSİ İLE ENERJİ VERİMLİ AĞ TASARIM**" başlıklı tezi **17 Aralık 2015** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Sinan GÜREL (Başkan)** .....  
Ortadoğu Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN** .....  
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.

Tuğçe Yücel

İMZA

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

**Tuğçe YÜCEL**

## **KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA FAZLALIĞA DAYALI GÜVENİLİRLİK STRATEJİSİ İLE ENERJİ VERİMLİ AĞ TASARIMI**

### **ÖZET**

Bu çalışmada, belirli bir alana rastgele saçılmış, sınırlı enerjiye sahip çok sayıda algılayıcı ile verilerin toplandığı 1 adet baz istasyonundan (BS) oluşan kablosuz algılayıcı ağın ömrünün eniyilenmesi amaçlanmaktadır. Ağ ömrü pil enerjisi en önce tükenen algılayıcının fonksiyonel olduğu süre ile ölçülmektedir. Diğer yandan dış kaynaklı olası saldırılar ya da bozulmalara karşı ağın güvenilirliği, dengeli kullanım, çok yollu rotalama ve çoklu-kopya gönderimi ile iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Öncelikle her düğümün diğerlerinden alabileceği veri miktarı üstten sınırlandırılmış ve eğer ağ ömrünü iyileştirecekse sadece merkezi olarak adlandırılacak bir algılayıcı için bu sınırın esnetilmesine izin verilmiştir. Bir düğümün merkezi olabilmesi için diğer algılayıcılar için ilettiği toplam veri miktarının veya veri iletiminde rol aldığı sensör sayısının belirlenen eşik değerler üzerinde olmasının ağ ömrünü olumlu şekilde etkilemesi gerekir. Bununla beraber merkezi düğüm ağ üzerindeki veri akışında kritik bir rol oynayacağı için dışarıdan gelebilecek saldırılara veya olası bozulmalara maruz kalma ihtimali sıradan sensörlere kıyasla daha yüksektir. Dolayısıyla geliştirilen stratejide merkezi düğüm üzerinden geçen verinin korunması amacıyla merkezi düğüme doğrudan veri gönderen algılayıcılar bu veriyi kopyalayarak düğüm ayrık yollar üzerinden BS'ye iletmektedirler. Böylece sadece iletileneme ihtimali daha yüksek olan veriler için fazladan kopya oluşturularak makul seviyede kopyalama yapılmaktadır. Algılayıcılar fazladan gönderecekleri veri için de ekstra enerji harcayacakları ve dolayısıyla ağın ömrünün kısalmasına neden olabilecekleri için burada ağ ömrü ve ağ güvenliği arasında bir ödünleşim vardır. Kopyalamanın kontrollü yapılması ağ ömrü üzerindeki etkinin kontrol edilebilmesi açısından da önemlidir. Bahsedilen problem için öncelikle bir karma tamsayı matematiksel model oluşturulmuş ve ek olarak bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Çözüm yöntemlerinin performansları farklı büyüklükteki örnekler için test edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz algılayıcı ağ, Matematiksel modelleme, Çoklu kopya, Çoklu-yol atama, Ağ güvenliği.

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

**Tuğçe YÜCEL**

**EXTENDEN CENTER DESCRIPTION AND NEIGHBOR-COPY WITH  
IMPROVEMENT OF WIRELESS SENSOR NETWORKS**

**ABSTRACT**

We aim to optimize the lifetime of wireless sensor networks, which consist of one data collector base station (*BS*) and numerous randomly scattered sensors with limited energy in this thesis. Network lifetime is measured as the time until the first sensor exhausts its battery. Moreover, we incorporate network security via balanced utilization of sensors and multiple copying against possible external attacks or breakdowns. The amount of data each sensor can receive from others is limited from above by some constant. However, if it would improve network lifetime then only one sensor is allowed to exceed the limit and become a central node. Due to its critical role in data flow, the central node is more likely to be exposed to external attacks or possible breakdowns. To this end, we propose a partial multicopy strategy where sensors transmitting data to the central node would copy that data and send it to the *BS* through node-disjoint paths. Consequently, we can avoid unnecessary data copying to some extent and use energy more efficiently. Transmitting extra data at the expense of extra energy would shorten the network lifetime. Hence there is a tradeoff between network lifetime and network security. We present the mixed-integer programming model of the problem and an optimization based heuristic algorithm developed especially for solving larger instances. We analyze the performance of these solution methods on a large testbed.

**Key Words:** Wireless sensor network, Mathematical modeling, Multiple copy, Multi-path routing, Network security.

## TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. Ayőegöl ALTIN KAYHAN'a, tezimi okuyup değerlendiren Doç.Dr.Hakan GÖLTEKİN'e ve Doç.Dr.Sinan GÖREL'e, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, 112M226 numaralı proje kapsamında verdiği destek nedeniyle TUBİTAK'a, bursu sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ve her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vi
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	vii
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	viii
<b>ÇİZELGELİSTESİ</b> .....	ix
<b>KISALTMALAR</b> .....	x
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	6
2.1 Optimizasyon Tabanlı ve Sezgisel Yaklaşımlar.....	6
2.1.1 Amaç Fonksiyonuna Göre Sınıflandırma .....	7
2.1.2 Baz İstasyonu Özelliklerine Göre Sınıflandırma .....	13
2.1.3 Verilen Karara Göre Sınıflandırma .....	14
2.2 Ağ Güvenliği ile İlgili Çalışmalar .....	15
2.2.1 Güvenlik ve Güvenilirlik Kavramları .....	15
2.2.2 Yapılan Çalışmalar .....	17
2.2.2.1 Alternatif Yolların Kullanıldığı Yaklaşım .....	18
2.2.2.2 Verinin Fragmanlara Ayrılarak İletildiği Yaklaşım.....	22
<b>3. PROBLEM TANIMI VE ENİYİLEME MODELLERİ</b> .....	26
3.1 Varsayımlar ve Parametreler .....	29
3.2 Tek Kopya (TK) Stratejisi .....	30
3.3 Dengeli Tek Kopya (DTK) Stratejisi .....	31
3.4 Dengeli Çift Kopya (DÇK) Stratejisi .....	32
3.5 Dengeli Kısmi Fazlalığa Dayalı Komşuda Kopyalama (DKK <sup>komşu</sup> ) Stratejisi .....	33
<b>4. PERFORMANS ANALİZİ</b> .....	39
4.1 Örneklem Oluşturulması .....	39
4.2 Parametreler .....	40
4.3 Test Sonuçları.....	42
4.3.1 Ağ Ömrü .....	42
4.3.2 Ağ Güvenilirliği .....	47
4.3.3 Toplam/Maksimum/Minimum Kalan Enerji Oranı .....	51
4.4 Kaynakta Kopyalama Stratejisi ile Yapılan Karşılaştırma.....	56
4.5 Sonuçların Genel Değerlendirmesi .....	59
<b>5. SEZGİSEL YAKLAŞIM</b> .....	63
5.1 Performans Testi ve Analizler .....	65
<b>6. SONUÇ ve ÖNERİLER</b> .....	69
<b>KAYNAKLAR</b> .....	74
<b>EKLER</b> .....	78
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	98

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : KAA’larda Güvenli Çoklu Yol Ataması .....	16
Şekil 3.1 : Modellere Ait Çözümler .....	28
Şekil 4.1 : Verilerin Üretildiği Algoritma. ....	39
Şekil 4.2 : Modellerin Ortalama Ağ Ömrü Değerleri .....	44
Şekil 4.3 : TK, DTK, DÇK ve DKK <sup>komşu</sup> Modelleri için Ortalama Kayıp Veri Oranı .....	48
Şekil 4.4 : Modellere Ait <i>İyi</i> Durumdaki OAS .....	51
Şekil 4.5 : Modellere Ait <i>Orta</i> Durumdaki OAS .....	51
Şekil 4.6 : Modellere Ait <i>Kötü</i> Durumdaki OAS .....	51
Şekil 4.7 : Modellere Ait Ortalama TKE Oranı .....	53
Şekil 4.8 : Modellere Ait Ortalama MKE Oranı .....	54
Şekil 4.9 : Stratejilere Ait Ortalama Tüm Enerjisinin Kullanan Algılayıcı Sayısı .....	56
Şekil 4.10 : ‘Kaynakta Kopyalama’ ve DKK <sup>komşu</sup> Stratejilerine Ait Ortalama Çözüm Süreleri .....	58
Şekil 5.1 : Sezgisel Yönteme Ait Aşamalar.....	63



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Farklı Ağ Yapıları Üzerinde Yapılan Çalışmalar .....	7
Çizelge 3.1 : Geçerli Eşitsizlikler ve Açıklamaları .....	38
Çizelge 4.1 : Sabit ve Değişken Değerdeki Parametreler .....	40
Çizelge 4.2 : Modellerin Farklı Ağ Büyüklüklerine Ait Ortalama Ağ Ömrü Değerleri .....	43
Çizelge 4.3 : TK Modeline Göre Diğer Modellerin Ağ Ömürlerindeki Oransal Azalma.....	44
Çizelge 4.4 : DTK Modeline Göre DKK <sup>komşu</sup> Modelinin Ağ Ömründeki İyileşme Oranları .....	46
Çizelge 4.5 : MD Üzerinden Geçen Ortalama Veri Oranı .....	47
Çizelge 4.6 : MD'nin Çökmesi Sonucu İletilemeyen Ortalama Veri Oranı .....	48
Çizelge 4.7 : TK, DTK ve DKK <sup>komşu</sup> Modelleri için Güvenilirlik Yönünden Sınıflandırılmış Ortalama Algılayıcı Sayısı Oranı.....	50
Çizelge 4.8 : Stratejilere Ait Ortalama TKE Oranları.....	52
Çizelge 4.9 : Stratejilere Ait Ortalama MKE Oranı .....	54
Çizelge 4.10 : Stratejilere Ait Ortalama Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı.. .....	55
Çizelge 4.11 : 'Kaynakta Kopyalama' ve DKK <sup>komşu</sup> Stratejilerine ait Ortalama Çözüm Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.....	57
Çizelge 4.12 : Kısıtlı Kaynak Sayısına Sahip DKK <sup>komşu</sup> ve Komşuda Kopyalama Stratejilerinin Ortalama Ağ Ömrü ve Çözüm Süreleri.....	59
Çizelge 5.1 : 51 Düğümlü Örnek için DKK <sup>komşu</sup> Modeline ve Sezgisel Yönteme ait Çözüm Süreleri.....	66
Çizelge 5.2 : 61 Düğümlü Örnek için DKK <sup>komşu</sup> Modeline ve Sezgisel Yönteme ait Çözüm Süreleri.....	67
Çizelge 5.3 : 71 Düğümlü Örnek için DKK <sup>komşu</sup> Modeline ve Sezgisel Yönteme ait Ağ Ömrü Değerleri.....	68

## KISALTMALAR

<b>ARMS</b>	: Authenticated Routing Message in Sensor Networks
<b>ARRIVE</b>	: Algorithm for Robust Routing in Volatile Environments
<b>BS</b>	: Baz İstasyonu (Base Station)
<b>CNS</b>	: Ortak Komşu Değişirme (Common Neighbor Switching)
<b>CRDST</b>	: Chang-Roberts Dağıtılmış Kapsar Ağaç (Chang-Roberts Distributed Spanning Tree) algoritması
<b>DBF</b>	: Dağıtılmış Bellman-Ford (Distributed Bellman-Ford) algoritması
<b>DÇK</b>	: Dengeli Çift Kopya
<b>DKK</b>	: Dengeli Komşuda Kopyalama
<b>DMMT</b>	: Dağıtılmış Minimum-Maksimum Ağaç (Distributed Minimum-Maximum Tree) algoritması
<b>DTK</b>	: Dengeli Tek Kopya
<b>EER</b>	: Genişletilmiş Enerji Talebi (Extended Energy Request) algoritması
<b>EERL</b>	: Genişletilmiş Enerji Talebi En Uzun Yol Rotalaması (Extended Energy Request Shortest Rerouting) algoritması
<b>EERS</b>	: Genişletilmiş Enerji Talebi En Kısa Yol Rotalaması (Extended Energy Request Longest Rerouting) algoritması
<b>FEC</b>	: İleri Hata Düzeltme (Forward Error Correction) algoritması
<b>GA</b>	: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
<b>GAF</b>	: Geographic Adaptive Fidelity (Coğrafi Şartlara Uyarlanabilen) algoritma
<b>GRASP</b>	: Açgözlü Rastgele Uygun Araştırma Prosedürü (Greedy Randomized Adaptative Search Procedure)
<b>GR_DFS</b>	: Açgözlü Rastgele Derinlemesine Araştırma (Greedy Randomized Depth First Search)
<b>HM</b>	: Hesaplanan Mesafe
<b>INSENS</b>	: KAA'larda Araya Girme Hatalarına Dirençli Rotalama (Intrusion Tolerant Routing in WSNs)
<b>KAA</b>	: Kablosuz Algılayıcı Ağ
<b>MANET</b>	: Mobil Geçici Ağ (Mobile Ad-hoc Network)
<b>MD</b>	: Merkezi Düğüm
<b>MKE</b>	: Maksimum Kalan Enerji
<b>MLS</b>	: Maksimum Ağ Ömrü Aralığı (Maximum Lifetime Spanner)
<b>NWS</b>	: Komşu Arama Sistemi (Neighbor Watch System) algoritması
<b>OAS</b>	: Ortalama Algılayıcı Sayısı
<b>SA</b>	: Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing) algoritması
<b>SEEM</b>	: Güvenli ve Enerji Verimli Çok Yollu Rotalama (Secure and Energy-Efficient Multipath Routing) protokolü
<b>SeRINS</b>	: KAA'larda Güvenli Alternatif Yol ile Rotalama (Secure Alternate Path Routing IN Sensor Networks) protokolü
<b>SHM</b>	: En Kısa Adımlı Çoklu Yol (Shortest Hop Multipath) algoritması
<b>TK</b>	: Tek Kopya
<b>TKE</b>	: Toplam Kalan Enerji

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Ayrıt kümesi
$\alpha$	Dengeli kullanım katsayısı
$\beta$	Güç yitim katsayısı
BS	Baz istasyonu
$d_{ij}$	Öklid mesafesi
$E_i$	Başlangıç enerjisi
$\varepsilon$	Verici verimlilik katsayısı
$G(N,A)$	Yönlü çizge
N	Algılayıcı kümesi
$N_0$	BS hariç algılayıcı kümesi
PRX	Bir birim veriyi almak için harcanan enerji
$PTX_{ij}$	Bir birim veri göndermek için i'nin harcadığı enerji miktarı
r	Yarıçap
$\pi$	Pi sayısı (3,14)
$S_i$	Birim zamanda üretilen veri miktarı
t	Ağ ömrü
xc	Yatay koordinat eksen
$x_{ij}^k$	Birincil akış miktarı
yc	Düşey koordinat eksen
$y_{ij}^k$	İkincil akış miktarı
$\rho$	Elektronik devrelerde harcanan enerji miktarı

## 1. GİRİŞ

Farklı mekânlardaki sıcaklık, nem, ışık, ses, basınç, kirlilik, toprak bileşimi, gürültü seviyesi, titreşim, nesne hareketleri gibi fiziksel ya da çevresel koşulları kooperatif bir şekilde izlemek için sensor (algılayıcı) kullanan ve birbirinden bağımsız çalışan araçlar içeren kablosuz ağlara "Kablosuz Algılayıcı Ağlar" (KAA'lar) denir. Tipik bir KAA kablosuz bir ortam aracılığı ile birbirine bağlanmış sınırlı enerji, hafıza ve işlem kapasitesine sahip çok sayıda algılayıcı ve daha gelişmiş kaynakları olan bir veya daha fazla baz istasyonundan (BS) oluşmaktadır. Algılayıcılar gözlem alanına düzenli veya rastgele olarak yerleştirilirler ve genellikle gözetimsiz olarak bırakılırlar. Her algılayıcı kendi kapsama alanı içerisindeki alanı gözlemler, meydana gelen değişiklikleri uygun veri formatına dönüştürür ve veriyi doğrudan veya diğer algılayıcılar üzerinden BS'ye gönderir. Donanım ve kablosuz sistemlerdeki gelişmeler düşük maliyetli, düşük güç tüketimli, çok işlevli minyatür algılama aygıtlarının üretilmesine olanak sağlamıştır. Bir KAA bilgiye her an ve her yerden kolayca erişilmesini sağlar. Bu işlevi veriyi toplayarak, işleyerek, çözümleyerek ve yayarak yerine getirir. Böylece ağ, bilginin rahatlıkla erişilebildiği etkin bir ortam oluşmasında rol oynamış olur.

Kablolu ağlara kıyasla KAA'ların birçok önemli avantajı bulunmaktadır. Güvenilirlik, doğruluk, esneklik, maliyet verimliliği ve kurulum kolaylığı bu özelliklerin en önemlileridir. Bu tip ağlar, insan bakımına gereksinim duymayan fiziksel olarak ayrılmış pek çok algılayıcı içerebilmektedir. Tek bir algılayıcının menzil alanı küçük de olsa, yoğun olarak alana saçılmış algılayıcıların birbirleri ile iletişim kurmaları sayesinde, ağın kapsama alanı genişletilmektedir. Aynı zamanda neredeyse tüm çevre ortamlarında uygulanabilirler. Özellikle mevcut kablolu ağların çalışmasının imkânsız olduğu ya da kullanılmadığı savaşı alanları, atmosferin dışı, derin okyanuslar gibi yerlerde kullanılabilirler. KAA'lar, kullanıcıya kadar kablolama gerektiren geleneksel algılayıcı sistemlerin aksine hem çok daha yüksek veri iletim hızına sahiptirler hem de hataya karşı daha dayanıklıdırlar. Dahası, her algılayıcı kablosuz iletişim yeteneğine ve veriyi işlemeye yetecek donanıma sahip olarak üretilmektedir. Fakat algılayıcıların sınırlı enerji, işlem gücü ve iletişim

kaynaklarına sahip olmaları geniş bir alanda oldukça fazla algılayıcının kullanılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, KAA'ların düşük fiyatları ve yerleşim/kurulum aşamasındaki kolaylıkları ile daha düşük maliyetli oldukları söylenebilmektedir.

Her ne kadar KAA'lar ilk olarak askeri amaçlarla kullanılmış olsalar da günümüzde, sivil amaçlarla da kullanılmaktadırlar. Örneğin; çevre denetimi, yurt içi güvenlik, stok yönetimi ve hasta durum takibi gibi çok çeşitli alanlar bu kapsam dâhilindedirler (Akkaya ve Younis [1], Akyıldız ve diğ. [2]).

Askeri veya savunma alanlarında uygulamalarında KAA'lar komuta kontrol, iletişim, hesaplama, istihbarat, nezaret, keşif ve hedef tespit sistemlerinin ayrılmaz birer parçasıdır. Özellikle ABD'de meydana gelen 11 Eylül saldırısından sonra dışarıdan gelebilecek terör saldırılarının tespiti için kablosuz algılayıcıların kullanımında artış görülmüştür (Zussman ve Segall [52]). Belirli bir coğrafi alana yayılan yüzlerce ya da binlerce ufak, ucuz, öz uyumlu kablosuz algılayıcı, çevre izleme ya da çevre kontrolü işlemlerinde geniş yelpazeli uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca afet veya hasta durum takibi gibi uygulamalarda zamanında ve etkin sağlık hizmetlerinin sağlanması ile insanlık için daha sağlıklı bir ortamın oluşturulması açısından da oldukça yardımcıdır. Afetlerde dağıtılmış KAA'lar aracılığı ile doğru ve zamanında yapılan yer tespiti, kurtarma operasyonlarında hayati önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra ölü sayısı, potansiyel tehlikenin veya acil durumun kaynağı, kimlik tespit işlemleri ve kurtarılmayı bekleyen insanların tespiti de algılayıcılar sayesinde toplanılabilen hayati veriler arasında bulunmaktadır. KAA'lar tüm insanlık için daha rahat ve akıllı yaşam alanlarının oluşturulmasında da rol alabilmektedirler. Örneğin; uzaktan ölçüm yapılarak gaz, elektrik, oda sıcaklığı gibi veriler kablosuz ağ aracılığı ile istenen noktaya gönderilebilmekte ya da parkmetrenin süresinin dolmak üzere olduğu araç sahibine iletilebilmektedir.

Özellikle ulaşılması zor ve tehlikeli bölgelere yerleştirilen KAA'lar için enerjinin etkin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Algılayıcılardan birinin bile enerjisinin bitmesi ağın belli bir bölümü ile iletişimin kopmasına veya sınırlı bir şekilde gerçekleştirilmesine neden olabilirken ağ koordinasyonunu oldukça olumsuz bir

şekilde etkileyebilmektedir. Kritik alanlarda kullanılan bu tip ağlarda bağlantının beklenmedik bir şekilde kesilmesi olası bir yangının zamanında kontrol altına alınamamasına, dışarıdan ülke sınırlarına yapılacak bir saldırının engellenememesine, yoğun bakımdaki bir hastanın kurtarılamamasına veya daha büyük felaketlerin önünün alınamamasına sebep olabilecektir. Bu nedenle algılayıcıların enerjilerini etkin kullanmaları sağlanarak işlevlerini mümkün olduğunca uzun devam ettirebilmeleri önemli hale gelmektedir.

Algılayıcılar buldukları ortama ait verinin sezilmesi, işlenmesi ve diğer algılayıcılara iletilmesi için enerji harcarlar. Literatürde var olan çoğu çalışmada bir KAA'nın ömrünün enerjisi ilk olarak tükenen algılayıcının ömrüne veya ağdaki algılayıcıların belli bir oranının enerjisi tükenene kadar geçen zamana eşit olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla bütün algılayıcıların enerji tüketimlerinin dengeli ve verimli olması ağın ömrünün uzatılması açısından önemlidir. Kullanım sıklığına bağlı olarak bir sensörün enerjisi çok çabuk tükenirken diğer bazı sensörlerde çok fazla artık enerjinin kalması dengeli kullanım ile engellenebilmektedir. Bu amaçla tercih edilen yöntemlerden biri algılayıcıların iletebilecekleri veri miktarlarının sınırlandırılması ve dolayısıyla da herhangi bir sensörde diğerlerine göre bariz bir enerji darboğazı olmasının engellenmeye çalışılmasıdır.

Bu tez çalışması kapsamında hem enerji verimli KAA'lar tasarlayarak ağ ömrünün en iyi seviyelere ulaşması amaçlanmakta hem de geliştirilen yeni bir güvenlik protokolü sayesinde ağ güvenilirliğinin iyileştirilmesi ele alınmaktadır. Bu amaçla bir karma tam sayılı model oluşturularak önerilen stratejiye uygun işleyen ve en uzun ağ ömrüne sahip tasarımın belirlenmesine çalışılmıştır. Geliştirilen yaklaşımda algılayıcıların dengeli kullanımı istenirken çoklu yollar üzerinden veri iletimine izin verilmektedir. Burada amaç, hem enerji verimliliğinin sağlanması hem de belli algılayıcıların veri iletiminde kilit rol oynamalarının engellenmesi suretiyle olası saldırılara karşı veri korunaklılığının artırılmasıdır. Şöyle ki her sensörün verisini tek bir yoldan merkeze iletmesi durumunda o yol üzerindeki herhangi bir algılayıcının dışarıdan dinlenmesi veya bloke olması halinde ilgili kaynağa ait bütün veri ele geçirilmekte veya algılayıcının merkez ile bağlantısı tamamen kesilmektedir. Benzer şekilde herhangi bir algılayıcının ağın verisinin büyük çoğunluğunun

iletiminde kullanılmasına izin verilmesi durumunda sadece o algılayıcının ele geçirilmesi veya bozulması ağ bütünlüğü açısından ciddi tehlike arz etmektedir. Bununla beraber algılayıcıların kullanım oranlarının sınırlandırılması bütün verinin en enerji verimli yollar üzerinden iletilmesini engelleyebilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, eğer ağ ömrü açısından faydalı olacaksa, en fazla bir algılayıcının, kendisine gelen verinin o veriyi doğrudan ileten algılayıcı tarafından kopyalanması koşuluyla, veri iletim kısıtının gevşetilmesine izin veren, kısmi fazlalığa dayalı bir güvenilirlik stratejisi geliştirilmiştir. Bu özel düğüm “merkezi düğüm” (MD) olarak adlandırılmaktadır ve kopyalanmış olan verinin de düğüm ayrık yollar üzerinden *BS*'ye iletilmesi gerekmektedir. Enerji tüketimi açısından en kısa yolların daha fazla kullanılabilir olmasının getirisi ile fazladan kopya iletiminin gerektireceği ekstra enerji tüketimi arasındaki ödünleşime bağlı olarak MD seçilip seçilmeyeceğine ve dolayısıyla da kopyalama yapılıp yapılmayacağına karar verilen strateji, Dengeli Komşuda Kopyalama ( $DKK^{komşu}$ ) olarak adlandırılmaktadır. Önerilen DKK stratejisinde algılayıcılar dengeli kullanılmakta; ancak eğer sistemde diğer algılayıcıların veri transferinde yoğun kullanımıyla ağ ömrünü iyileştirebilecek bir düğüm varsa bu düğüm merkezi olarak seçilerek iletebileceği toplam veri miktarı serbest bırakılmaktadır. Bunun yanı sıra sadece merkezi olarak seçilen düğüm üzerinden iletilen veri paketlerinin kendisine doğrudan veriyi ileten düğüm veya düğümler tarafından kopyalanması ve kopya verinin asıl veriyle düğüm ayrık yollar üzerinden *BS*'ye iletilmesi sağlanmaktadır. Veri kaybının önlenmesi adına yapılan kopyalama işlemi ile beraber iletim sırasında düğüm ayrık yolların izlenmesi ağ güvenilirliğini arttıran önlemlerden biri olarak düşünülmektedir. Çalışma kapsamında önerilen strateji için öncelikle bir karma tam sayılı model geliştirilmiştir. Ayrıca ticari çözümlerle makul sürelerde çözülemeyen büyük ölçekli ağlarda kaliteli çözümler elde etmek amacıyla da etkin bir sezgisel yöntem önerilmiştir.

Bu tez çalışmasının ana başlıkları altında öncelikle Bölüm 2'de konuyla ilgili incelenen literatür çalışmaları farklı problem tiplerine ve çözüm yaklaşımlarına göre alt başlıklara ayrılarak incelenmektedir. Bölüm 3'te problem tanımı yapılmakta ve hem  $DKK^{komşu}$  için geliştirilen matematiksel modelden hem de çalışmada kullanılan diğer yardımcı modellerden ayrıntılı şekilde bahsedilmektedir. Bölüm 4 JAVA

programı içerisinde CPLEX kütüphanesi kullanılarak yapılan performans analizi çalışmalarını içermektedir. Yapılan testlerde alternatif stratejiler ağ ömrü, kayıp veri miktarı ve kalan enerji kriterleri açılarından karşılaştırılmaktadır. Ayrıca ele alınan konuyla ilgili önceden yapılmış ve kopyalamanın komşuda değil verinin kaynağında yapılmasını öngören (Şendil ve Altın-Kayhan [46]) ile performans karşılaştırmaları yapılmaktadır. Bölüm 5'te ise problemin boyutunun artması ile modelin optimal çözümünün makul zaman sınırları içerisinde bulunamadığı durumlar için geliştirilen sezgisel yöntemden bahsedilmekte ve detaylı performans analizleri yapılmaktadır. Son olarak Bölüm 6'da elde edilen sonuçların tamamı özetlenerek çalışmanın genel bir değerlendirmesi sunulmaktadır.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde konuyla ilgili incelenen çalışmalar iki ana başlık altında toplanmıştır. İlk olarak Bölüm 2.1’de ağ ömrünü veya toplanan veri miktarını iyileştiren optimizasyon tabanlı ve sezgisel yaklaşımlar ele alınmıştır. Ardından Bölüm 2.2’de ağ güvenliğini geliştirmeyi amaçlayan çalışmalara yer verilmiştir.

### 2.1 Optimizasyon Tabanlı ve Sezgisel Yaklaşımlar

Kurulumları için herhangi bir altyapı gereksinimlerinin olmaması ve birçok durumda ağda bulunan düğümlerin bakım onarım ve enerjilerini yenileme imkânının bulunmaması KAA’ların genel özellikleri arasında yer almaktadır. Bu yüzden sahip olunan enerjinin verimli bir şekilde kullanılması KAA’ların kullanım devamlılığı açısından önemlidir (Tavlı ve diğ. [48]). Literatürde bu konu ile ilgili farklı yaklaşımlarda bulunarak kısıtlı enerjiye sahip olan algılayıcıların kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması sonucunda ağ ömrünün iyileştirilmesini amaçlayan birçok çalışma bulunmaktadır. Günümüzde birçok alanda kullanılıyor olmaları KAA’ların verimliliğini arttıracak protokollerin ve algoritmaların geliştirilmesine de zemin hazırlamıştır. Önerilen protokoller arasında en sık rastlanılanlar, veri transferi işleminin mümkün olduğunca enerji verimli yollar üzerinden yapılmasına çalışılan ‘rotalama protokolleri’ olmuştur. Çözüm yöntemi olarak optimizasyon temelli yaklaşımlardan ziyade sezgisel yöntemlerin daha çok tercih edildiği görülmüştür.

Tez kapsamında incelenen çalışmalar çözüm yöntemi, amaç fonksiyonu, *BS*’nin nitelik/nicelik durumu ve karar yapısı açısından Çizelge 2.1’de gösterilen şekilde gruplandırılmıştır. Amaç fonksiyonu kapsamında değerlendirme yapıldığında ağ ömrünün en büyüklendiği, ağ ömrü belirlendikten sonra algılayıcılarda kalan enerjinin en küçüklendiği, iletilmesi gereken veri miktarı için toplam harcanan enerjinin en küçüklendiği ve transfer enerjisinin en küçüklendiği çalışmalara rastlanılmıştır. Bunun yanı sıra *BS*’nin tek/çok sayıda ve statik/mobil olduğu farklı varsayımlar ele alınarak ağ ömrünün durumu incelenmiştir. Çözüm yöntemleri kapsamında önerilen yeni protokollerin işleyişlerinin kurgulanması için optimizasyon tabanlı veya sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Bu protokoller ağın yapısını ve

işleyişini belirleyen ağ ömrü üzerinde en olumlu etkiye sahip yol veya yolların tespit edilmesi, sensörler arasında en uygun mesafeyi sağlayan konumların belirlenmesi gibi kurallardan oluşmaktadır. Optimizasyon tabanlı çalışmalarda daha çok *BS*'nin statik olduğu varsayılmış ve tek veya farklı tiplerde sensörlerin olduğu homojen veya heterojen ağlar için amaç fonksiyonlarının en iyilenmesine çalışılmıştır. Sezgisel yaklaşıma ise genelde optimal çözüm elde edilemediği durumlar için başvurulmuştur.

Çizelge 2.1 : Farklı Ağ Yapıları Üzerinde Yapılan Çalışmalar.

Amaç Fonksiyonu	Baz İstasyonu	Verilen Karar
Ağ Ömrü Maksimizasyonu ([9], [22], [23])		
Transfer Enerjisi Minimizasyonu ([16], [43])	Tekli/Çoklu ([7])	Bölge Atama ([6], [7])
Toplam Harcanan Enerji Minimizasyonu ([11],[13],[15],[28],[32])	Statik/Mobil ([10], [31])	Mesafe Belirleme ([38], [42])
Maksimum Kalan Enerji Minimizasyonu ([3], [41])		

### 2.1.1 Amaç Fonksiyonuna Göre Sınıflandırma

Ağ ömrünün en büyüklendiği çalışmalardan bahsedilirse, durağan bir ağ topolojisinin dikkate alınarak ağ ömrünün en büyükmeye çalışıldığı diğer çalışma Chang ve Tassiulas [9]'da ele alınmıştır. Çalışmada verilerin bölünerek yollanmasına yani çoklu yol kullanımına izin verilmiştir. Çözüm yöntemi olarak algılayıcıların sahip oldukları enerjiye göre dengeli kullanımlarını sağlayan Akış Yönlendirme ve En

Büyük Kalan Enerjili Yol algoritmaları önerilmiştir. Bütün algılayıcıların aynı başlangıç enerjisine sahip olduğu tek enerji seviyeli durumda, problem yapısının algılayıcıların belli kapasite kısıtlarına sahip olduğu en fazla akış problemine dönüştüğü ve dolayısıyla da algoritmaların optimal çözümü bulabildikleri görülmüştür. Diğer yandan çok seviyeli enerjinin olduğu ağ yapısı için ise optimal sonuca %10 uzaklıkta ulaşılabilmektedir. Kacimi ve diğ. [22]'de verinin çok adımlı(multi-hop) yollar kullanılarak *BS*'ye iletiildiği bir tasarım geliştirilmiştir. Çalışmada 2-D ağ topolojisi baz alınmış, algılayıcılar arası mesafelere köşegenler de dahil edilmiş ve sistemden ilk ayrılan algılayıcının aktif yaşam süresi tüm ağın ömrü olarak kabul edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak öncelikle ağ ömrünü en büyükleyen bir matematiksel model ve sonrasında da etkili bir sezgisel geliştirilmiştir. Bu sezgiselde algılayıcıların dengeli şekilde kullanılmaları ve dolayısıyla da aralarındaki enerji tüketiminin birbirlerine yakın olması sağlanmıştır. Bunun için birbirleriyle iletişimi olan algılayıcılar arasında adım-adım rotalama ve yük dengelemesi yapılmaya çalışılmıştır. Sezgisel yöntemden elde edilen çözüm optimal çözümle verinin iletiminde izlenen en-kısa yol uzunluğuna ve ağın genelinde dengeli kullanım oranına göre karşılaştırılmıştır. Testler sonucunda sezgisel yöntemin optimale çok yakın değerler bulabildiği görülmüştür. Ancak farklı enerji seviyelerine sahip ağlarda bu tip metotların uygulanabilirliğinin zor olduğu belirtilmiştir. Kalpakis ve diğ. [23]'te ise algılayıcıların veriyi periyodik olarak üretip *BS*'ye yolladığı ve ağ ömrünün ağın aktif yaşam süresi içindeki toplam periyot sayısına eşit olduğu durum ele alınmıştır. Çözüm yöntemi olarak optimizasyon ve sezgisel tabanlı iki yaklaşım sunulmuştur. Daha küçük boyutlu problemler için önerilen tam sayılı programlama modeli kullanılırken, problemin boyutu büyüdüğünde modelin çözüm yakalamada yetersiz kaldığı görülerek kümeleme tabanlı bir sezgisel algoritma kullanılmıştır. Her iki yaklaşımın da bilinen veri toplama protokollerinden(data-aggregation protocols) daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Montemanni [33]'te iletişim protokolleri için tam sayılı doğrusal programlama kullanılarak gerçekçi bir model oluşturmanın mümkün olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada ağ tipi olarak yayın topolojisine (broadcast topology) odaklanılmış, farklı olarak algılayıcıların ağın dışarıdan dinlendiğini sezdiği anda iletilen mesajın ele geçirilmemesi için bir süreliğine uyku hâline geçebildiği varsayılmış ve algılayıcıların birbirlerinden farklı enerji

seviyelerinin olduğu heterojen ağ üzerinde çalışılmıştır. Ağ ömrünün eniyilenmeye çalışıldığı problemler analiz edilip, bu problemlere etkili çözümler sunabilecek gerçekçi  karma tam sayılı model geliştirilmiştir. Ancak her üç modelin ağ içerisinde alt döngü (subset) oluşumunu engelleyen üstel sayıdaki kısıtlara sahip olması bu modellerin çözüm almada yetersiz kalmasına neden olmuş bu yüzden sezgisel yönteme başvurulmuştur. Modeller; temel iletişim protokolüne dayalı temel ve gelişmiş enerji modelleri ile akıllı iletişim protokolüne dayalı gelişmiş enerji modelleridir. Benzetim testleri sonucunda son iki modelin ilk modelden çözüm süresi olarak daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Sezgisel yöntem için ise daha hızlı sonuç alınabildiği görülmüştür.

Ağ mr belirlendikten sonra ağ üzerinde kalan enerji miktarı da aslında enerjinin ne derece efektif kullanıldığının bir göstergesidir. Buna bağlı olarak literatürdeki bazı çalışmalarda sistemde kalan enerji miktarının azaltılmaya çalışılmasının ağ ömrünü iyileştirebileceğinden bahsedilmektedir. Bunlardan Alfieri ve diğ. [3]'te ağ ömrünü iyileştirmek amacıyla ağda kalan maksimum enerjinin en küçüklenmeye çalışıldığı yaklaşım ele alınmıştır. Ağ düzeni açısından, ağın bütün olarak değil birbirinden ayrıık alt sınıflarının farklı zaman aralıklarında çalıştığı varsayımı yapılmıştır. Ağ mr, algılayıcıların enerjilerinin bitmesiyle daralan aktif kapsama alanının belirlenen minimum kapsama alanının üstünde kaldığı süre olarak tanımlanmıştır. Algılayıcıları optimal şekilde izelgeleyerek enerjilerinin etkili kullanımını sağlamak ve dolayısıyla da ağ ömrünü eniyilemek amaçlanmıştır. Bu, aynı zamanda hedeflenen kapsama alanının da eniyilenmesi anlamına gelmektedir. NP-zor olan problemin çözümü için rotalama ve çizelgeleme tabanlı iki sezgisel yaklaşım sunulmuştur. Bunlardan ilki, daha küçük boyutlu problemlerde sonuç alınabilmesi için önerilen sütün türetme tabanlı (column-generation based) yaklaşım ve diğerisi ise daha büyük ağlar için kullanılan açgözlü algoritmadır (greedy algorithm). Sonuçlar incelendiğinde sütün türetme yaklaşımının daha iyi sonuçlar verdiği ancak gerçek hayata uygulanmasının daha zor olduğu belirtilmiştir. Schumacher ve diğ. [41]'de ağ ömrünü eniyilemek için, ağ üzerinde erişimin sağlanabileceği minimum enerji seviyesini belirleyen ve algılayıcılara veri transferi işlemi için uygun enerji seviyelerinin atamasını gerçekleştiren algoritma yardımıyla BS<sub>PAN</sub> protokolünü

oluşturmuşlardır. Önerilen yöntemin performansı DMMT (Distributed Min-Max Tree) ve MLS (Maximum Lifetime Spanner) algoritmalarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Buna göre  $BS_{PAN}$ 'nin diğer algoritmalara kıyasla daha uzun ağ ömrüne ulaştığı görülmüştür.

Ağ ömrünü uzatmak için literatürde sıkça rastlanan ve farklı yaklaşımlarla tasarlanmış yönlendirme algoritmaları mevcuttur. Örneğin, Madan ve Lall [30] ve Sankar ve Liu [40]'da dağıtık yönlendirme algoritmaları tasarlanarak en iyi veri iletim yollarının bulunması sağlanmıştır. Hua ve Yum [20]'de ise geometrik bilgileri baz alan bir yönlendirme algoritması tasarlanmıştır. Park ve Srivastava [36], Shah ve Rabaey [37], Singh ve diğ. [44] ve Youssef ve diğ. [51]'de KAA'lar için enerji odaklı yönlendirme protokolleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu protokollerde en iyi yolun seçimi yol üzerinde bulunan sensör düğümlerinin sahip oldukları enerjilere göre yapılmaktadır. Daha çok enerjiye sahip düğümler az enerjiye sahip düğümlere tercih edilmektedir. Yol seçiminde transfer enerjisinin en küçüklendiği yaklaşımlar da vardır ([16], [43]). Bu algoritmalarda iletim enerjisini azaltmak için ortalarda yer alan düğümler tercih edilmektedir. Veri kümelenmesi yöntemi kullanılarak, yani iletilen verilerin ortak sensör tarafından birleştirilip tek bir yol üzerinden yönlendirildiği, ağda bulunan gereksiz verinin bertaraf edilip bu sayede trafiği azaltma yoluna gidildiği çalışmalar da mevcuttur (Cristescu ve diğ. [12], Goel ve Estrin [17]). Ancak, seçilen yol üzerinde veri akışının olması bu yol üzerinde bulunan düğümlerin kullanılmayan diğer düğümlere göre enerjilerinin daha erken tükenmesine dolayısıyla düğümler arasındaki kalan enerji miktarının dengesiz dağılımına sebep olmaktadır. Bu sorunu engellemek ve trafiği ağ üzerinde dengeli şekilde dağıtmak için Heinzelman ve diğ. [19] ve Sadagopan ve Krishnamachari [39]'da ağ akış modelleri tanımlanmıştır.

Ağ ömrünün iyileştirilmesi amacıyla ağda harcanan toplam enerjinin azaltılmasına yönelik çalışmalar da mevcuttur. Bunlardan Cheng ve diğ. [11]'de,  $BS$ 'ye yakın konuşlanmış algılayıcıların aşırı kullanımlarından doğacak dengesiz enerji dağılımının ağ ömrü üzerindeki negatif etkisini azaltmaya yönelik bazı stratejiler incelenmiştir. Bu stratejiler, tekli/çoklu sabit/hareketli  $BS$  kullanımı, başlangıç enerjilerinin düzgün dağılımdan farklı bir dağılımla üretilmesi, farklı seviyelerde

transfer enerjisi miktarı belirlenmesi ve akıllı sensör yerleşimi gibi çeşitli özelliklere göre farklılaşmaktadır. Önerilen yöntem, bu stratejilerin ağ ömrü performansı açısından ölçüm ve analizlerinin yapıldığı ağ ömrünü enbüyükleyen bir doğrusal matematiksel modelden oluşmaktadır. Temel olarak ağ üzerinde optimal enerji dağılımı haritası çıkartıldıktan sonra mevcut ağda enerjinin nerelerde etkili kullanılmadığı tespit edilerek, her bir algılayıcının nereye konuşlandırılacağı ve her birine ait başlangıç enerjisinin ne kadar olması gerektiği tespit edilmektedir. Bu yaklaşımla sadece belirli kısıtlar altında ağ ömrü eniyilenmeye çalışılmamakta aynı zamanda yerleşim stratejileri karmaşıklıkça ortaya çıkan ek maliyetler de göz önünde bulundurularak pratikte de uygulanabilir bir çözüm yöntemi elde edilmektedir. Ding ve diğ. [13]'te ise ağ büyüklüğüne bağlı olarak algılayıcıların enerjilerini dengeli kullanmalarını sağlayan, ağ ömrünün eniyilendiği bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada, komşu değiştirme ve tekrar rotalama yolu (rerouting path) olmak üzere iki yöntemden bahsedilmiştir. Sunulan metot ise mevcut protokollerden farklı olarak rotalar arası yük dengeleme üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşımla ağ üzerindeki algılayıcıların bir kısmında veri yoğunluğu sebebiyle meydana gelebilecek dar boğaz engellenmiş olmaktadır. Algoritmayı detaylandırmak gerekirse, *BS*'ye belli periyotlarda tekrar rotalanmak üzere veri iletimi gerçekleştirilmektedir. Bu yol üzerinde uğranılan her bir düğümün o yol üzerinde olmayan komşusu ile aralarındaki enerji farkı Ortak Komşu Değiştirme (Common Neighbor Switching(CNS)) algoritması ile hesaplanmakta ve eğer enerji miktarları arasında ciddi bir fark varsa ikili komşu değişimi işlemi yapılarak mevcut belirlenen rotaların enerji seviyeleri dengelenmektedir. CNS'nin, Genişletilmiş Enerji Talebi (Extended Energy Request (EER)) sınıfındaki algoritmalar arasında en iyi performansı gösteren algoritma olduğundan bahsedilmiştir. CNS yaklaşımının yeniden rotalama yaklaşımından daha iyi sonuçlar verdiği tekrar yol rotalama mantığı ile işleyen "En Kısa Yol Bazlı Tekrar Rotalama (Shortest Rerouting (EERS))" ve "En Uzun Yol Bazlı Tekrar Rotalama (Longest Rerouting (EERL))" algoritmaları ile gösterilmiştir. Simülasyon testlerine ait yapılan analizler sonucunda CNS algoritmasının rotalama olmadan doğrudan iletim yapılan Doğrudan Yayılım (Direct Diffusion) yaklaşımından ağ ömrü ve güvenilirliği açısından %90 daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ağ ömrünün iyileştirilmesine yönelik teknikler, Gupta

ve Roy [15]'te dört ana başlık altında incelenmiştir. Bunlar, her bir algılayıcıya ait uyku veya aktif hâl atama, transfer mesafesini ayarlayarak her bir algılayıcının güç kontrolünü yapma, ağ üzerindeki gereksiz faaliyetleri bertaraf ederek etkili enerji kullanımını ve veri toplanmasını sağlama ile ağ ömrünü iyileştirmek amacıyla kümeleme, rotalama veya açık-kapalı zamanları çizelgeleme gibi teknikleri enerji etkin bir şekilde uygulama şeklinde özetlenebilir. Lee ve Moon [28]'de ise sınırlı enerji kaynağına sahip algılayıcılardan oluşan bir ağ sisteminde veri iletim işlemi sırasında toplam harcanan enerjiyi en aza indirebilecek etkili patikaların bulunmasını sağlayan bir rotalama protokolü geliştirilmiştir. Bu öneri en-kısa yol problemine (shortest-path problem) benzer bir mantık içermektedir. Ancak tek-periyot ve çok-periyot varsayımları ile birbirinden farklı durumların ele alındığı problemler için farklı iki karma tam sayılı matematiksel model geliştirilmiştir. İlk modelde algılayıcılar tarafından harcanan toplam enerjinin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Diğer modelde ise her periyot sonunda algılayıcılar tarafından harcanan toplam enerjinin en küçüklenmesi söz konusudur. 100 düğümlü ağ üzerinde tüm algılayıcıların kapsanmasını sağlayacak şekilde rastgele 6 farklı alt küme oluşturulmuş ve örnek üzerinde testler yapılmıştır. Tek periyotlu modelden farklı olarak çok periyotlu model için farklı periyot sayıları düşünülerek ağ ömrünün nasıl değiştiği incelenmiştir. Her iki model için de kabul edilebilir sürelerde sonuçlar alınmıştır. Ancak, ağ boyutu büyüdükçe çok periyotlu modelin tek periyotlu modele göre sonuç almada daha etkili olabildiği görülmüştür. Uygulanabilir oldukları alanlar için tek periyotlu olan modelin daha çok savaş bölgelerinde, ev güvenliğinin sağlanmasında, çok periyotlunun ise çok sayıda/sık tekrar veya güncelleme gerektiren durumlarda, endüstriyel gözlem ve kontrol, makine sağlamlığı için yapılan gözlemler, çevre ve yaşam alanı gözlemleri gibi süreklilik isteyen işlemlerde kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Modupe ve diğ. [32]'de ise geçici ağ yapısına sahip KAA'larda en iyi topoloji yönetimi yaklaşımlarından biri olarak belirtilen GAF (Geographic Adaptive Fidelity) şeması kullanılarak toplam harcanan enerji miktarının optimal olarak hesaplandığı enerji fonksiyonu modeli oluşturulmuştur. Çözüm yöntemi olarak Tavlama Benzetimi (SA) ve Genetik Algoritma (GA) şeklinde iki farklı metasezgisel önerilmiştir. Dikdörtgensel(Grid) geçici ağ yapısı kullanılarak metasezgisel yöntemler ile GAF şeması arasında harcanan toplam enerji

miktarını kıyaslamak ve metasezgisellerin işlevselliğini ölçmek amacıyla testler yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde iki metasezgiselin de geçici ağ yapısına sahip ve harcanan toplam enerjinin enküçüklenmeye çalışıldığı problemlerde optimale yakın sonuçları bulabildiği ve pratikte uygulanabilir yöntemler oldukları görülmüştür. Ağ üzerindeki algılayıcıların dengeli kullanımının ağ ömrünü iyileştireceğinin belirtildiği azımsanmayacak sayıda çalışma mevcuttur.

### **2.1.2 Baz İstasyonun Özelliklerine Göre Sınıflandırma**

*BS*'nin hareket kabiliyeti olduğu varsayımı altında ağ ömrünün iyileştirildiği çalışmalardan biri yapay zekâ ve uzaktan kontrol uygulamaları üzerine bir motivasyonun geliştirildiği Chatzigiannakis ve diğ. [10]'dur. Çalışmada *BS* için üç farklı veri toplama stratejileri ile eşleştirilmek üzere dört karakteristik hareket şekli belirlenmiştir. Hareket şekilleri olarak üç tanesi rastgele olacak şekilde basit rastgele yürüyüş, yanlı rastgele yürüyüş, kapsar alt çizgede yürüyüş ve düz çizgide veya daire üzerinde hareket dikkate alınırken veri toplama stratejileri olarak da pasif, çok adımlı ve sınırlandırılmış çok adımlı stratejiler belirlenmiştir. Her bir eşleştirmeye ait zamanın etkin kullanımı ve harcanan enerji miktarı arasındaki ödünleşimden, avantaj ve dezavantajlardan bahsedilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde her eşleştirme için *BS*'nin hareketli olmasının ağ ömrünü olumlu etkilediği ve ayrıca hareket alanı sınırlandırılmış olsa bile ağ ömrünü %50 oranında arttırdığı, harcanan enerji miktarını ise %30 oranında azalttığı görülmüştür. *BS*'nin hareketi sınırlandırılmadığı takdirde ise enerji kaybının %100'e yakın oranla azaltılabildiği görülmüştür. Hareketli *BS* kullanılarak ağ ömrünün iyileştirildiği bir diğer çalışma ise Marta ve Cardai [31]'de ele alınmıştır. Bu çalışmada *BS*'ye yakın konumda olan algılayıcıların sık kullanılmalarından dolayı enerjileri belirli seviyeye düştüğü anda *BS*'nin yer değiştirmesi sağlanarak bazı algılayıcıların enerjilerini erkenden tüketmeleri engellenmekte ve daha dengeli enerji kullanımı sağlanarak ağ ömrü iyileştirilmektedir. *BS* bir sonraki konumunu belirlerken en fazla enerjiye sahip bölgeyi tespit ederek o alana doğru yönelmektedir. Geliştirilen stratejinin performans ölçümü iki senaryo üzerinden yapılmıştır. Bunlardan ilki *BS*'nin altıgen alan üzerinde önceden belirlenmiş güzergâhları takip ettiği durumdur. Sonuçlar incelendiğinde mevcut ağ ömründen yaklaşık 5 kat daha iyi bir sonuca ulaşıldığı görülmüştür. Diğer



performans testinde ise *BS*'nin omurga-ağı üzerinde hareket yönünü belirlerken yerel algoritma kullandığı senaryo baz alınmıştır. Bu durumda da ağ üzerinde iletişimin sağlanması gereken bölgelerin kapsandığı ve verinin zamanında iletilmediği görülmüştür.

### 2.1.3 Verilen Karara Göre Sınıflandırma

Pek çok çalışmada her algılayıcının menzil seviyesine bağlı olarak sezibildiği belli bir kapsama alanının var olduğundan bahsedilmektedir. Bazı çalışmalarda sistemin belirli kapsama oranının altına düşmesi ağ ömrünü belirleyen bir koşuldur. Dolayısıyla ağ ömrü iyileştirilirken aynı zamanda ağ üzerindeki algılayıcıların sezibildikleri alanların kapsanması da sağlanmaktadır (Liu ve diğ. [29]). Örneğin, Castano ve diğ. [6, 7]'de kapsanmayan alan kalmayacak şekilde ağ ömrü iyileştirilmeye çalışılmıştır. Castano ve diğ. [6]'da tüm algılayıcıların kapsama alanı içinde olması koşulu sağlanarak ağ ömrünün en büyüklenmesi amaçlanmıştır. Harcanan enerji miktarı baz alınarak en uygun kapsama şekli bulunup operasyon süresi belirlenmiştir. Bu işlem yapılırken kurulan model fiyatlandırma alt problemi gibi düşünülerek en uzun sürede kapsanan alan tespit edilmekte ve ağ ömrü eniyilenmektedir. Sütun türetme yaklaşımı ile 500 algılayıcılı ağlara kadar problemin çözülebildiği görülmüştür. Castano ve diğ. [7]'de çözüm yöntemi olarak optimal ve sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Öncelikle optimal yaklaşım için esas ve ikincil olarak adlandırılan iki tip matematiksel model oluşturulmuştur. Birincil modelde amaç fonksiyonu ağ ömrünün en iyilenmesidir. İkincil modelde ise problem akış problemine (network flow problem) dönüştürülerek amaç fonksiyonunda algılayıcıların atandıkları bölgelerdeki kullanım maliyetlerinin toplamı enküçüklenmeye çalışılmıştır. Bunun için toplam bağlantı sayısı indirgenmiş maliyet olarak tanımlanmış ve her algılayıcı ağın alt gruplara ayrılmasıyla oluşturulan olurlu bölgelerden birine atanmıştır. İkincil modelde birden fazla *BS* düşünülerek de çözülebileceğinden bahsedilmiştir. Modelde hangi algılayıcının hangi olurlu alana atanması gerektiğinin kararı verilmektedir. Sezgisel yöntem için iki tip algoritma geliştirilmiştir. Birincisi, birden fazla *BS*'ye sahip problemler için yani ikincil model türündeki problemlerin çözümünde çokça önerilen GRASP (Greedy Randomized

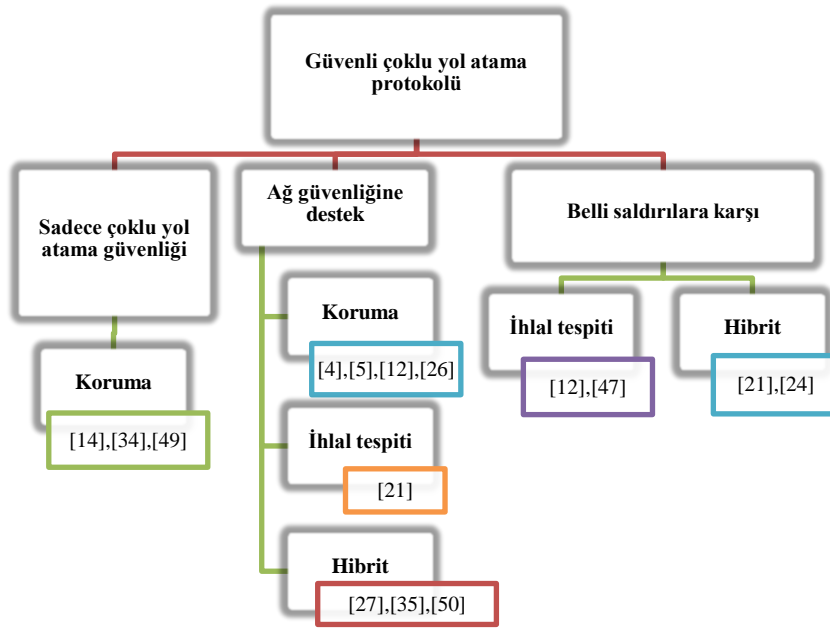
Adaptative Search Procedure) algoritmasıdır. Bu algoritmada indirgenmiş maliyetin artması için algılayıcının toplam kullanım maliyetinin enküçüklenmesi amaçlanmaktadır. Algoritmanın işleyişi daha iyi bir çözüm bulunamaması veya çözüm süresinde iyileştirmeye gidilememesi halinde sonlanmaktadır. Diğer ise kapsama alanının enbüyüklenmesine çalışıldığı GR\_DFS (Greedy Randomized Depth First Search) algoritmasıdır. Algoritma, aday kapsananlar listesini tutmakta ve bu liste dışında hiçbir algılayıcı kalmayana kadar işletilmektedir. Yapılan testler sonucu her iki algoritmanın da çoğunlukla çok kısa sürelerde optimal sonucu bulabildiği görülmüştür. Gözetilmesi gereken kritik bölgelerin kapsama alanını en üst düzeye çıkarmak için heterojen algılayıcıların yerleştirilmesi Ramadan ve diğ. [38]'de incelenmiştir. Tüm sistemin kapsama alanını maksimuma çıkaran bir nesnel fonksiyon ile bir tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda güvenilirlik, taşınabilirlik, nakil masrafı, ömür ve güç zamanlaması da dâhil olmak üzere, algılayıcıların birçok çalışma yeteneği göz önüne alınmaktadır. Algoritmanın performansını ölçmek için yapılan denemelerin sonucunda çok kısa sürede optimale yakın kapsama alanına ulaşmanın mümkün olduğu görülmüştür. Sha ve Shi [42]'de ise ağ üzerinde toplam kapsama alanının belirli bir oranın altına düşmesi sonucu ağ ömrünün tamamlandığı varsayılmıştır. Algılayıcıların konumlarının ve bağlantı kalitesinin bu durumu etkileyecek etmenler olduğundan bahsedilmiş ve çözüm önerisi olarak matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel modelde düşük bağlantı seviyesinde veya kapsama alanında olan algılayıcı sayısının en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen model kullanılarak, doğrudan ve dolaylı sorgu protokollerinin ağ ömrüne etkileri incelenmiş ve toplam harcanan enerji üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.

## **2.2 Ağ Güvenliği ile İlgili Yaklaşımlar**

### **2.2.1 Güvenlik ve Güvenilirlik Kavramları**

Konuya biraz daha açıklık getirilmesi amacıyla başlangıçta güvenlik ve güvenilirlik kavramlarının üzerinde durulmasında fayda olacaktır. Güvenlik, ağa dışarıdan gelebilecek müdahale, saldırı, ele geçirme gibi teşebbüslere karşı ağın korunaklılığını, güvenilirlik ise ağ içerisinde meydana gelebilecek arıza veya

aksaklıklara karşı ağın mukavemetini ifade eder. Her ikisi de ağ ömrünü ve ağın hizmet kalitesini doğrudan etkilediği için ağ tasarlanırken göz ardı edilmemesi gereken kavramlardır. Konu ile ilgili üzerinde sıkça durulan yaklaşımlardan biri olan çoklu yol atama kullanımı özellikle verinin kayıpsız şekilde BS'ye ulaştırılmasının amaçlandığı çalışmalarda önem kazanmaktadır. KAA için güvenli çoklu yol atama protokollerinin kullanıldığı durumlara dair sınıflandırma Şekil2.1'de gösterilmektedir(Stavrou ve Pitsillides [45]).



Şekil 2.1 : KAA'larda Güvenli Çoklu Yol Ataması.

Şekilde bahsedilen kavramlar detaylı incelendiğinde çoklu yol atama protokolünün güvenlik, ağ güvenliğini destekleme ve saldırılara karşı savunma amaçlı kullanıldığı görülmektedir. Koruma vazifesini gördüğü durumda sadece çoklu yol kullanılarak verinin güvenli şekilde iletimi sağlanmaktadır. Ağ güvenliğine yönelik destek için ise aynı verinin birden fazla yoldan iletilerek alternatif yol stratejisinin devreye girdiği ve buna bağlı olarak ağ güvenliği, iletişim kalitesi, veri bütünlüğü açısından koruma vazifesini görmektedir. Dışarıdan sisteme gelebilecek saldırıların tespitinde veya dışarıdan gelebilecek saldırı sonucu herhangi bir algılayıcının ele geçirilmesi ile tüm sistemi olumsuz etkileyebilecek durumun bertaraf edilmesine yönelik 'ihlal tespiti'

misyonuna sahiptir. Bununla beraber her iki vazifeyi de içinde barındırdığı ‘hibrit’ özelliğine sahip olmaktadır. Bu sınıflandırma ile aslında çoklu yol atama protokolünün hangi amaçla kullanılabilceği ve hangi güvenlik önlemlerine sahip olduğu sorularına cevap verilmektedir.

### **2.2.2. Yapılan Çalışmalar**

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere KAA’ların kullanım alanlarına göre taşıdıkları bilginin iletimi ve güvenliği de önem taşımakta ve buna bağlı olarak da saldırıya uğrama riski de ortaya çıkmaktadır. Algılayıcıların genelde fazla sayıda olmaları zamanla her birinin kontrol altına alınmasını zorlaştıran bir durumdur. Algılayıcıların düzenli olarak gözetiminin yapılamaması oluşabilecek saldırıların önüne zamanında geçilememesine ve dolayısıyla ağ güvenliğinin yanında ağ ömrünün de olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir (Challal ve diğ. [8], Younis ve diğ. [50]). Özellikle askeri uygulamalarda algılayıcıların açık araziye rastgele olarak saçılmaları düzenli bir gözetimi imkânsız hale getirmektedir. Bu nedenle de dışarıdan gelebilecek herhangi bir saldırıya açık olunan veya algılayıcıların biten enerjilerinin tekrar yerine konma şansının olmadığı durumlar ağ güvenliği için alınması gereken tedbirlerin arttırılmasını zorunlu kılmaktadır (Paradis ve Han [35]). Dolayısıyla bu durum ağ ömrünün tek başına iyileştirilmesinden ziyade alınacak güvenlik önlemleri ile hem ağ güvenliğinin hem de ağ ömrünün iyileştirilmesini sağlayan çalışmalara ağırlık verilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu minvalde Al-Karaki ve Kamal [4]’te ağ ömrünün iyileştirildiği enerji farkındalıklı rotalama mekanizmalarında enerji ile ilgili bazı metrikler ele alınarak verinin iletileceği yol güzergâhları tespit edilmekte ve böylelikle algılayıcıların saldırıya maruz kalmaları sonucu oluşacak tahribatın azaltılması sağlanmaktadır. Ancak yine de tüm ağ için güvenlik garantisinin sağlanamaması bu tarz yaklaşımların da yetersiz kaldığını göstermiştir.

Ağ güvenliğini arttırmaya yönelik birçok çalışmada çoklu yol atama stratejisi kullanıldığı görülmektedir. Günümüzde özellikle internet gibi geleneksel ağlarda çoklu yol atama stratejisi, verinin ağ üzerine dengeli dağılımını sağlamak ve ağı daha güvenli ve güvenilir hale getirebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu stratejide

algılayıcılar, kullandıkları veri aktarım yolları üzerinde meydana gelebilecek aksaklıklara karşı korunmak için birden fazla yol kullanmaktadırlar. Bu çalışmada olduğu gibi bazı uygulamalarda çoklu yollar üzerinden veri paketleri fragmanlara ayrılarak gönderilirken bazılarında ise algılayıcılar tarafından veri aktarımında kullanılan esas yolun bozulması halinde yedek yolların önceden tespit edildiği ya da esas yol ile eş zamanlı olarak kullanıldığı yaklaşımlar mevcuttur. Bu tip yaklaşımlarda ağ üzerindeki bağlantının mümkün olduğunca uzun süre korunması ve algılayıcılara ait enerjilerin dengeli olarak kullanılması önem taşıyan konular arasındadır. (Akkaya ve Younis [1] ). Çoklu yol atama tekniği sadece optimizasyon tabanlı çözümler için değil aynı zamanda sezgisel yaklaşımlar için de ilham kaynağı olmuştur. Detaylandırılırsa, algılayıcılara yapılabilecek saldırılar sonucu veri iletiminin kesintiye uğramaması için verinin gönderilebileceği en uygun yolun, enerji kısıtları göz önüne alınarak önceden belirlenmesi sağlanmaktadır. Özellikle KAA ve MANET (mobile ad-hoc network) için her bir algılayıcıya ait alternatif yolların bulunduğu çoklu yol atama yaklaşımı gelen saldırıları bertaraf edebilecek çözümler üretmektedir. Bu bölümde ağ güvenliğini iyileştirmek için önerilen çoklu yol atama protokollerinden bahsedilmektedir.

### **2.2.2.1 Alternatif yolların kullanıldığı yaklaşım**

Yukarıda bahsedildiği üzere alternatif yollar henüz saldırı gerçekleşmeden önceden sistemde belirlenebilmekteydi. Bu yaklaşıma sahip çalışmalardan biri ağ ömrünün yanında ağ güvenilirliğinin de ele alındığı nadir çalışmalardan biri olan Deng ve diğ. [12]'dir. Düşüm ihlali saldırılarının önlenmesi adına yapılan bir çalışmadır. Çözüm önerisi olarak sunulan INSENS (Intrusion-Tolerant Routing in WSNs) protokolü sadece ağda oluşan saldırı veya arızanın tespit edilmesi ile yetinmeyip önceden belirlenmiş alternatif yolları kullanarak arızalı düğümleri alternatif yollarla destekleyerek veri iletiminin güvenli bir yoldan transferinin gerçekleştirilmesinde rol oynamaktadır. Benzetim testlerinden alınan sonuçlarda, rastgele ve grid topoloji türleri için düşüm ihlaline sebebiyet veren saldırılarda, INSENS protokolünün etkili savunma mekanizmasına sahip olduğu görülmüştür. Bilindik yaklaşımların aksine eş zamanlı meydana gelebilecek bağlantı ve düşüm arızalarına yönelik saldırılara karşı güvenilirlik ve direnç sağlayan kısaca birkaç güvenlik önleminin bir arada bulunduğu

ARRIVE (Algorithm for Robust Routing in Volatile) Karlof ve diğ. [24]'te geliştirilmiştir. Algoritma, başlangıç seviyesinde *BS*'nin bulunduğu hiyerarşik düzendeki ağaç (tree-like) topolojisine sahiptir. ARRIVE, hem verinin parçalara ayrılarak çoklu yollar üzerinden iletimini hem de birden fazla kopya gönderimini sağlayan stratejiler içermektedir. Detaylandırılırsa, her bir algılayıcı doğrudan iletişime geçebileceği algılayıcılar için güvenilirlik tabanlı olasılıklar belirleyerek veri iletiminde hangi yolun daha güvenilir olabileceğinin kararını vermektedir. Verinin kopyalanarak farklı yollar üzerinden gönderilmesi her ne kadar veri kaybını azaltan ve ağ güvenliğini arttıran bir durum olsa da buna bağlı olarak enerjiden feragat edilmesini gerektiren bir yaklaşım olmaktadır. ARRIVE'ın birden fazla düğümün çökertilmesi gibi daha büyük çaplı saldırılara maruz kalan sistemlerde de işe yaradığı ancak buna bağlı olarak daha fazla enerji harcandığı görülmüştür. Kısaca bu çalışmada sunulan tekniğin ağ ömründen ziyade ağ güvenliğinin iyileştirilmesine katkıda bulunduğu söylenebilir. Lee ve Choi [25, 26]'de birbirleriyle alâkalı konuların işlendiği ancak kendi içinde bir önceki çalışmadan daha etkili ve detaylı bir bakış açısıyla ele alınan önerilerden bahsedilmiştir. Sırasıyla bahsedilirse güvenli alternatif bir yol üzerinden veri iletiminin sağlandığı yaklaşım Lee ve Choi [25]'te ele alınmıştır. Bu amaçla da çeşitli saldırılara maruz kalması sonucu devre dışı kalan algılayıcıların ağ yapısında meydana getireceği sorunlara karşı dayanıklılığını arttırmak adına alternatif yol şeması oluşturulmuştur. Her bir algılayıcının kimliğini belirleyen kendine özgü anahtar koda sahip olduğu, *BS*'nin algılayıcılara göre daha geniş kapasiteye(hafıza miktarı, enerji) sahip olduğu bu nedenle de kimlik tespiti, yerel rota bilgisi ve veri doğrulama gibi becerilerin sadece *BS*'de bulunduğu yapılan varsayımlardır. SeRINS (Secure alternate path Routing IN Sensor networks) yaklaşımı bu şema ile beraber çalışan bir rotalama protokolüdür. Genel mantığından bahsedilirse her algılayıcının dallanmış bir rota ağacına sahip olduğu bu hiyerarşik yapı içerisinde yer alan her bir ebeveynin(ağaçta daha üst seviyelerde bulunan algılayıcıların) alternatif yollar üzerinden verileri iletmeye sağlanarak herhangi bir saldırıda veri akışında oluşacak aksaklığın ortadan kalkması sağlanmaktadır. Benzetim testleri sonucu SeRINS'in ağ içerisinde işlem kabiliyetini yitirmiş düğümlerin varlığına ve ele geçirilmiş düğümlerin ağ düzeneğini yanlış yönlendirmek için hatalı rota bilgisi verme durumlarına karşı dayanıklı olduğu

görülmüştür. Bir önceki çalışmadan farklı olarak algılayıcıların hafızalarında fazla yer tutmayacak şekilde yayılım bilgilerinin(rota bilgileri) taşınabildiği bir şema [26]'da incelenmiştir. Şema oluşturulurken kullanılan ARMS (Authenticated Routing Message in Sensor Networks) protokolüyle bellekte fazla yer tutmayan, algılayıcılar arasında aynı zamanlı bir çalışmanın gerekmediği ve veri kaybından veya veri iletimindeki gecikmeden dolayı doğacak olumsuz etkinin ortadan kaldırıldığı bir sistem elde edilmiştir. Buradaki varsayımlardan biri de önceki çalışmada bahsedildiği gibi algılayıcıların birbirleriyle iletişim kurmalarını sağlayan özel anahtar koda sahip olduğudur. Alınan test sonuçları ile %50'ye yakın oranda veri kaybının önüne geçildiği ve en az zararla(göz ardı edilebilecek miktarda iletişim kayıplarıyla) sistemin tekrar güvenli ve stabilize hale getirildiği görülmüştür. Nasser ve Chen [34]'de ağ ömrünün iyileştirilmesi amaçlı kaynak-BS arasında kurulan bağlantıya farklı alternatif yolların sunulmasını sağlayan SEEM (Secure and Energy-Efficient Multipath Routing Protocol) algoritması sunulmuştur. Bu metotla gelebilecek düğüm veya bağlantı çökertme gibi saldırılara karşı önlem alınmakta dolayısıyla hem ağ ömrünün hem de ağ güvenliğinin dikkate alındığı bir yaklaşım sunulmaktadır. Tek kopyanın olduğu yaklaşımlara göre ekstra enerji kullanımı gerekmekte ancak saldırılara karşı daha dayanıklı ve buna bağlı olarak daha uzun soluklu kullanılabilir bir ağa sahip olunmaktadır. Algoritmanın mantığı gereği algılayıcılar sadece veri sezme, algılama ve iletim işlemlerinden sorumlu iken BS rota bulma, kalan enerjinin hesabı gibi veri iletimin sağlanması için gerekli olan diğer bütün işlemlerden sorumlu olmaktadır. Dolayısıyla verinin izleyeceği yol BS tarafından belirlenmekte ayrıca her veri aktarımında belirli bir enerji harcanacağı için algılayıcıların kalan enerji seviyeleri güncellenip en yüksek enerjiye sahip yollar belirlenerek veri aktarımı bu yollar üzerinden gerçekleştirilmektedir. Yapılan simülasyon testleri sonucu SEEM'in ağ ömrünü daha iyi duruma getirebildiği ve fazla verinin daha efektif kullanıldığı görülmüştür. Olabilecek saldırı veya arıza durumlarını ve bu tip sorunlara karşı dayanıklı, onlarla başa çıkabilecek teknikleri içeren ve minimum enerji harcanarak güvenli şekilde veri transferini gerçekleştiren protokollerden Paradis ve Han [35]'de detaylı olarak bahsedilmiştir. Saldırıları; Algılayıcıların dışarıdan sıkça gönderilen gerçek olmayan sinyaller sonucu enerjisinin boşa harcanarak bataryasının bitmesi, veri iletimi sırasında algılayıcılar

arasında bağlantının kopması, veri trafiğinin yoğun olması sonucu veri kayıplarının yaşanması şeklinde ele alınarak üç ana başlık altında toplanmıştır. Sonrasında bu saldırıları tespit edip tanımlayacak ve ağdaki güvenlik açığını kapatabilecek algoritmalarından bahsedilmiştir. Alınan bu önlemlerden detaylı bahsedilirse; ağ bağlantısının korunmaya devam etmesi ve kapsanmayan alanın kalmaması, ağ yapısının sürekli gözetim altında tutularak olası saldırılara karşı hemen karşılık verilmesi ve saldırı tipine göre(düğümüne yönelik veya bağlantıya yönelik çökertme gibi) alternatif yolların oluşturularak veri iletimi sırasında bu yollardan birinde oluşacak aksaklığa karşı yedek yolun kullanımının sağlanması şeklindedir.

Saldırının gerçekleşmesi ile eş zamanda alternatif yolların üretildiğine dair yapılan çalışmalardan bahsedilecek olursa Lee ve Choi [27]'de çoklu yol atama ile ilgili ele alınan son çalışmada ağ üzerinde algılayıcılarda tam hasara sebebiyet verecek saldırılara karşı tedbirlerin alınması ve veri-sızdırılan algılayıcıların belirlenmesi yönündeki durumlara eğilerek ağ güvenliğini arttırıcı yaklaşımlardan bahsedilmiştir. Önerilen yaklaşım NWS (Neighbor Watch System) protokolünün kullanıldığı ve saldırılara karşı daha dayanıklı hale getirilmiş veri iletim şemasıdır. Bu yaklaşım özellikle güvenli veri iletimi için tasarlanmış ve bununla ilgili problem yaşayan algılayıcılar için çözüm olarak sunulan bir metottur. [25] ve [26]'da ele alınan yaklaşımın aksine kullanılan şema temelde *BS*'ye veri iletiminin daha az enerji harcanarak tek yol üzerinden gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Ancak olası saldırı veya arıza sonucu işlevini yerine getiremeyen bir algılayıcı ile bu süreç içinde karşılaşılırsa sistem çoklu yol atama stratejisi ile alternatif yol bularak veri transferini gerçekleştirebilmektedir. Birden fazla algılayıcının aynı anda bu durumu yaşadığı varsayımı altında NWS tabanlı bu şemanın kendi tekniğini efektif bir şekilde kullanabildiği dolayısıyla yüksek oranda başarı sağlayabildiği görülmüştür. Younis ve diğ. [50]'de ise KAA'da algılayıcılarda meydana gelebilecek arızaları giderebilecek veya algılayıcıların ele geçirilmesi ile sistemde meydana gelebilecek tahribatın bertaraf edilmesini sağlayacak düğüm keşfetme, uyku döngü yönetimi, kümeleme, güç kontrolü ve hareket kontrolü olarak adlandırılan topoloji yönetimi tekniklerinden bahsedilmiştir. Var olan teknikler ise belirli varsayımlara, parametrelere, ağ yapısına ve amaç fonksiyonuna sahip olan sistemlerin



uğrayabileceği, muhtemel saldırılar karşısında izlenecek güvenlik önlemine göre sınıflandırılmıştır. Buna göre hata veya arızalara dayanıklı olan mevcut teknikler reaktif, arıza olduğu sırada sistemi düzeltmeye çalışan ve olası arıza durumu olmadan önlem alan yaklaşımlar ise proaktif olmak üzere iki geniş başlık altında gruplandırılmıştır. Ayrıca her bir başlık altında bahsedilen çeşitli algoritmalar güçlü ve zayıf taraflarıyla incelenmiştir. Önerilen yöntemler, mevcut tekniklerle analiz edilip aralarında karşılaştırma yapılmıştır. Ağ ömrü ile zamanında ve güvenli veri iletimi arasında ödünleşimin dikkate alındığı ilk yaklaşım ise Bouabdallah ve Bouabdallah [5]'te ele alınmıştır. Toplam harcanan enerjinin en küçüklendiği ve verilerin belirlenen gecikme zamanını aşmadan güvenli şekilde iletimini gerçekleştirebilecek optimum sayıdaki algılayıcının belirlenmesi amaçlanmıştır. Düğüm sayısının ağ ömrünü ve gecikme zamanını hangi yönde etkilediğinin tespit edilmesi amacıyla testler yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde algılayıcı sayısında azalmaya gidildikçe ağ ömründe iyileşme meydana geldiği ancak bu durumun gecikme zamanı için aynı etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Bu dengeyi sağlamak amacıyla bazı analitik metotlar geliştirilmiştir. Benzetim testleri sonucu önerilen yaklaşımların ağ performansını (ağ ömrü, gecikme zamanı ve güvenlik) olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

#### **2.2.2.2 Verinin fragmanlara ayrılarak iletiildiği yaklaşım**

Güvenlikle ilgili yapılan çalışmalardan farklı olarak Djukic ve Valee [14]'te ağ üzerinde algılayıcıların verilerini *BS*'ye iletmeleri için 'aracı' olarak adlandırılan düğümler oluşturulmuştur. Bu düğümlerin *BS* ile doğrudan bağlantı kurdukları varsayımı yapılmıştır. Sunulan çözüm önerilerinden birincisi, ağ ömrünün iyileştirilmesi amacıyla toplam harcanan enerjinin en küçüklenmesini sağlayan doğrusal programlama modelidir. Diğeri ise orijinal verinin birden fazla parçaya ayrılması ve bu parçaların düğüm ayırık yollar üzerinden aracı düğümlere transferini sağlayan FEC (Forward Error Connection) tekniğidir. Sonuç olarak bütün veri varacağı nihai nokta olan *BS*'ye aracı düğümler tarafından iletilmiş olmaktadır. Arıza veya aksaklıklardan dolayı iletilmeyen(kaybolan) veriler olursa *BS* tarafından üretilerek verinin tamamının elde edilmesi sağlanmaktadır. FEC tekniği bu özelliği ile veri kaybı riskinin büyük olduğu daha karmaşık ağlar için bile verinin kayıpsız

şekilde iletimini garantilemekte ve bu işlemi çoklu yol atama stratejisine göre daha az enerji harcayarak gerçekleştirebilmektedir. Aksi durumda aracı algılayıcılardan birine herhangi bir saldırı olması sonucu o verinin herhangi bir yedek kopyası oluşturulmadığından tamamının iletilmemesi riskiyle karşılaşılabilecek dolayısıyla da güvenlik zaafiyeti ortaya çıkacaktır. Ağın olası saldırılar veya ağda meydana gelebilecek aksaklıklar sonucunda oluşabilecek sorunlara karşı dirençli olmasının enerji verimliliği, gizlilik ve doğruluk gibi sistemin düzgün olarak çalışmasını destekleyen konular kadar önemli olduğu fikri birçok çalışmada vurgulanmıştır. Ağın dirençli olması ağın daha uzun soluklu olmasını ve dolayısıyla da kritik alanlarda işlevselliğinin artırılmasını sağlamaktadır. Quadjaout ve diğ. [47]'de, SEIF (secure and efficient intrusion fault) olarak adlandırılan düğüm-ihlal hatalarına karşı dirençli rotalama şeması önerilerek yüksek güvenli ve çoklu yol atama protokolü geliştirilmiştir. Bu protokol, verinin bölünerek düğüm ayrık yollardan iletilmesini temel alan bir şemadan oluşmaktadır. Benzetim testleri sonucunda kullanılan metot ile bilindik çoklu yol atama stratejilerinden daha güvenilir ve *BS* etrafındaki yoğunlaşan veri trafiğinden dolayı oluşacak saldırılara karşı daha dayanıklı, ağ ömrü daha uzun bir sistem elde edilebildiği görülmüştür. İncebacak ve diğ. [21]'de ele alınan çalışmada literatürde sıkça bahsedilen saldırı tiplerinden düğüm çökertme ve dışarıdan dinlemelere karşı dayanıklı bir ağ tasarlanması amacıyla bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Yapılan saldırının verinin tamamını veya büyük bölümünü ele geçirmek amacı taşıdığı varsayımı yapılmış ve buna karşılık güvenlik esaslı yaklaşımlardan biri olarak verinin parçalara ayrılarak birden fazla yol üzerinden gönderilmesi önerilmiştir. Güvenliğin yanı sıra ağ ömrünün de iyileştirilmesi amacıyla verinin iletiildiği yollar arasında en fazla enerji harcanan yolun enerjisinin en küçüklenmesi hedeflenmektedir. Saldırı tipine göre sistemin ağ güvenliğini iyileştirebilecek belirli kısıtlar eklenmiştir. Detaylandırılırsa, sistem dışarıdan dinleme gibi pasif saldırılara maruz kaldığında algılayıcılar arasında kurulan doğrudan bağlantı sayısı sınırlandırılmakta, düğüm ele geçirme şeklindeki aktif saldırılarda ise her bir algılayıcının verisini gönderirken kullandığı algılayıcı sayısına sınır getirilmektedir. Kısacası önerilen model hem enerji tüketimini hem de rota farklılığını gözeterek ağ ömrü-ağ güvenliği ödünleşiminin sağlanmaya çalışıldığı bir yaklaşıma sahiptir. Yapılan analizlerde, *1-D*(doğru) ve *2-D*(kare) topolojileri

kullanılmıştır. *1-D* topolojisi için düz çizgi üzerinde 10 m aralıklarla yerleştirilmiş algılayıcıların ve son sırada *BS*'nin bulunduğu bir ağ yapısı üzerinde yukarıda bahsedilen saldırıların ayrı ayrı gerçekleştiği ve ikisinin birden gerçekleştiği üç farklı durum için modelin gösterdiği performans incelenmiştir. Sonuç olarak daha fazla sayıda algılayıcının bulunduğu yani daha büyük ağ yapıları için ağda kalan fazla enerji miktarının azaldığı görülmüştür. *2-D* topolojisinde ise köşegen yapıya sahip alana rastgele saçılmış algılayıcılardan ve alanın tam merkezine konuşlandırılmış *BS*'den oluşan ağ yapısı üzerinde çalışılmıştır. Yapılan testler sonucunda da aynı saldırı senaryoları için algılayıcı ve bağlantı sayısının artmasıyla algılayıcı enerjilerinin daha dengeli kullanıldığı görülmüştür.

Yılmaz ve diğ. [49]'da, literatürde en kısa adım veya yol belirleme ile ilgili birçok algoritmik yaklaşımın olduğu ancak en kısa çoklu yol atama ile ilgili çalışmaların yeterli sayıda olmadığı belirtilmiştir. Dolayısıyla bu boşluğu doldurabilmek ve katkı sağlayabilmek amacıyla çoklu yol atama algoritması farklı bir bakış açısıyla ele alınarak yeni bir teknik meydana getirilmiştir. Bu yaklaşım verinin iletilirken izlediği yolun en enerji verimli yol olmasını sağlayan en kısa adımlı çoklu yol atama algoritması (Shortest Hop Multipath (SHM)) olarak geliştirilmiştir. Sistemde beş farklı tip mesaj üretilmektedir. Algılayıcılar arasında veri alışverişi, hiyerarşik bir düzende ve farklı tipteki mesajların algılayıcılar arasında karşılık görüp görmemesine bağlı olarak yapılmaktadır. Veri hedef noktasına ulaşana kadar algılayıcıların arasında kurulan bağlantılar mesafeye bağlı olarak güncellenmeye devam etmektedir. Bu yollar etiketlenerek potansiyel en kısa adımlı çoklu yollar belirlenmiş olmaktadır. Algoritmada belirlenen en kısa adımlı yollar, yük dengelenmesi veya sistemin dışarıdan gelebilecek saldırılara karşı güçlü olması için kullanılmaktadır. Ayrıca SHM ile hem mevcut önerilen birçok en kısa yol algoritmasından farklı olarak verinin varış noktasına ulaştığının tespiti yapılabilen hem de mesaj taşıma kapasitesi artırılabilir. SHF, CRDST (Chang-Roberts distributed spanning tree) ve DBF (Distributed Bellman-Ford) algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim testleri sonucu temel ağ düzeneği için SHM ve DBF algoritmalarının CRDST algoritmasına göre daha fazla enerji harcadığı ve çözüm süresinin daha uzun olduğu görülmüştür. Çoklu yollar oluşturulurken bu durumun tam tersi olduğu yani

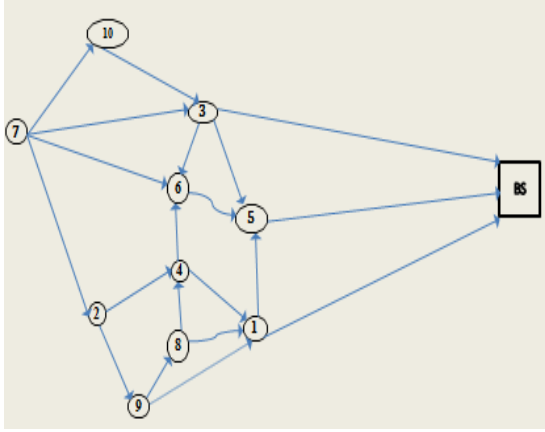
SHM ile CRDST'ye göre daha az enerji ve zaman harcadığı ve buna bağlı olarak da gecikmelerin daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca SHM ve DBF ile yapılan karşılaştırmada DBF algoritmasında mesaj büyüklüğü daha fazla olduğu için SHM algoritmasının daha az enerji harcayarak daha kısa sürede çözüme ulaşabildiği görülmüştür.

### 3. PROBLEM TANIMI VE ENİYİLEME MODELLERİ

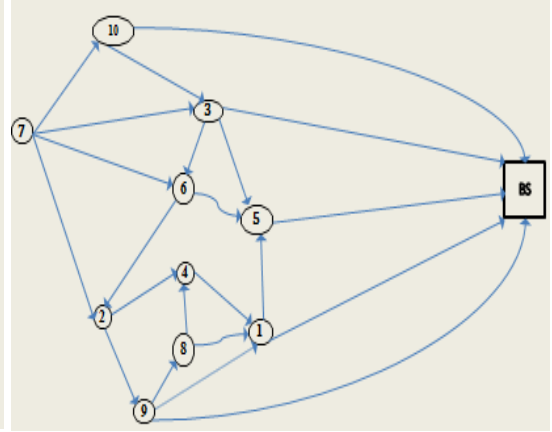
KAA'lar ile ilgili çalışmalar incelendiğinde güvenlik protokolleri hakkında detaylı açıklamaların yer aldığı teorik çalışmalara rastlanmaktadır. Bunun dışında ağ güvenilirliği ve ağ ömrü ile ilgili konuların ayrı ayrı ele alındığı çok sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Ancak hem ağ ömrünün iyileştirildiği hem de güvenilirliğin sağlanabildiği çalışmalara nadir olarak rastlanılmaktadır. Özellikle matematiksel modelleme ve kesin çözüm yöntemleri sık kullanılan bir yaklaşım değildir. Bu tez kapsamında ise ağın ömrü en büyüklenmekle beraber ağ güvenilirliğinin de önerilen kısmi fazlalığa dayalı çoklu yol atama protokolüyle iyileştirildiği bir karma tam sayılı programlama modeli geliştirilmektedir. Dolayısıyla enerji-güvenilirlik ödünleşiminin dikkate alındığı bütünlük bir yaklaşım sunulmaktadır.

Bu bölümde önerilen stratejiyi daha iyi anlatmak ve dikkate alınan özelliklerin model ve performans anlamında marjinal etkilerini inceleyebilmek adına alt modellerden nihai modele geçiş adım adım bahsedilmektedir. Alt modeller daha önce Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da geliştirilmiştir. Bu çalışmanın orijinal katkısı Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da önerilen stratejinin kopyalamanın yapıldığı yer açısından farklılaştırılması ile elde edilen strateji ve ilgili matematiksel modeldir. Bütün modellere dair karşılaştırmalar Bölüm 4'te sunulan detaylı testlerle yapılacaktır. Temel yaklaşım, ağ ömrünün en büyüklendiği ve ağ güvenliğinin göz ardı edildiği Tek Kopya (TK) stratejisidir. TK'da her bir algılayıcının sahip olduğu verisi çoklu yollar üzerinden fakat tek kopya halinde gönderilmektedir. Dolayısıyla rotalar sadece enerji verimliliği dikkate alınarak belirlenmekte; ağ ya da veri güvenilirliğini iyileştirmek için özel bir çaba içine girilmemektedir. Bununla beraber ağdaki bazı algılayıcıların veri iletiminde sıklıkla veya yoğunlukla kullanılmaları nedeniyle bozulma veya dışarıdan gelebilecek saldırılara maruz kalma ihtimalleri diğerlerine göre daha yüksektir. TK stratejisinden algılayıcıların dengeli kullanımı kuralı eklenerek elde edilen Dengeli Tek Kopya (DTK) stratejisinde ise iletişim yükü algılayıcılar arasında dengeli bir şekilde dağıtılarak yoğun kullanımları nedeniyle kritik öneme sahip algılayıcılarda meydana gelebilecek aksaklıkların olumsuz etkileri mümkün olduğunca azaltılmaya çalışılmaktadır. Üçüncü strateji ise DTK'ya ek

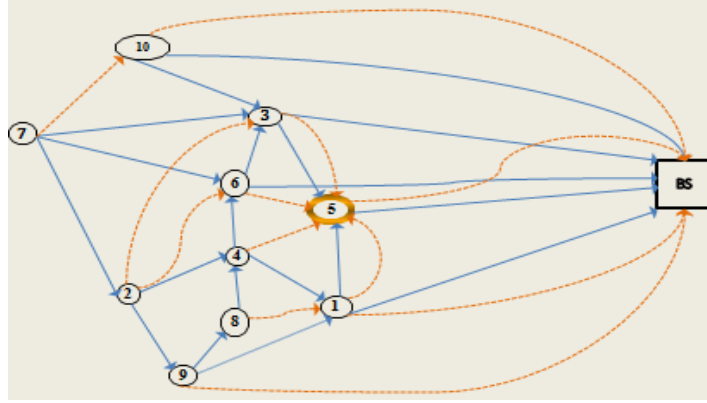
olarak çoklu kopyalamanın yapıldığı Dengeli Çift Kopya (DÇK) metodudur. Buna göre her algılayıcı kendi sezdiği verisinin iki kopyasını oluşturarak düğüm ayrık yollar üzerinden *BS*'ye göndermelidir. DÇK, ağdaki bütün algılayıcıların eşit seviyede korunmasına çalışılan oldukça tedbirli bir yaklaşımdır. Her ne kadar amaç ağ ömrünü en iyilemek olsa da ağ güvenliğinde alınmak istenen önlemler fazladan enerji harcanmasına yol açmakta ve dolayısıyla diğer stratejilere göre ağ ömrünün daha kısa olmasına sebebiyet vermektedir. Bu çalışmanın asıl katkısı olan kısmi kopyalamalı stratejide ise enerji-güvenilirlik ödünleşimi dikkate alınmakta yani hem enerji verimliliği hem de ağ güvenliliği sağlanmaya çalışılmaktadır. Temel motivasyonu bütün verinin değil daha yoğun kullanılan algılayıcı ile iletişim halinde olan algılayıcıların verilerinin korunmasıdır. Böylece de DÇK'dakine benzer seviyede ağ güvenliliği olan ve DTK'dakine benzer uzunlukta bir ağ ömrünün sağlanmasına çalışılmaktadır. Tezin bu bölümünde yukarıda bahsedilen stratejiler ve geliştirilen matematiksel modeller hakkında detaylı incelemeler yapılacak, ağ ömrü iyileştirme ve güvenliliğe dayalı olan protokolden de ayrıntılı olarak bahsedilecektir. Bahsedilen stratejilerin daha kolay anlaşılması amacıyla aynı örnek üzerinden 11 düğümlü ağ için elde edilen sonuçlar Şekil3.1'de gösterilmiştir.



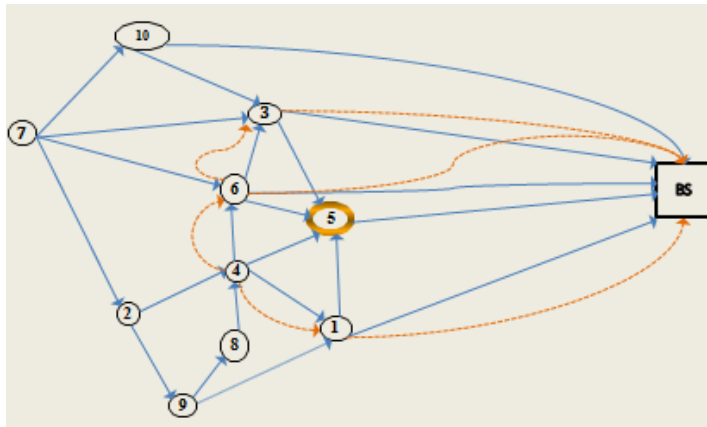
(a): TK modelinin gösterimi



(b): DTK modelinin gösterimi



(c): DÇK modelinin gösterimi



(d): DKK<sup>komşu</sup> modelinin gösterimi

Şekil 3.1 : Modellere ait çözümler

Tüm modeller için aynı örnek baz alınarak elde edilen sonuçlar Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Mavi renkli oklarla gösterilen birincil veriyi ifade ederken, turuncu renkteki kesikli çizgi ile gösterilenler ise kopyalanan veriyi yani ikincil akışı ifade etmektedir. Sırasıyla incelendiğinde herhangi bir güvenlik stratejisinin uygulanmadığı sadece birincil verinin yer aldığı TK modeli yer almaktadır. Burada 5 numaralı algılayıcı üzerinden geçen veri akışının diğer algılayıcılara göre daha yoğun olduğu, DTK modelinde ise dengeli kullanım kısıtı modele dâhil edildiğinden 9 ve 10 numaralı algılayıcıların farklı yollar kullanmaları sağlanmıştır. DÇK modeli için ise her kaynağın ürettiği veriyi düğüm ayrık yollar üzerinden ilemesi sağlanmış ve yine 5. algılayıcının yoğun kullanıldığı görülmüştür. Son olarak DKK<sup>komşu</sup> modelinde diğer algılayıcılar tarafından sıklıkla kullanıldığı için MD olarak seçilen 5 numaralı algılayıcıya veri iletimini direk olarak gerçekleştiren algılayıcıların düğüm ayrık yol kullanarak ikincil veriyi iletebildiği görülmüştür. Özetle DÇK modelinin ağ güvenilirliği açısından en tedbirli ancak harcadığı enerji açısından da en yüksek değere sahip olduğu söylenebilir.

### 3.1 Varsayımlar ve Parametreler

Bu çalışmada incelenen ağ  $G=(N,A)$  olarak gösterilen yönlü çizgedir.  $BS$  ve algılayıcıları içeren küme  $N$ , algılayıcı kümesi  $N_0=N-\{BS\}$  ve her bir algılayıcının kendi kapsama alanı içerisindeki algılayıcılar ile aralarındaki yönlü ayrıtların kümesi ise  $A'$ ’dir. Ağda bir tane sabit konumlu  $BS$  ile çok sayıda algılayıcı düğüm yer almaktadır.  $BS$  hariç her  $i$  algılayıcısının  $E_i$  ile gösterilen kısıtlı miktarda başlangıç enerjisine sahip olduğu varsayılmaktadır. Algılayıcılar sahip oldukları enerjiyi kendi etraflarını sezme, ellerindeki veriyi diğer algılayıcılara iletmek ve diğer algılayıcılardan kendilerine gönderilen veriyi almak için kullanırlar. Bu çalışmada bir  $i$  algılayıcısının bir birim veriyi  $j$  algılayıcısına iletmek için harcaması gereken enerji  $PTX_{ij}$  ve diğer algılayıcılardan kendisine gönderilen bir birim veriyi almak için harcadığı enerji  $PRX$  ile gösterilmektedir. Burada  $PTX_{ij} = \rho + \epsilon d_{ij}^\beta$  ilişkisi kullanılmaktadır ve  $\rho$  elektronik devrelerde harcanan enerji miktarı,  $\epsilon$  verici verimlilik katsayısı,  $\beta$  güç yitim katsayısı ve  $d_{ij}$  de  $i$  ve  $j$  algılayıcıları arasındaki



Öklid mesafesidir ([11]). Ayrıca her  $i$  algılayıcısının birim zamanda ürettiği veri miktarı  $S_i$  ile gösterilmektedir. Geliştirilen bütün stratejilerde ve ilgili matematiksel modellerinde ağın ömrünün ( $t$ ) sistemden ilk ayrılan yani enerjisi ilk olarak tükenen algılayıcının aktif yaşam süresine eşit olduğu varsayılmaktadır. Yukarıda da belirtildiği üzere TK, DTK ve DÇK stratejileri ve matematiksel modelleri daha önce Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da gösterilmiştir. Bu modeller mevcut tezde önerilen stratejinin ve ilgili matematiksel modelinin daha rahat anlaşılabilmesi açısından bu bölümde tekrar anlatılmaktadır.

### 3.2 Tek Kopya (TK) Stratejisi

Temel durum olarak ele alınan TK stratejisinde amaç, sensör enerjilerinin en verimli şekilde kullanılması sayesinde ağ ömrünün en büyüklenmesidir. Algılayıcılar tek kopya oluşturmakta ve ilgili veri akışı için enerji verimli yolların belirlenmesi gerekmektedir. Bu strateji ayrıt için değil düğümlere yönelik kapasite kısıtlarının olduğu bir maksimum çok ürünlü akış problemi(maximum multi commodity flow problem) gibi düşünülerek aşağıda gösterilen doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir:

$$maks \ t \quad (3.1)$$

öyle ki:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = \begin{cases} S_i t & \text{eğer } i = k \text{ ise} \\ -S_i t & \text{eğer } i = BS \text{ ise} \\ 0 & \text{diğer } i \text{ için} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N_0 \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji}^k x_{ji}^k + \sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij}^k x_{ij}^k \leq E_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.3)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N_0 \quad (3.4)$$

Burada  $x_{ij}^k$  akış değişkeni  $k$  kaynaklı algılayıcının verisinin ne kadarının  $(i,j)$  ayrıtı üzerinden gönderileceğini göstermektedir. Bütün stratejilerimizde çoklu yol

kullanımına (multipath routing) izin verildiği için akış değişkenleri sürekli değerler alabilmektedir. Sırasıyla (3.1)'de  $t$  ile ifade edilen ağ ömrünün eniyilenmeye çalışıldığı amaç fonksiyonu yer almaktadır. Kısıtlar bölümünde (3.2) akış denge kısıtlarıdır ve her algılayıcının sezdiği bütün veriyi arada herhangi bir kayıp olmadan  $BS$ 'ye iletmesi garantilenmektedir. Enerji kısıtı olarak tanımlanan (3.3)'te ise bir algılayıcının veri algılama, üretme ve iletme sırasında harcadığı toplam enerjinin o algılayıcının sahip olduğu başlangıç enerji miktarını geçmemesi sağlanmaktadır. Son olarak (3.4), akış değişkenleri için işaret kısıtlarıdır.

### 3.3 Dengeli Tek Kopya (DTK) Stratejisi

Tek Kopyalı modelde özellikle  $BS$ 'ye yakın bazı algılayıcılar diğerleri tarafından çok sık kullanılabilen veya üzerlerinden geçen veri miktarı diğer algılayıcılara oranla daha fazla olabilmektedir. Dolayısıyla bu tip algılayıcılar veri akışında merkezi bir rol oynamaktadır. Kimi algılayıcıların daha yoğun kullanılmaları güvenilirlik açısından bazı olumsuzluklara sebebiyet verebilmektedir. Şöyle ki ağdaki bilginin önemli bölümünün birkaç algılayıcıda kümelenmesi bu algılayıcıları dışarıdan gelebilecek saldırılara karşı daha çekici kılmaktadır. Örneğin, sınır takibi gibi sürekli bilgi akışının kritik olduğu bir uygulamada dış güçlerin ağ bağlantısını önemli oranda tahrip edebilmeleri için sadece az sayıdaki algılayıcıyı etkisiz hale getirmeleri yeterli olacaktır. Ayrıca bu tarz algılayıcıların yoğun olarak kullanılmaları nedeniyle teknik aksaklıklar yaşama ihtimalleri de yüksektir. Dolayısıyla özellikle planlı saldırılara ve ihtimali yüksek aksaklıklara karşı ağın güvenilirliğini arttırmak için alınabilecek önlemlerden birisi de algılayıcıların veri iletiminde benzer oranlarda yani dengeli bir şekilde kullanılmalarını sağlamaktır. Sonuç olarak Dengeli Tek Kopya (DTK) stratejisi için önerilen model (3.1)-(3.4)'e ek olarak algılayıcıların dengeli şekilde kullanımını sağlayan

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq \alpha S_{jt} \quad \forall j \in N_0 \quad (3.5)$$

kısıtı eklenerek oluşturulmaktadır. Bu kısıt ile  $BS$  dışındaki her bir  $j$  algılayıcısının kendi verisi dışında üzerinden geçebilecek toplam veri miktarının kendi ürettiği

toplam verinin en fazla  $\alpha$  katı olmasına izin verilerek algılayıcıların kullanım oranları arasında aşırı farklılıkların olması engellenmektedir. Bu sayede tek bir algılayıcının uğradığı saldırı ağ güvenilirliğini TK'daki kadar fazla etkilemeyebilecektir. Ancak dışarıdan gelebilecek müdahale sonucu bir miktar verinin BS'ye iletilmemesi ihtimali DTK'da halâ mevcuttur.

### 3.4 Dengeli Çift Kopya (DÇK) Stratejisi

Temel durum olan TK'ya göre DTK'da bir algılayıcının ağın sürekliliği üzerindeki etkisinin azaltılması ile ağ güvenilirliği konusunda bir miktar iyileştirme yapılabilmektedir. Ancak bu durumda bile herhangi bir saldırı veya aksaklık halinde verinin tamamı BS'ye ulaştırılamayacaktır. Bu durumun üstesinden gelmek için fazladan veri üretimi ve iletimini gerektirecek Dengeli Çift Kopya (DÇK) stratejisi önerilebilir. DÇK'da her algılayıcının sezdiği verinin birincil ve ikincil olmak üzere iki kopyasını oluşturarak düğüm ayrık yollar üzerinden BS'ye iletmeye çalışılmaktadır. Dolayısıyla tek bir algılayıcıyı hedefleyen herhangi bir saldırı veya aksaklık durumunda bütün algılayıcıların BS ile bağlantısı devam edecek ve çoklu aksaklıklar durumunda ise kaybedilebilecek veri miktarı diğer stratejilere oranla önemli derecede azaltılabilecektir. DÇK için kullanılacak matematiksel model aşağıdaki gibidir:

*maks t*

öyle ki:

(3.2), (3.4), (3.5)

$$\sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} y_{ji}^k = \begin{cases} S_i t & \text{eğer } i = k \text{ ise} \\ -S_i t & \text{eğer } i = BS \text{ ise} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N_0 \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} (x_{ij}^k + y_{ij}^k) + \sum_{k \in N_0} \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} (x_{ji}^k + y_{ji}^k) \leq E_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.7)$$

$$x_{ji}^k \leq Ma_i^k \quad \forall (j,i) \in A, k \in N_0 \quad (3.8)$$

$$y_{ji}^k \leq M(1 - a_i^k) \quad \forall (j,i) \in A, k \in N_0 \quad (3.9)$$

$$y_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N_0 \quad (3.10)$$

$$a_i^k \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N_0 \quad (3.11)$$

Burada  $y_{ij}^k$  değişkeni  $k$  algılayıcısının kopyalanan verisi için tanımlanmış olan ikincil akış değişkeni ve  $a_i^k$  ise  $k$  kaynaklı verinin birincil akışının  $i$  algılayıcısı üzerinden iletilip iletilmediğini gösteren ikili değişkendir. (3.6) kopyalanan veri için akış korunum kısıtıdır ve birincil akış için (3.2) ile olduğu gibi (3.6) ile de kopyalanan verinin eksiksiz olarak  $BS$ 'ye ulaştırılması garanti edilir. Ayrıca enerji kısıtı (3.3) birincil ve ikincil verinin iletimi dikkate alınarak (3.7)'deki gibi değiştirilmiştir. Burada yapılan varsayım algılayıcıların kendi sezdikleri veriyi kopyalamak için harcayacakları enerjinin ihmal edilebilecek seviyede olduğudur. (3.8) ve (3.9) ile birincil ve ikincil akışın düğüm ayrık yollardan iletilmesi sağlanmaktadır. DÇK için tanımlanan yeni karar değişkenlerine ait işaret kısıtları da (3.10) ve (3.11)'dir. Oluşturulan bu modelde ağ ömrünü eniyileyecek şekilde birincil ve ikincil verilerin hangi yollardan gönderilmesi gerektiği belirlenmektedir.

DÇK her ne kadar ağ güvenilirliği açısından faydalı olsa da fazla temkinli bir strateji olması nedeniyle yoğun olarak fazladan veri iletilmesi ve dolayısıyla (3.7)'de belirtildiği gibi fazladan enerji tüketimi söz konusudur. Bu da asıl performans kriteri olan ağ ömrünün olumsuz yönde etkilenmesi demektir. Dolayısıyla bu çalışmanın asıl katkısı olan ve bütün algılayıcıların değil sadece veri iletim yolları diğerlerine göre daha fazla risk altında olan algılayıcıların kopyalama yapmasını öngören Dengeli Komşuda Kopyalama stratejisi bir sonraki bölümde daha detaylı olarak incelenecektir.

### 3.5. Dengeli Kısmi Fazlalığa Dayalı Komşuda Kopyalama (DKK<sup>komşu</sup>) Stratejisi

Ağ güvenilirliğinin sadece çoklu yollar kullanılması nedeniyle kısmen dikkate alındığı TK ve dengeli algılayıcı kullanımı ile güvenilirlikte biraz daha iyileştirme yapılan DÇK yöntemlerinde öncelikli amaç ağ ömrünün iyileştirilmesidir. TK'da

algılayıcıların ağır kolaboratif yaşam süresini en iyilemek kaydıyla en enerji verimli yolları kullanmalarına izin verilirken DTK’da algılayıcıların dengeli kullanımı amacıyla bir kısıtlama getirilmiştir. Dolayısıyla bu stratejiler sadece ağ ömrü düşünüldüğünde DÇK’ya göre daha avantajlıdır. Diğer yandan DÇK stratejisinde her algılayıcı daha fazla enerji harcamayı göze alarak verisini kopyalayıp dengeli bir şekilde gönderdiği için ağ güvenilirliği tek kopyalı yöntemlere kıyasla daha iyi duruma getirilmiştir. Ancak sahip olunan sınırlı enerjinin bu şekilde harcanması ağ ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla ağ ömrü ve ağ güvenilirliği arasındaki ödünleşimi daha etkin bir şekilde ele alan bir stratejinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Kısmi kopyalama ile bu ödünleşimin ele alınması ilk olarak Şendil ve Altın-Kayhan [46]’da incelenmiş ve gayet olumlu sonuçlara ulaşılmıştır.

Ağ üzerindeki bütün verinin değil bir koşula göre belirlenmiş kısmının kopyalanmasını içeren Dengeli Komşuda Kopyalama (DKK<sup>komşu</sup>) yönteminde, KAA veri trafiğinde diğer algılayıcılar tarafından sıklıkla veya yoğun miktarda kullanılan algılayıcılar “merkezi” olarak adlandırılmaktadır. Merkezî algılayıcılar diğer çoğu algılayıcının *BS* ile bağlantı yolu üzerinde yer almaktadırlar. TK stratejisinde KAA’daki algılayıcıların kullanım sıklık ve miktarları ile ilgili bir kısıtlama getirilmezken DTK’da kullanım miktarları sınırlandırılmaktadır. Bu da bazı algılayıcıların verilerinin bir kısmını veya tamamını en enerji verimli yollar yerine enerji açısından daha maliyetli yollar üzerinden göndermelerine neden olmaktadır. Örneğin, ağdaki algılayıcıların çok büyük bir çoğunluğunun *BS*’den uzakta ve çok azının da *BS*’ye yakın konumlandığı bir durumda bu tarz kısıtlamalar ağın ömrünü önemli derecede kısaltabilir. Önerilen DKK<sup>komşu</sup> stratejisinde ise eğer ağ ömrü açısından faydalı olacaksa ağdaki en fazla bir algılayıcı için bu sınırlandırmanın kaldırılmasına izin verilmektedir. Fakat yoğun kullanılacak olması sebebiyle bu algılayıcıda bazı aksaklıkların yaşanması ihtimali daha yüksek olacağından veri akışı serbest bırakılan algılayıcının ilettiği verinin kopyalanarak düğüm ayrık yollar üzerinden *BS*’ye iletilmesi gerekmektedir. Daha önce benzer bir strateji önerilen Şendil ve Altın-Kayhan [46]’dan farklı olarak bu çalışmada kopyalama verinin kaynağında değil merkezi düğüme doğrudan veri ileten algılayıcı veya algılayıcılarda yapılmaktadır. Burada bir algılayıcının merkezi olarak seçilip seçilmemesinde o

algılayıcının veri iletim kapasitesinin sınırlandırılmamasının faydası ile verinin kopyalanmasının getireceği fazladan enerji tüketimi arasındaki ödünleşim belirleyici olacaktır.  $DKK^{komşu}$ , da bütün algılayıcıların aksamaları yerine sadece veri akışında kritik olan algılayıcının işlevini aksatması dikkate alınarak önlemler geliştirilmiştir. Bu açıdan etkilerin yaklaşık %80'inin çoğunlukla etkenlerin %20'sinden kaynakladığını ifade eden Pareto ilkesinden esinlendiği söylenebilir. Böylece bütün algılayıcılar yerine aksaklık olma ihtimali açısından kritik olan azınlık korunarak ağ ömründen DÇK'daki gibi fazla feragat etmeden DÇK'ya yakın güvenilirliğe sahip bir ağ tasarlanabileceği düşünülmektedir. Kısmi kopyalama fikri ilk olarak Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da önerilmiştir. Mevcut çalışma ile [46] arasındaki en önemli fark kopyalamanın yapıldığı yerdir. [46]'da MD üzerinden iletilen veri üretildiği kaynak tarafından kopyalanırken bu tez çalışmasında kopyalamanın veriyi MD'ye doğrudan ileten algılayıcı tarafından yapılması öngörülmektedir. Dolayısıyla önerilen strateji Dengeli Komşuda Kısmi Kopyalama ( $DKK^{komşu}$ ) olarak adlandırılabilir. Tez çalışmasında bu farkın incelenmesindeki en önemli motivasyon kopyalamanın ve dolayısıyla  $BS$ 'ye doğru tanımlanan alternatif yolların  $BS$ 'ye daha yakın bir düğümde yapılmasının ağ ömrü ve alternatif kriterler üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Ayrıca [46]'da merkezi seçilen algılayıcının azami veri transfer miktarı serbest bırakılırken diğer algılayıcılardan daha fazla veri iletmesi koşulu açık olarak modele eklenmiştir. Mevcut çalışmada ise asgari miktar ile ilgili herhangi bir zorunluluk tanımlanmamıştır. Diğer yandan yeni durumda oluşturulması gereken matematiksel model [46]'dakine göre çok daha karmaşık ve modelleme açısından ilgi çekicidir.  $DKK^{komşu}$  stratejisi için geliştirilen matematiksel model aşağıdaki gibidir:

*maks t*

öyle ki:

(3.2), (3.7), (3.8), (3.9)

$$\sum_{i \in N} y_{iBS}^k = \sum_{j \in N} z_j^k \quad \forall k \in N_0 \quad (3.13)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} y_{jBS}^k - \sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^k = z_j^k \quad \forall j, k \in N_0 \quad (3.14)$$

$$m_{jl}^k \leq Mh_l \quad \forall (j,l) \in A, k \in N_0 \quad (3.15)$$

$$m_{jl}^k \leq x_{jl}^k \quad \forall (j,l) \in A, k \in N_0 \quad (3.16)$$

$$m_{jl}^k \geq x_{jl}^k - M(1-h_l) \quad \forall (j,l) \in A, k \in N_0 \quad (3.17)$$

$$z_j^k = \sum_{(j,l) \in A} m_{jl}^k \quad \forall j, k \in N_0 \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in N_0} h_j \leq 1 \quad (3.19)$$

$$\sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq S_j t \alpha + Mh_j \quad \forall j \in N \setminus \{BS\} \quad (3.20)$$

$$x_{ij}^k, y_{ij}^k, z_j^k, m_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N \setminus \{BS\} \quad (3.21)$$

$$a_i^k, h_j \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N_0 \quad (3.22)$$

Burada önceki bütün modellerde olduğu gibi amaç fonksiyonu (3.1)'de ağ ömrü en iyilenmektedir. (3.13)-(3.18) ile modellenen ikincil veriye ait akış denge kısıtları ilk başta

$$\sum_{(j,i) \in A} y_{ji}^k - \sum_{(i,j) \in A} y_{ij}^k = x_{il}^k h_l \quad \forall i, l, k \in N_0 \quad (3.12)$$

şeklinde oluşturulmuştur. Ancak (3.12)'nin sağ tarafı iki karar değişkeninin çarpımını içermesi nedeniyle doğrusal değildir. (3.12)'yi doğrusallaştırmak için öncelikle  $m_{jl}^k = x_{il}^k h_l$  olacak şekilde yeni bir karar değişkeni tanımlanmıştır.  $m_{ij}^k$  değişkeninin değeri  $k$  kaynağına ait olup  $j$  algılayıcısı tarafından doğrudan merkezi  $l$  algılayıcısına ( $h_l=1$ ) gönderilen birincil akış miktarına (yani  $x_{il}^k$ ) eşittir. Bununla beraber merkezi olmayan ( $h_l=0$ ) algılayıcılara doğrudan iletilen veri için herhangi bir kopyalama yapılmasına gerek yoktur ( $m_{jl}^k = 0$ ). Bir başka deyişle  $m_{ij}^k$  değişkeni merkezi  $l$  algılayıcısına  $k$  kaynağının verisini doğrudan gönderen her  $j$  algılayıcısında  $k$  için kopyalanacak veri miktarını gösterir.  $m_{ij}^k$  değişkenini doğrusal olarak tanımlayabilmek için (3.15)-(3.17) kullanılmıştır. (3.18)'de ise bir  $j$  algılayıcısında her  $k$  kaynağı için oluşturulacak toplam ikincil veri miktarını gösteren ve dolayısıyla (3.13)-(3.14)'te sağ taraf değerlerini belirleyen  $z_j^k$  değişkeni tanımlanmaktadır. DÇK

modelinde yer aldığı gibi kopyalamanın ve ikincil yolların kullanımının anlamlı olması için aynı kaynağa ait asıl ve kopyalanan veri düğüm ayrık yollar üzerinden hedef noktaya gönderilmelidir. Böylece herhangi bir algılayıcının birincil verisini iletirken izlediği yol üzerinde bulunan algılayıcılardan birinde veya daha fazlasında meydana gelebilecek aksaklıklar sonucu bu veriye ait kopya tamamen farklı algılayıcılar üzerinden gönderileceği için veri kaybı olmadan güvenilir şekilde  $BS$ 'ye veri iletimi gerçekleştirilmiş olacaktır.  $DKK^{komşu}$ 'da düğüm ayrık yolların kullanımını sağlamak için (3.8) ve (3.9) modele dâhil edilmektedir. KAA'ların karakteristik özelliklerinden biri algılayıcıların sınırlı enerjiye sahip olmalarıdır. (3.7)'de modellendiği üzere algılayıcılar, sınırlı enerjilerini birincil ve varsa ikincil kopyaların iletiminin yanı sıra kendi alanlarını sezmek için de kullanırlar. (3.19) ile eğer ağ ömrüne katkı sağlayacaksa en fazla bir tane MD'nin açılmasına izin verilmektedir. Modelde merkezilik tanımını oluşturan ve algılayıcıların dengeli kullanımını sağlayan koşul (3.20) ile ifade edilmektedir. Buna göre eğer herhangi bir  $j$  algılayıcısı MD değilse dışarıdan en fazla  $\alpha S_j t$  kadar veri kabul edebilmektedir. Bu kural algılayıcıların dengeli kullanımının ve veri akışında kritik noktaların sayısının kontrol altında tutulması açısından faydalıdır. Bununla beraber merkezi bir algılayıcı ise böyle bir miktar sınırlaması getirilmemektedir. Son olarak karar değişkenlerine ait işaret kısıtları (3.21) ve (3.22) yer almaktadır. Birincil ve ikincil veri için çoklu yolların kullanımına izin verildiği için ilgili değişkenler negatif olmayan sürekli değerler alacak şekilde tanımlanmıştır.

Modelin ticari çözümler kullanıldığında çözüm süresinin biraz daha iyileştirilebilmesi adına bazı geçerli eşitsizlikler sonradan eklenerek nihai model oluşturulmuştur. Ancak daha net anlaşılabilirliği adına bahsedilen eşitsizlikler yukarıdaki modelden ayrı olarak Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.



Çizelge 3.1 : Geçerli Eşitsizlikler ve Açıklamaları.

Geçerli Eşitsizlik	Açıklama
$x_{ij}^k \leq S_{jt} \quad \forall (i, j) \in A, k \in N$ $y_{ij}^k \leq S_{jt} \quad \forall (i, j) \in A, k \in N$	Herhangi bir ayırıt üzerinde iletilen herhangi bir kaynağa ait birincil ve ikincil akış miktarları bir algılayıcının ağ ömrü boyunca üreteceği toplam veri miktarından fazla olamaz.
$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in N} y_{ij}^k \leq M(1 - h_l) \quad \forall l \in N$	$l$ algılayıcısı MD ise üzerinden ikincil veri geçemez (düğüm ayrık yol özelliği koşulu nedeniyle).

Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere modelin mantığına uygun olup çözüm süresini olumlu etkilediği gözlemlenen birçok basit geçerli eşitsizlik yer almaktadır.

## 4. PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde 3. Bölümde bahsedilen stratejilerin ağ ömrü, ağ güvenilirliği gibi kriterler açısından karşılaştırmaları yapılacak ve bu stratejilerin birbirlerine göre zayıf ve güçlü yanlarından bahsedilecektir. Ayrıca bu çalışmada hem önerilen matematiksel modelin hem de DKK<sup>komşu</sup> modeline ait kaynak sayısı değiştirilerek Şendil ve Altın\_Kayhan [46]'da ele alınan çalışmayla ağ ömrü ve çözüm süreleri açısından analizleri yapılacaktır.

### 4.1. Örneklem Oluşturulması

Bu bölümde önerilen modele ait sonuçları gözlemlemek amacıyla kullanılan örneklerin üretildiği algoritma detaylı olarak incelenecektir. Ağ örnekleri oluşturmak için kullanılan algoritma Şekil4.1'de gösterilmiştir ve ardından parametrelere ait açıklamalara yer verilmiştir.

---

$sc = 100;$   
 $AREA = \left(\sqrt{sc/2}\right)^2 N\pi ;$  \*\* Toplam kapsama alanı  
 $RADIUS = \sqrt{AREA/\pi} ;$   
 $p = 1;$   
 $Forall \forall i \in N ;$   
 $ph = 2\pi random() ;$   
 $r = 10^p RADIUS \sqrt{random} ;$   
 $xc_i = r \sin(ph), yc_i = r \cos(ph)$  \*\* Koordinatların oluşturulması  
 $Forall \forall i \in N ;$   
 $Forall \forall j \in N ;$   
 $d_{ij} = \sqrt{(xc_i - xc_j)^2 + (yc_i - yc_j)^2} \& d_{ij} = d_{ji};$  \*\* Mesafelerin belirlenmesi  
 $If d_{ij} \leq HM;$   
 $Then a_{ij} = 1 \& a_{ij} = a_{ji};$  \*\* Ayrıtların belirlenmesi  
 $Forall \forall (i, j) \in A;$   
 $PTX_{ij} = 50 + 10^{-2}d_{ij}^2;$   
 $If j \neq BS;$   
 $Then PTX_{ij} = PTX_{ji};$  \*\* Transfer Enerjisi

---

Şekil4.1 : Verilerin Üretildiği Algoritma.

Algoritmada belirtildiği üzere algılayıcılara ve BS'ye ait konumlar ve aralarındaki mesafeler düzgün dağılıma göre oluşturulan koordinatlar yardımıyla belirlenmiştir.

Her bir algılayıcı için diğer algılayıcılarla iletişime geçebilmesinde gerekli olan bir menzil mesafesi vardır. Bu mesafe, her bir örneklem için *BS* ile direk iletişim kurabilen toplam algılayıcı sayısının tüm algılayıcı sayısının %50'si kadar sayıda olmasını sağlayan minimum değere sahip olmaktadır. Yani,  $20+1(BS)$ 'lik bir örneklem için *BS* ile direk iletişime geçebilen toplam algılayıcı sayısının 10 olmasını sağlayan minimum değer 'hesaplanan mesafe'(HM) değerini vermektedir. Dolayısıyla bu mesafe değeri Şendil ve Altın\_Kayhan [42]'de varsayıldığı gibi sabit bir orana bağlı olmamaktadır. Ayrıca, tüm ağ üzerinde oluşturulacak ayrıtlar hesaplanan mesafelerin menzil mesafesinden küçük olup olmamasına bağlı olarak  $a_{ij}$  matrisinde 0-1 değerini almaktadır. Gözlem alanı büyüklüğünün veri kümesi ile orantılı olarak değiştiği algoritmaya bakarak söylenebilmektedir. Bir *i* algılayıcısının (*i,j*) ayrıtı üzerinden bir birim veri göndermek için harcayacağı enerji miktarı  $PTX_{ij}$ ,  $50 + 10^{-2}d_{ij}^2$  kullanılarak belirlenmektedir. Buna göre her  $i \in N_0$  algılayıcısının başka bir  $j \in N$  düğümüne veri iletmesi durumunda harcayacağı birim enerji *i-j* arasındaki mesafenin karesi ile doğru orantılı olmaktadır. Dolayısıyla *i* düğümü için iletim mesafesi arttıkça harcanacak birim enerji miktarı da artacaktır. Bu çalışmada ele alınan KAA örnekleri en az 21 en fazla 71 algılayıcıdan oluşmaktadır. Her ağ büyüklüğü için onar tane rastgele örnek üretilmiştir.

#### 4.2 Parametreler

Tüm modellerin çözümlerinde kullanılan sabit ve değişken değerler alan parametrelerin sayısal değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : Sabit ve Değişken Değerlerdeki Parametreler.

Parametre	Değer
$E_i$	$10^6 \text{ jul}$
$S_i$	$1 \text{ bit}$
$M$	$10^8$
$PRX$	$50 \text{ jul}$
$\alpha$	$Eğer N \leq 41$ ise, $(0,075(N-1)S_i)$ $Eğer N > 41$ ise, $1$
$PTX_{ij}$	$50 + \epsilon d_{ij}^2 \text{ jul}$
Zaman limiti	$4 \text{ saat}$

$E_i$ ,  $S_i$ ,  $M$  ve  $PRX$  parametreleri bütün algılayıcılar için aynı alınmıştır.  $PTX_{ij}$  ise her  $(i,j)$  algılayıcı çifti için değeri  $(i,j)$  ayrıtının uzunluğunun karesiyle doğru orantılı olarak belirlenen değişken bir parametredir.  $E_i$ ,  $P$ ,  $S$  ve  $PRX$  parametrelerine ait açıklamalar detaylı olarak 3. Bölümde bahsedilmiştir.  $M$  parametresine ait değer ağ üzerinde bir algılayıcının gönderebileceği en büyük olurlu akıştan küçük olmaması gerekmektedir. Bu nedenle bu parametre,  $BS$ 'ye en yakın konumdaki algılayıcının tüm enerjisini veri iletmek için harcadığında gönderebileceği azami akış miktarı olarak belirlenmiştir. Algılayıcıların iletebilecekleri azami veri miktarını kontrol etmek için kullanılan  $\alpha$  parametresi düğüm sayısı 41'in altında olan ağlarda algılayıcı sayısı ile orantılı olarak belirlenmiştir. Çalışmada ağ büyüdükçe MD'nin ağ performansına nasıl bir etki meydana getirdiğini incelemek amacıyla düğüm sayısı 41'den büyük olan ağlarda  $\alpha$  değeri 3 olarak alınmıştır. Böylelikle dengeli kullanım ve MD seçme kısıtlarının düğüm sayısına bağlı olarak etkili şekilde işleyebilmesi sağlanmıştır. Detaylandırılırsa,  $\alpha$  parametresinin tüm örnekler için aynı değere sahip olduğu düşünüldüğünde, dengeli kullanım ve MD seçme kriterlerinin büyük ağlarda göstereceği etki ile küçük ağlarda göstereceği etki farklı olması beklenmektedir. Örneğin, parametrenin değeri 3 olarak alınması büyük ağlar için ideal olurken küçük ağlarda ise dengeli kullanım açısından daha esnek olunmasına ve merkezi düğüm seçmesini zorlayacak durumun ortadan kalkmasına sebep olacaktır. Tam tersi durumda parametre değeri 1,5 alındığında bu durum küçük ağlar için daha uygunken büyük ağlar için daha kısıtlayıcı olacak ve belki de olurlu bir çözümün bulunamamasına sebep olabilecektir. Kısacası değer tüm ağlar için sabit alınması bir grup için iyi olurken diğer grup için ters etki yapabilmektedir. DTK ve DÇK senaryoları için her bir algılayıcı üzerinden aktarılabilecek maksimum akış miktarının en fazla bir sensörün ağ ömrü boyunca üreteceği toplam veri miktarının  $\alpha$  katı kadar olması istenirken, DKK<sup>komşu</sup> modeli için sadece merkezi düğümden geçen toplam veri miktarının belirtilen eşik değerden fazla olmasına izin verilmiştir. Kısacası ağ büyüdükçe ağ üzerindeki veri miktarı da artacağından algılayıcıların üzerlerinden geçebilecek veri miktarına dair sınırlama da uyarlanmalıdır. Tüm modeller için azami çözüm süresi 4 CPU saati ile sınırlandırılmıştır. Geliştirilen modellerde en hızlı şekilde sonuç alabilmek için Java programı içerisinde CPLEX

kütüphanesi kullanılarak farklı büyüklüklere sahip ağ örnekleri için testler yapılmıştır. Toplamda 70 örnek üzerinde sonuçlar alınmıştır.

### 4.3 Test Sonuçları

Bu bölümde bahsedilen tüm modeller için aynı veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar çeşitli performans kriterleri doğrultusunda karşılaştırılmıştır. Açıklamak gerekirse, ilk olarak elde edilen optimal ağ ömrü değerleri incelenmiş ve kullanılan her bir güvenilirlik stratejisinin ağ ömrüne etkisi gözlemlenmiştir. Diğer yandan güvenilirlik stratejilerinin ne derece etkili olduklarını analiz edebilmek için olası bir aksaklık durumunda her bir modelde *BS*'ye ulaştırılamayan veri miktarları incelenmiştir. Bunun için  $DKK^{komşu}$  modelinde, MD açılan örneklerde, merkezi olarak belirlenen algılayıcının çöktüğü varsayılmıştır. Bu durumda DTK ve TK modellerindeki çözüme göre *BS*'ye iletemeyecek verinin oranı belirlenmiştir. Bu oran hesaplanırken de ilgili modellerde her bir algılayıcının  $DKK^{komşu}$ 'daki MD üzerinden gönderdiği veri miktarının tüm ağdaki veri miktarına oranı hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca belirlenen aralıktaki kayıp veri oranına göre algılayıcılar *iyi*, *orta* ve *kötü* olarak sınıflandırılmış ve grupların ortalama büyüklükleri incelenmiştir. Kopyalama stratejisine sahip olan DÇK ve  $DKK^{komşu}$  modelleri için MD'ye yapılacak herhangi bir saldırı sonucu verinin iletilmemesi gibi bir durum söz konusu olmayacağından bu teste dâhil edilmemişlerdir. Ancak  $DKK^{komşu}$  stratejisinin ağ güvenilirliğine sağladığı katkının görülebilmesi amacıyla ne kadarlık bir verinin kurtarılmasında rol oynadığı incelenmiştir. Ağ ömrü tamamlandıktan sonra ağ üzerinde toplam kalan enerji ve en fazla kalan enerji miktarları hesaplanarak modellerin birbirlerine göre ne ölçüde enerjiyi etkin kullandıklarını inceleyen analizler yapılmıştır. Son olarak Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da ele alınan model sırasıyla  $DKK^{komşu}$  modeli ve  $DKK^{komşu}$  modelinin kaynak sayısı sınırlandırılmış şekliyle ağ ömrü ve çözüm süreleri açısından karşılaştırılmıştır.

#### 4.3.1 Ağ Ömrü

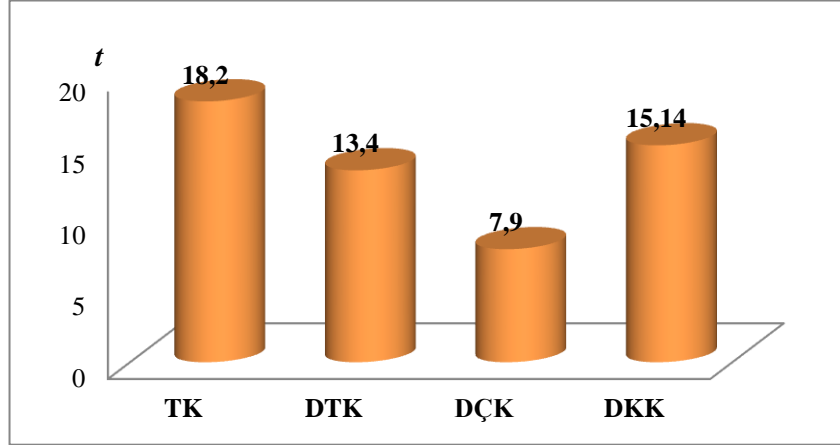
Başlangıçta TK, DTK, DÇK ve  $DKK^{komşu}$  modelleri için aynı veri kümesi kullanılarak çözümler alınmış ve her ağ büyüklüğüne ait ortalama ağ ömrü değerleri

karşılaştırılmıştır. Her modele ait örneklerden alınan sonuçlar detaylı olarak Ek 1’de yer almaktadır. Bu sonuçlar incelendiğinde 21,31 ve 41 düğümlü örneklerde tüm modellerde zaman limiti içerisinde optimal ağ ömrü değerleri elde edilirken, 51, 61 ve 71 düğümlü örneklerde DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> modellerinin her örnek için optimal çözümlerine ulaşamadığı görülmektedir. Sonuç olarak her ağ büyüklüğü için geliştirilen onar örnek arasından, DKK<sup>komşu</sup> modeli için 51 düğümlü ağda 2, 61 düğüm için 3 ve 71 düğüm için ise 10 örnekte optimal sonuca ulaşamamıştır. DÇK modeli için ise sırasıyla bu değerlerin 2, 4 ve 6 olduğu görülmüştür. Yapılan testler sonucunda, her bir ağ büyüklüğü için farklı stratejilerle zaman limiti içerisinde elde edilen (olurlu çözümler) ortalama ağ ömrü değerleri Çizelge 4.2’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.2 : Modellerin Farklı Ağ Büyüklüklerine Ait Ortalama Ağ Ömrü Değerleri.

<b>N</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komşu</sup></b>
<b>21</b>	28,6	19,4	10,8	21,8
<b>31</b>	19,3	13,5	8,6	14,3
<b>41</b>	17,1	14,5	8,2	14,6
<b>51</b>	16,4	12,3	7,4	12,7
<b>61</b>	16,1	12,2	7,6	12,3
<b>71</b>	11,7	8,4	4,7	7,1
<b>Ort.</b>	<b>18,2</b>	<b>13,4</b>	<b>7,9</b>	<b>15,1</b>

Sonuçlar incelendiğinde tüm modellerin ortalama ağ ömrü değerlerinin ağ büyüklüğü arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu duruma algılayıcı sayısındaki artış ile gözlem alanında meydana gelen büyümeye karşılık başlangıç enerjisinin sabit kalması sebep olmaktadır. Yukarıda da bahsedildiği gibi kullanılan örnek kümesinde algılayıcıların yerleştirildikleri gözlem alanının büyüklüğü düğüm sayısı ile doğru orantılıdır. Gözlem alanı büyüdükçe algılayıcıların *BS*’ye olan ortalama uzaklıkları da artmaktadır. Dolayısıyla algılayıcıların veri transferini gerçekleştirirken daha fazla enerji sarf etmeleri gerekmektedir. Ayrıca, algılayıcı sayısının artmasıyla ağ üzerinde taşınan veri miktarının da artması bir diğer sebep olarak görülmektedir. Sonuçlardan elde edilen ortalamalar daha iyi anlaşılması için Şekil 4.2’deki grafikte ifade edilmiştir.



Şekil 4.2 : Modellerin Ortalama Ağ Ömrü Değerleri.

Modeller arası ortalama ağ ömrü değerleri incelendiğinde en iyi ağ ömrüne sahip olan yaklaşımın sadece tek kopya üretilerek veri iletiminin gerçekleştirildiği dolayısıyla herhangi bir güvenilirlik önleminin alınmadığı TK modeli olduğu görülmektedir. Bu sebeple de ağ ömürlerine ait karşılaştırmalar TK modeli esas alınarak yapılmıştır. Güvenilirlik protokollerinin kullanıldığı diğer üç model için ağ ömründe görülen azalma oranları tespit edilmiştir. Burada X'in üç modelden herhangi biri olduğu varsayılırsa, her bir model için elde edilen ortalama ağ ömrünün TK modeline ait ortalama değerden yüzde ne kadar az olduğu  $100 \cdot (T_{TK} - T_X) / T_{TK}$  formülü ile hesaplanmış ve Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : TK Modeline Göre Diğer Modellerin Ağ Ömürlerindeki Oransal Azalma.

N	DTK(%)	DÇK(%)	DKK <sup>komsu</sup> (%)
21	32,2	62,2	23,8
31	30,1	55,4	25,1
41	15,2	52,1	14,6
51	25,0	54,9	22,6
61	24,2	52,8	23,6
71	28,2	59,8	39,3
<b>Ort.</b>	<b>25,8</b>	<b>56,2</b>	<b>21,9</b>

Tüm ağ büyüklükleri için genel ortalamalar alındığında, dengeli kullanım stratejisinin kullanıldığı DTK modeli için yaklaşık %25,8 oranında bir düşüş olduğu

gözlemlenmiştir. Bu modelde TK'dan farklı olarak algılayıcıların başka algılayıcılar için kullanım oranlarının dengelenmesi söz konusudur. Dengelemenin amacı ağın ömrünü arttırmaktan ziyade olası aksaklıklara karşı meydana gelebilecek olumsuz etkinin boyutunu azaltmaktır. Dolayısıyla TK ve DTK arasındaki fark dengeli kullanım stratejisinin ağ ömrüne etkisini göstermektedir. Dengeli kullanımın yanı sıra çoklu yollarla çoklu kopya gönderiminin uygulandığı DÇK modelinde bu değer %56,2 civarında olduğu görülmüştür. Bu modelde ağ güvenliğini güçlendirmeye yönelik olarak çoklu kopya stratejisinin benimsenmesi daha fazla enerji harcanmasına dolayısıyla ağ ömründen yüksek oranda feragat edilmesine sebep olmaktadır. Bu duruma bağlı olarak üç strateji arasında en düşük ağ ömrünün DÇK modeliyle elde edildiği görülmektedir. DKK<sup>komşu</sup> yaklaşımında kontrollü kopyalama yapılması ve böylece enerji-güvenilirlik ödünleşiminin dikkate alınması neticesinde ağ ömründeki kaybın yaklaşık %25 olduğu tespit edilmiştir. Modelde izlenen stratejide MD'nin ağ ömründe iyileşme olması durumunda devreye girmesine izin verilmektedir. Sadece MD'ye yapılabilecek saldırılar dikkate alınmakta ve kendisine doğrudan olarak verisini yollayan düğüm veya düğümler tarafından verinin kopyalanması sağlanmakta yani DKK<sup>komşu</sup> modelinin hem ağ ömrünün hem de ağ güvenliğinin dikkate alındığı dengeli bir yaklaşım olduğu söylenebilmektedir. Ancak DTK ve DKK<sup>komşu</sup> sonuçlarına bakıldığında ortalama ağ ömrü değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sonuçlar detaylı incelendiğinde DKK<sup>komşu</sup>'da MD açılmadığı ve DTK ile aynı ağ ömrü değerine sahip örneklerin olduğu görülmüştür. Yani yoğun kullanımı açısından diğer algılayıcıların da veri iletim yollarını kısaltarak ağ ömrünü iyileştirebilecek bir algılayıcı yoksa DKK<sup>komşu</sup> modeli DTK modeline dönüşmektedir. Dolayısıyla ağda sadece dengeli kullanım sağlanmakta ve MD olmadığı için herhangi bir kopyalama gerçekleşmemektedir. Sonuç olarak DKK<sup>komşu</sup> ve DTK arasındaki farklılık ihtiyaç halinde kullanılan MD'nin ağ ömrüne etkisi olarak nitelendirilebilir. 21 düğümlü ağlardan 71 düğümlü ağlara kadar elde edilen optimal çözümler incelendiğinde MD açılan örneklerin sayısı sırasıyla 7, 7, 5, 4, 5, 0 kadardır. Yani 21 düğümlü 10 örneğin yedi tanesinde MD açılırken bu sayı 51 düğümlü örneklerde dört tanedir. Bu sonuçlar ağ ömrüne katkı sağlayabilmek amacıyla ne sıklıkta MD'ye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu duruma bağlı olarak ihtiyaç duyulduğu zaman MD kullanımının ağ ömrüne sağladığı katkıyı



netleştirmek amacıyla DTK ve DKK<sup>komşu</sup> modellerine ait optimal ağ ömürlerinin farkı yüzdesel olarak ifade edilmiştir. Her ağ büyüklüğü için hesaplanan ortalama optimal ağ ömrü ile  $\Delta=100*(T_{DKK}^{komşu} - T_{DTK}) / T_{DTK}$  formülü kullanılarak yüzdesel fark tespit edilmiştir. Çizelge 4.4’de bununla ilgili  $\Delta_1(\%)$  ve  $\Delta_2(\%)$  olarak iki tip sonuç mevcuttur. Bu ifadelerden  $\Delta_1(\%)$ , iki stratejiye ait 10 örneğin tamamının yani olurlu çözümlerin de dâhil edildiği durum,  $\Delta_2(\%)$  ise sadece MD açılan örneklerin dikkate alınması ile iki stratejiye ait ağ ömrü değerleri farkının yüzdesel olarak ifade edilmiş hâlini ifade etmektedir. Bu değerlere bakılarak aslında MD’nin ağ ömrüne katkısının daha net anlaşılması sağlanmaktadır.

Çizelge 4.4 : DTK Modeline Göre DKK<sup>komşu</sup> Modelinin Ağ Ömründeki İyileşme Oranları.

<i>N</i>	$\Delta_1(\%)$	$\Delta_2(\%)$
<b>21</b>	12,7	14,8
<b>31</b>	5,9	9,0
<b>41</b>	0,8	1,2
<b>51</b>	1,0	5,4
<b>61</b>	1,0	1,6
<b>71</b>	0,1	0,1
<b>Ort.</b>	<b>3,6</b>	<b>5,3</b>

Sonuçlar detaylı incelendiğinde özellikle 41 düğümlü ağlardan sonra yüzdesel farkın oldukça azaldığı görülmektedir. Ağ büyüklüğü arttıkça bir MD ile elde edilen iyileşmenin azalması aslında beklenen bir durumdur. Özellikle 51 ve üzeri örneklerde DKK<sup>komşu</sup> modelinden optimal sonuç almanın zorlaşması dolayısıyla en iyi sonuca dair MD’ye ihtiyaç olup olmadığının bilinmemesi ve küçük ağlar için bir MD’nin yoğun kullanımıyla algılayıcıların büyük bir çoğunluğunun veri iletim yolları kısaltılabilirken, düğüm sayısı arttıkça tek bir MD’nin kullanımının aynı etkiyi göstermemesi bu iyileşmenin azalmasına sebep olan faktörler arasında gösterilmektedir. Önceden de bahsedildiği üzere ağ büyüklüğü arttıkça alternatif yolların sayısında da artış olmakta dolayısıyla MD’ye duyulan ihtiyaç buna bağlı olarak azalmaktadır. İki durum arasındaki oransal fark göz önüne alındığında ise MD kullanılan örneklerden elde edilen ortalamaların ağ ömründe %1,7 civarında bir iyileşme sağladığı görülmektedir.

### 4.3.2 Ağ Güvenilirliği

Bu bölümde çalışma kapsamında ele alınan alternatif stratejilerin ağ güvenilirliği açısından değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu amaçla olası dış ve iç tehditler sonucunda sadece merkezi düğümün fonksiyonelliğini yitirmesine sebep olabilecek bir saldırı veya aksaklık durumunda kopyalama stratejisinin olmadığı TK ve DTK modelleri için ağ güvenilirliğinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu çalışmada ağ bütünlüğünün korunmasına öncelik verilerek tüm verinin  $BS$ 'ye iletilmesinin sağlanmasına çalışılmaktadır. Dolayısıyla yapılan analizlerde kullanılan metrik toplam verinin ne kadarlık kısmının  $BS$ 'ye iletilmediğidir. Detaylandırılırsa,  $DKK^{komşu}$  modelinde MD olarak belirlenen algılayıcının TK ve DTK modellerinde arızalanan algılayıcı kabul edilmesiyle toplam verinin ne kadarının  $BS$ 'ye iletilmediği hesaplanmıştır. Böylelikle MD olan algılayıcının  $DKK^{komşu}$  stratejisinin sadece ağ ömrü açısından değil ağ güvenilirliği açısından da sağladığı katkı görülmektedir. Burada ağ üzerinde üretilen toplam veri miktarı yani  $BS$  haricindeki tüm algılayıcıların ağ ömrü boyunca ürettikleri toplam veri miktarı  $\sum_{i \in N_0} S_i t = (N - 1)t$  şeklinde hesaplanmaktadır. Ayrıca  $DKK^{komşu}$  ve  $DÇK$  modelleri için sadece MD'nin kendi verisinin iletilmemesi durumu söz konusu olmakta dolayısıyla her iki model için de kayıp veri oranları aynı olmaktadır. Bu bilgiler ışığında öncelikle Çizelge 4.5'te  $DKK^{komşu}$  modelinde tüm ağ büyüklüklerine ait optimal sonuçlar içerisinde MD kullanılan örnekler baz alınarak önüne geçilen veri kaybı oranları gösterilmektedir.

Çizelge 4.5 : MD Üzerinden Geçen Ortalama Veri Oranı.

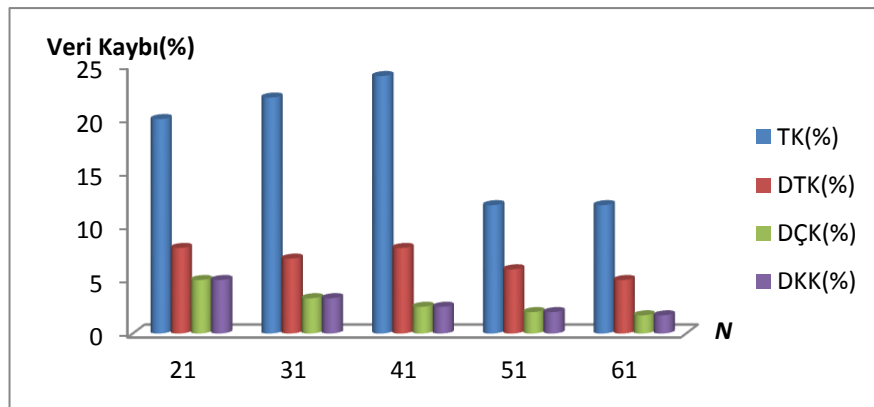
$N$	Önlenen Veri Kaybı (%)
21	17,5
31	18,2
41	8,3
51	13,8
61	10,9
<b>Ort.</b>	<b>13,7</b>

Sonuçlar incelendiğinde genelde ağ büyüklüğü arttıkça belirlenen çözüm süresi limiti sonunda elde edilen en iyi olurlu çözümler kullanıldığı için MD'nin arızalanması sonucu kopyalama stratejisi kullanılarak iletimi gerçekleştirilen ortalama veri oranında azalma olduğu görülmektedir. Bu durum önceden bahsedilen MD açma eğiliminin azalma sebepleri ile açıklanabilir. Bununla beraber MD kullanılsa bile verinin birçok farklı yol üzerinden iletilme şansı olduğundan üzerinden geçen veri miktarı tüm ağ üzerindeki veri miktarına oranla daha az miktarda olmaktadır. Düğüm sayısından bağımsız olarak hesaplanan ortalama veri oranı ise %13,7'dir.

TK, DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> modelleri için tüm ağ büyüklüklerine ait örneklerden elde edilen iletilemeyen veri miktarı oranları Ek 2'de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu sonuçlar arasından optimal çözüm elde edilebilen örneklere ait ortalama değerler ise Çizelge 4.6'da mevcuttur. Dengeli kullanım stratejisinin güvenliğe etkisinin daha iyi anlaşılması için belirtilen değerler Şekil 4.3'teki grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : MD'nin Çökmesi Sonucu İletilemeyen Ortalama Veri Oranı.

N	TK(%)	DTK(%)	DÇK(%)	DKK <sup>komşu</sup> (%)
21	20	8	5	5
31	22	7	3,3	3,3
41	24	8	2,5	2,5
51	12	6	2	2
61	12	5	1,7	1,7
<b>Ort.</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	<b>2,9</b>	<b>2,9</b>



Şekil 4.3 : TK, DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> Modelleri için Ortalama Kayıp Veri Oranı.

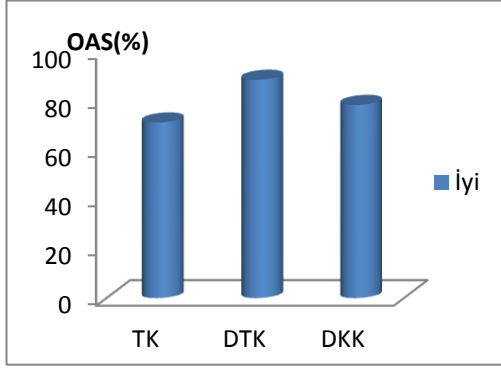
Sonuçlar detaylı incelendiğinde TK modeli için kayıp veri oranları herhangi bir güvenilirlik stratejisi uygulanmadığından tüm ağ büyüklükleri için en yüksek değere yani en düşük korunan veri oranlarına sahip olmaktadır. Özellikle daha küçük örneklerde ağ üzerinde alternatif yolların azalması nedeniyle MD daha sık kullanılmaktadır. Dolayısıyla MD üzerinden daha fazla veri geçtiğinden MD'nin devre dışı kalması ile korunamayan veri miktarı da artmaktadır. DTK modeli incelendiğinde ise ağ üzerinde algılayıcılar daha dengeli kullanıldığından *BS*'ye iletemeyen veri miktarının TK'ya göre %11 daha az olduğu yani güvenilirlik açısından daha iyi durumda olduğu söylenebilmektedir. Bu durum dengeli kullanım stratejisinin ağ güvenliğine olan olumlu etkisini göstermektedir. Ancak  $DKK^{komşu}$  modeline göre kaybolan veri oranı %4,1 daha fazladır ve bu fark MD'nin ağ güvenilirliğine etkisini göstermektedir.  $DÇK$  modelinde ise  $DKK^{komşu}$  da olduğu gibi sadece MD'ye ait verinin kaybı söz konusudur.

İncelenen diğer bir durum ise MD ile doğrudan iletişimde olan her bir algılayıcının MD'nin saldırıya uğraması sonucu toplamda ne kadarlık veri kaybına maruz kaldığıdır. Ancak değerlendirmenin bu kısmında  $DÇK$  modeli dâhil edilmemiştir. Zira MD dışındaki tüm algılayıcılar kopyalama işlemi gerçekleştirebildiğinden MD hariç kimse herhangi bir veri kaybına maruz kalmamaktadır. Kaybedilen veri miktarı her bir algılayıcının toplam veri miktarına oranlanarak bir oran hesaplanmıştır. Buna göre  $j \in N_0$ 'nin merkezi düğüm olduğu durumda her  $i \in N_0 \setminus \{j\}$  algılayıcısına ait kayıp veri oranı  $\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k / S_{it}$  kullanılarak belirlenmiştir ve bu değere göre her algılayıcının durumu iyi-orta-kötü şeklinde değerlendirilmiştir. Detaylandırılırsa, bir algılayıcının durumu eğer o algılayıcıya ait kayıp veri oranı %30 veya daha azsa *iyi*, (%30 %50] aralığında ise *orta*, %50'den fazla ise *kötü* olarak belirlenmiştir. Ek 3'te tüm ağ büyüklükleri için her bir örneğe ait iyi-orta-kötü durumlarda olan toplam algılayıcı sayısı yer almaktadır. Çizelge 4.7'de ise bu değerlere ait ortalama değerler gösterilmektedir.

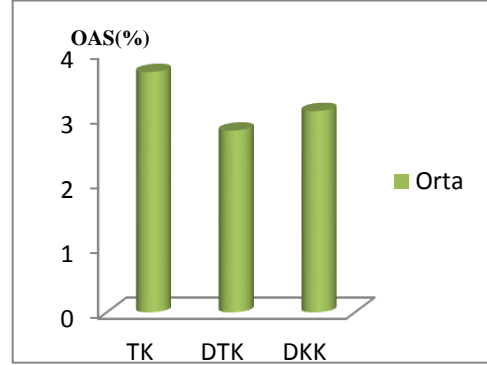
Çizelge 4.7 : TK, DTK ve DKK<sup>komşu</sup> Modelleri için Güvenilirlik Yönünden Sınıflandırılmış Ortalama Algılayıcı Sayısı Oranı.

N	TK			DTK			DKK <sup>komşu</sup>		
	İyi(%)	Orta(%)	Kötü(%)	İyi(%)	Orta(%)	Kötü(%)	İyi(%)	Orta(%)	Kötü(%)
21	61,0	5,0	29,0	83,0	5,5	6,5	62,0	5,5	27,0
31	71,3	3,3	22,0	88,7	1,7	6,3	75,3	3,3	18,0
41	68,0	4,5	25,0	87,5	4,3	5,8	88,0	1,8	8,0
51	76,4	2,6	19,0	92,0	0,6	5,4	82,6	2,4	13,0
61	79,8	3,2	15,5	91,7	2,2	4,7	84,2	2,5	11,7
<b>Ort.</b>	<b>71,3</b>	<b>3,7</b>	<b>22,1</b>	<b>88,6</b>	<b>2,8</b>	<b>5,7</b>	<b>78,4</b>	<b>3,1</b>	<b>15,5</b>

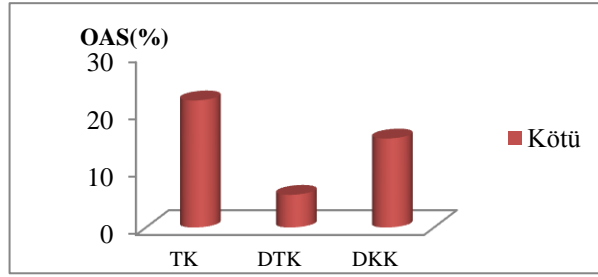
Çizelge 4.7'deki sonuçlar incelendiğinde TK modelinde *iyi* durumda olan algılayıcı sayısının DTK modeline göre ortalamada %17,3 daha az olduğu bunun da önceden bahsedildiği gibi dengeli kullanımın ağ güvenliğine olan etkisinden kaynaklandığı söylenebilmektedir. *Orta* derecede olan algılayıcı sayısında neredeyse aynı değerlere ulaşılmıştır. Diğer yandan *kötü* durumda olan algılayıcı sayısına bakıldığında, aralarında ciddi farklar olduğu ancak ağ büyüklüğü arttıkça bu farkın azaldığı görülmektedir. DKK<sup>komşu</sup> modeli için ise DTK modeline göre *iyi* durumda olan algılayıcı sayısı daha az ama TK'ya göre daha fazla sayıda olduğu görülmektedir. Bu durum aslında DTK yaklaşımının ağ güvenilirliğini daha iyi gibi gösterse de aslında sadece dengeli kullanımdan kaynaklı veri kaybının azaltılabildiği ancak verinin hiçbir şekilde kurtarılamadığı bir yaklaşım olduğu unutulmamalıdır. Nitekim önceden de bahsedildiği gibi çalışmada esas alınan yoğun kullanılmakta olan düğüme gelecek herhangi bir saldırıda bu düğümü kullanan algılayıcıların veri kaybına uğramalarının engellenmesidir. Dolayısıyla DKK<sup>komşu</sup> modeli için *iyi* durumdaki algılayıcı sayısı DTK'dan %4,2 gibi az bir farkla daha düşük olsa bile ağ içerisinde veri kaybını önleyen bir misyonu bulunmaktadır. Bu durum MD kullanımının sadece dengeli yaklaşım bakış açısına göre ağ güvenliğine sağladığı katkıyı birebir göstermektedir. Stratejilere ait karşılaştırmanın daha iyi anlaşılması için sonuçlara ait ortalama algılayıcı sayısı (OAS) oranı hesaplanmış, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Modellere Ait İyi Durumdaki OAS.



Şekil 4.5 : Modellere Ait Orta Durumdaki OAS.



Şekil 4.6 : Modellere Ait Kötü Durumdaki OAS.

### 4.3.3 Toplam ve En Fazla Kalan Enerji Oranı

Ağ ömrü ve ağ güvenilirliği karşılaştırmalarından sonra bu bölümde modellerin enerji verimliliğini karşılaştırmak için toplam ve kalan enerji oranları olmak üzere iki metrik incelenmiştir. Önceden de bahsedildiği üzere sistemden ilk ayrılan algılayıcıya ait olan aktif yaşam süresi ağ ömrünü belirlemektedir. Ancak, ağ ömrü tamamlandıktan sonra enerjisi en erken biten algılayıcı fonksiyonelliğini yitirmiş olsa bile yine de bazı algılayıcılarda halen bir miktar enerji bulunabilmektedir. Dolayısıyla araştırılmak istenen geride kalan kullanılmayan enerji miktarının ne kadar olduğu ve buna bağlı olarak enerjinin etkili kullanılıp kullanılmadığıdır. Öncelikle, her örnekte ağ ömrü tamamlandıktan sonra kalan toplam enerjinin tüm ağın başlangıçta sahip olduğu enerjiye ( $\sum_{i \in N_0} E_i$ ) oranı hesaplanmıştır. Ek4'te her bir model ve farklı ağ büyüklükleri için ilgili optimal çözümler kullanılarak elde edilen azami kalan enerji ve toplam kalan enerji yüzde değerleri sunulmaktadır. Modeller arasındaki farkın daha net görülmesi için Çizelge 4.8'de tüm modeller için sadece optimal sonuçlara ait ortalama toplam kalan enerji (TKE) yüzdeleri gösterilmektedir.

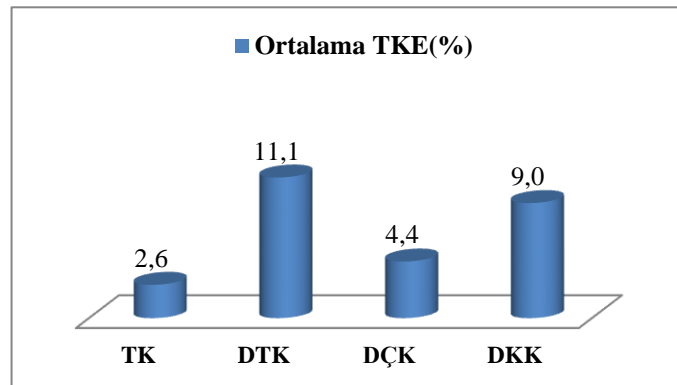
Çizelge 4.8 : Stratejilere Ait Ortalama TKE Oranları.

Ortalama TKE(%)				
N	TK	DTK	DÇK	DKK <sup>komşu</sup>
21	8,5	22,8	8,4	18,4
31	3,5	15,1	7,0	11,3
41	1,1	6,1	4,3	4,8
51	1,8	8,3	3,8	6,5
61	0,5	6,8	1,7	4,2
71	0,4	7,1	1,5	-
<b>Ort.</b>	<b>2,6</b>	<b>11,1</b>	<b>4,4</b>	<b>9,0</b>

Sonuçlar genel olarak incelendiğinde tüm modeller için ortalama TKE oranlarının ağ büyüklüğü arttıkça azaldığı görülmektedir. Açıklamak gerekirse, ağdaki düğüm sayısı arttıkça ağ üzerindeki veri iletim yollarının da sayısı artmaktadır. Dolayısıyla algılayıcıların diğer algılayıcılar için kullanılma ihtimalleri de artmaktadır. Dolayısıyla, fazladan enerji kalmasının önü alınarak ağın sahip olduğu enerji daha verimli kullanılabilir.

Sonuçlar detaylı olarak incelemeden önce bir noktaya değinilmesi gerekmektedir. Dengeli kullanım kısıtlaması nedeniyle bazı sensörler kendileri için en uygun olan yolları bazı değil diğer yolları kullanmak durumunda kalabilmekte ve bu da ağ ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir. Benzer şekilde sensörlerin diğer sensörlerden kabul edebilecekleri veri miktarının sınırlanması sebebiyle bazı sensörler kullanabilecekleri enerji olmasına rağmen veri iletiminde görev alamayabileceklerdir. Dolayısıyla kalan enerji açısından dengeli kullanım kısıtlamasının olumlu etkisinin olması beklenmemelidir. Diğer yandan fazladan veri kopyalama ve iletiminin sözkonusu olduğu stratejilerde düğümlerin artık enerjileri ikincil verilerin gönderilmesinde de kullanılabilirliğinden kalan enerji değerleri kopyalamanın olmadığı ve fakat dengeli kullanım yapılan stratejiye göre daha az olacaktır. Dolayısıyla TK ve DTK arasındaki farklılık dengeli kullanımın etkisini gösterirken fazladan kopyalamanın yapıldığı DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> ile DTK arasındaki fark kopyalanan veri miktarına bağlı olarak değişecektir. Örneğin DÇK'da iletilen fazladan veri miktarı daha yüksek olduğu için artakalan enerji miktarı DKK<sup>komşu</sup>'ya kıyasla daha az olacaktır.

Modeller sırasıyla incelendiğinde TK modelinin %2,6 ile en düşük DTK'nın ise %11,1 ile en yüksek kalan enerji oranına sahip olduğu görülmektedir. Yukarıda basedildiği gibi aradaki % 8,5 fark dengeli kullanım kısıtı nedeniyle bütün sensörlerin istenildiği gibi kullanılamamasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan kopyalama stratejisinin ele alındığı DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> stratejilerinde DTK'ya göre algılayıcı enerjilerinin çok daha etkin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Genel ortalamalar DÇK modeli için %4,4 ve DKK<sup>komşu</sup> modeli için %9 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla DTK'ya göre sırasıyla %6,7 ve %2,1 daha iyi oldukları söylenebilmektedir. Her iki model de dengeli kullanım yaklaşımının yanında ek olarak kopyalama işlemine de sahiptirler. Ancak, kopyalama işlemi sırasında meydana gelen ikincil akış için birincil akışta uyguladıkları gibi bir dengeli kullanım stratejisi yer almamaktadır. Bu durum özellikle DÇK için ortalamaTKE oranlarının TK'dakilere yakın olmasını sağlamıştır. Ayrıca, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> da dengeli kullanım ile birincil akış iletimi için yeterince kullanılmayan algılayıcılar ikincil akışta kullanım fırsatına sahip olmaktadır. Dolayısıyla, kopyalamanın olması DTK modelinde birincil akışa ait dengeli kullanım ile kullanılmayan enerji bu modellerde ikincil akış için kullanılarak enerjinin etkili şekilde kullanımı sağlanmaktadır. Son olarak DKK<sup>komşu</sup> modeli için 71 düğümlü ağda dört saatlik zaman sınırı içerisinde herhangi optimal bir çözüm elde edilemediğinden sonuçlar arasında gösterilmemiştir. Tablodaki sonuçların daha belirgin olması amacıyla genel ortalamalar Şekil 4.7'de grafiksel olarak ifade edilmiştir.



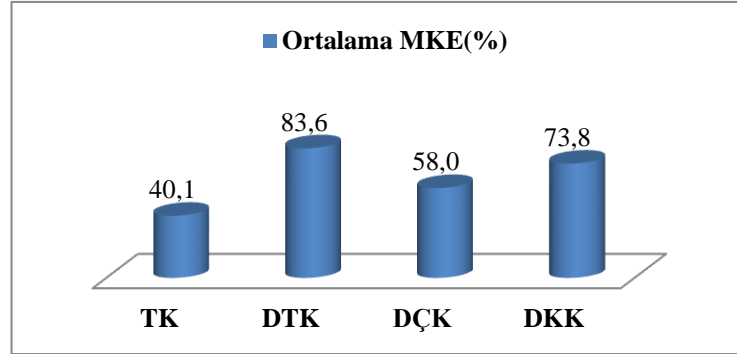
Şekil 4.7 : Modellere Ait Ortalama TKE Oranları.



Modellere ait enerjinin ne derece etkin bir şekilde kullanıldığını tespit edebilmek amacıyla incelenecek bir diğer metrik de en fazla kalan enerji miktarıdır. Önceki yapılan incelemede olduğu gibi bütün modellere ait farklı ağ büyüklükleri için oluşturulan örneklere ait en fazla kalan enerji (MKE) miktarının başlangıç enerjisine( $E_i$ ) oranı hesaplanmıştır. Ek5'te optimal sonuçlar detaylı olarak yer almaktadır. Her ağ büyüklüğü için ortalamalar Çizelge 4.9'da ve genel ortalamalar da Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : Stratejilere Ait Ortalama MKE Oranları.

Ortalama MKE(%)				
N	TK	DTK	DÇK	DKK <sup>komşu</sup>
21	52,7	77,4	72,2	83,0
31	48,9	83,0	68,1	75,5
41	39,0	82,1	63,9	79,6
51	46,0	83,3	52,5	66,8
61	27,3	84,1	46,1	63,9
71	26,7	91,9	45,2	-
<b>Ort.</b>	<b>40,1</b>	<b>83,6</b>	<b>58,0</b>	<b>73,8</b>



Şekil 4.8 : Modellere Ait Ortalama En Fazla Kalan Enerji Oranları.

TKE ve MKE birbirleriyle ilintili olduğundan sonuçlar analiz edildiğinde modeller arasında önceki duruma benzer bir sıralama olması beklenmelidir. Genel ortalamalar incelendiğinde büyük ortalama MKE oranının %83,6 ile DTK modeline ait olduğu görülmüştür. Modeller kendi aralarında kıyaslandığında ise DTK stratejisinin tüm ağ büyüklükleri için en büyük MKE oranlarına sahip olduğu ve dolayısıyla da genel ortalamasının da diğer modellerden çok daha yüksek bir değer aldığı görülmüştür.

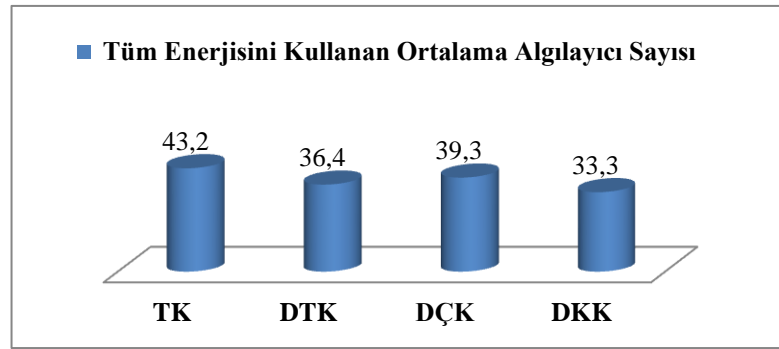
Tüm ağ büyüklükleri için DTK ile elde edilen en büyük ve en küçük MKE oranlarının sırasıyla %91,9 ve %77,4 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak DTK ve DKK<sup>komşu</sup> için hiç bir örnekte ağın enerjisinin tamamının tüketildiği durumlara rastlanılmamıştır. TK çözümlerine bakıldığında ise 31-71 düğümlü ağlarda sırasıyla 1, 3, 2, 3, 5 sayıda örnek için ağın enerjisinin tamamının harcandığı görülürken 21 düğümlü ağ için en küçük MKE oranının %16 olduğu tespit edilmiştir. Modellerin çözümleri ayrı ayrı incelendiğinde 70 ağ örneği arasında TK çözümlerinin 14'ünde, DÇK çözümlerinin ikisinde ve DKK<sup>komşu</sup> çözümlerinin ise sadece beşinde enerjinin tamamının tüketildiği tespit edilmiştir. Genel ortalama MKE oranları incelendiğinde ise TK ve DÇK'nın genelde birbirine yakın olduğu; DTK'dan sonra DKK<sup>komşu</sup>'nun en büyük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Genel bir değerlendirme yapmak gerekirse TK modeli dâhil olmak üzere birçok çözümde enerjisinin büyük çoğunluğunu kullanamayan düğümler olduğu görülmüş; ancak bu gibi çözümlere DTK ve daha sonra DKK<sup>komşu</sup> modellerinde de rastlanmıştır. Her bir modelin optimal çözümleri göz önüne alınarak enerjisinin tamamını kullanabilen algılayıcı sayısı tespit edilmiş ve stratejilerin enerji verimliliği incelenmiştir. İlgili değerler Çizelge 4.10'da belirtilmiştir.

Çizelge 4.10 : Stratejilere Ait Ortalama Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı.

<b>Tüm Enerjisini Kullanan Ortalama Algılayıcı Sayısı</b>				
<b>N</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komşu</sup></b>
21	16,3	9,4	15,1	11,8
31	27,3	19,9	23,1	21,5
41	39,1	34,9	34,0	35,4
51	47,9	42,3	41,9	41,0
61	59,2	51,0	55,3	56,6
71	69,5	61,0	66,5	-
<b>Ort.</b>	<b>43,2</b>	<b>36,4</b>	<b>39,3</b>	<b>33,3</b>

Tablo ve grafikteki sonuçlar incelendiğinde enerji kriteri açısından yapılan önceki incelemelere benzer sonuçların alındığı görülmüştür. Açıklamak gerekirse, TK modeli ağ ömrü tamamlandıktan sonra sistemde enerjisinin tamamını tüketebilen toplam algılayıcı sayısı olarak en yüksek değere sahip olmuştur. Dolayısıyla en enerji verimli yaklaşım olduğu söylenebilmektedir. Sonrasında elde edilen en iyi değer

DÇK modeline ait olduğu DTK ve DKK<sup>komşu</sup> modellerinin ise birbirlerine yakın değerler aldığı görülmüş ancak genel olarak DKK<sup>komşu</sup>, nun daha iyi sonuçlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Genel ortalama da %3,1 gibi bir farkın oluşması sonuçların optimal çözümlerden oluşmasından kaynaklanmakta dolayısıyla 71 düğümlü örnek için DKK<sup>komşu</sup>, ya ait değerler yer verilmemiştir. Olurlu çözümler açısından bakıldığında komşuda kopyalama stratejisinin sadece dengeli kopyalamanın olduğu stratejiden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durumun DKK<sup>komşu</sup> modelinde dengeli kullanımın yanı sıra merkezilik tanımının da olması ile birincil akış üzerinde sık kullanılmayan algılayıcıların ikincil akış iletimi sırasında kullanılma imkanı bulmasında bir fırsat oluşturmuştur. Şekil 4.9’da tablodaki sonuçların ortalama değerleri grafiksel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.9 : Stratejilere Ait Ortalama Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı.

Özetlemek gerekirse MKE oranları ve enerjisinin tamamını tüketen algılayıcı sayısı ile ilgili elde edilen sonuçların TKE oranlarıyla tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda DTK modelinin enerji verimliliğinin diğer modellere göre çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. En enerji verimli model olan TK modeliyle karşılaştırıldığında, DÇK modelinin her iki analizde de enerji verimliliği açısından oldukça yakın performans sergilediği gözlemlenmiştir. DKK<sup>komşu</sup> modelinin ise DTK’ya kıyasla çok daha enerji verimli çalıştığı; ancak çözümlerin çoğunda DÇK çözümlerine göre daha fazla kalan enerji bulunduğu görülmüştür.

#### 4.4 Kaynakta Kopyalama Stratejisi ile Yapılan Karşılaştırma

Şu ana kadar yapılan analizlerde DKK<sup>komşu</sup> modelinin farklı ağ güvenilirliği stratejileri ile karşılaştırmasına yer verilmiştir. Ancak kısmi kopyalama stratejisini

uygulayan bir başka çalışmayla da kıyaslama yapılmasının mevcut çalışmanın sağladığı katkının görülmesi açısından yararlı olacaktır. Bu bölümde Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da ele alınan çalışmadan kısaca bahsedip önerilen modelle arasındaki ağ ömrü, çözüm zamanı ve ağ güvenilirliği bakımından kıyaslama yapılarak sonuçlarda meydana gelen benzerlikler ve farklılıklar detaylı olarak incelenmiştir.

Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da ağ güvenilirliği ve ağ ömrü arasında etkin iletişimi sağlamaya çalışan bir yaklaşım ele alınmıştır. Önerilen modelin  $DKK^{komşu}$  modeli ile en belirgin farkı kopyalama işleminin MD ile doğrudan iletişimde olan düğüm tarafından değil de verinin üretildiği kaynak tarafından yapılıyor olmasıdır. Kopyalama sırasında düğüm-ayrık yollar üzerinden iletimin sağlanması, kopyalama işlemi için ek enerji ayrılmaması, sensörlerin dengeli kullanımının istenmesi gibi koşullar bu çalışma için de geçerlidir.

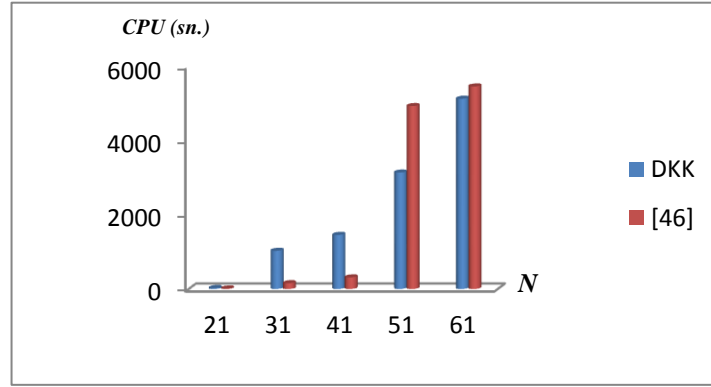
Öncelikle ağ ömrü ve çözüm süresi uzunlukları analiz edilmiştir. Tüm ağ büyüklükleri ve örnekler için elde edilen tüm sonuçlar ayrıntılı olarak Ek5'te gösterilmiştir. Çizelge 4.11'de ise farklı ağ büyüklüklerine ait rastgele örnekler için optimal sonuçlara ait sırasıyla ortalama çözüm süresi ve ağ ömrü değerlerine yer verilmiştir.

Çizelge 4.11 : 'Kaynakta Kopyalama' ve  $DKK^{komşu}$  Stratejilerine Ait Ortalama CPU Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.

$N$	$CPU_{DKK^{komşu}}$ (sn.)	$CPU_{[46]}$ (sn.)	$t_{DKK^{komşu}}$	$t_{[46]}$
21	28,1	15,6	22,1	22,1
31	1029,9	157,5	13,9	13,9
41	1458,0	312,8	15,0	15,0
51	3137,6	4934,4	13,6	13,6
61	5132,7	5464,3	15,0	15,0
<b>Ort.</b>	<b>2157,3</b>	<b>2176,9</b>	<b>15,9</b>	<b>15,9</b>

Sonuçlar detaylı incelendiğinde her iki modelin ortalama ağ ömrü değerlerinin aynı olduğu fakat özellikle 31 ve 41 düğümlü örnekler için  $DKK^{komşu}$  modelinin daha uzun zamanda çözüme ulaşabildiği görülmüştür. Ağ ömrünün aynı değerlerde çıktığı örnekler için birbirlerine alternatif çözümler geliştirdikleri görülmüştür. Bu duruma

esas sebep olarak her iki model için tüm algılayıcıların kaynak olabilme özelliği taşınması gelmektedir. Bir başka deyişle herkesin kaynak olabildiği bir ağda kopyalamanın kaynakta, MD ile doğrudan bağlantılı olan algılayıcıda veya herhangi başka bir algılayıcıda yapılması önemli bir farklılık oluşturmayacaktır. Şendil ve Altın-Kayhan [46]'nın devamında  $DKK^{komşu}$ 'nun ele alınmasındaki temel motivasyon, kopyalamanın *BS*'ye daha yakın algılayıcılarda yapılıyor olmasının fazladan veri gönderimi için kullanılan enerji miktarını azaltmasının ve dolayısıyla da ağ ömrünü iyileştirmesinin beklenmesidir. Çözüm sürelerinin farkının daha anlaşılır olması adına Şekil 4.10'da tablodaki sonuçlar grafiksel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.10 : ‘Kaynakta Kopyalama’ ve  $DKK^{komşu}$  Stratejilerine Ait Ortalama Çözüm Süreleri.

Bütün algılayıcıların aynı zamanda kaynak olabilmeleri nedeniyle iki strateji arasındaki farkın ortaya koyulamadığı düşüncesi neticesinde KAA'daki algılayıcıların veri sezebilenler ve sadece veri iletiminde görev alabilenler olarak iki gruba ayrıldığı heterojen ağ yapısı üzerinde kıyaslamalar yapılmıştır. Bu değişikliğin etkisinin daha büyük ağlar için net anlaşılacağı düşünülerek 41-71 düğümlü ağlarda testlerin yapılması uygun görülmüştür. Tüm ağdaki *BS* dışındaki algılayıcıların yarısının veri sezme ve iletme, diğer yarısının da sadece veri iletme görevi göreceği varsayılarak algılayıcılar rastgele gruplandırılmıştır. Ağ ömrü ve çözüm sürelerine ilişkin detaylı test sonuçları Ek 6'da mevcuttur. Ağ ömrü ve çözüm süresine ait optimal ve olurlu çözümlere ait ortalama değerler ise Çizelge 4.12'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.12 : Kısıtlı Kaynak Sayısına Sahip DKK<sup>komşu</sup> ve Komşuda Kopyalama Stratejilerinin Ortalama Ağ Ömrü ve Çözüm Süreleri.

<i>N</i>	DKK <sup>komşu</sup> (Kısıtlı kaynak)			[46]		
	<i>t</i>	CPU(sn.)	aralık(%)	<i>t</i>	CPU(sn.)	aralık(%)
41	32,4	429,2	0	14,6	347,7	0,0
51	27,3	533,2	0	10,6	6248,0	2,6%
61	27,8	817,4	0	10,6	9268,0	10,5%
71	20,2	5191,5	9,7	7,4	13340,0	23,3%
<b>Ort.</b>	<b>26,9</b>	<b>1742,9</b>	<b>2,4</b>	<b>10,8</b>	<b>7300,9</b>	<b>9,1</b>

Sonuçlar incelendiğinde kısıtlı sayıda algılayıcı olmasının ağ ömrünü ve çözüm süresini ciddi anlamda iyileştirebildiği görülmüştür. Kaynak sayısındaki kısıtlama sonucu Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da ele alınan modele göre ortalama ağ ömrü yaklaşık 2,5 kat arttırılırken ortalama çözüm süresi yaklaşık %76 kısaltılmıştır. Kısıtlı kaynağa sahip durumun çözüm süresindeki iyileşme özellikle MD açabildiği durumlarda ikincil verinin daha hızlı şekilde alternatif yol bulabilmesi ile açıklanabilmektedir. Tüm algılayıcıların kaynak olduğu durum için özellikle kaynaktan kopyalama gerçekleşeceği için bu seçenek daralmakta dolayısıyla daha geç sürede çözüm elde edilebilmektedir. Bu durum olurlu çözümlerde optimal sonuca yakınlığı da etkileyebilmektedir. Nitekim kısıtlı kaynağa sahip durum ortalama %2,4 ile diğer durum ise %9,1 oranında optimal sonuca yaklaşabilmiştir.

#### 4.5 Sonuçların Genel Değerlendirilmesi

Yapılan analizler sonucunda herhangi bir savunma mekanizması kullanılmayan TK'nın en uzun ortalama ağ ömrüne sahip olduğu görülürken ağ güvenilirliği yani MD'nin zarar görmesi sonucu iletilmeyen veri miktarı oranı bakımından, tam tersi bir durum söz konusu olduğu görülmüştür. Her bir algılayıcının verisinin tamamını kopyalayıp düğüm ayırık yollar üzerinden ilettiği ve dolayısıyla fazladan veri üretiminin en yoğun olduğu DÇK'nın ise diğer modellere kıyasla çok daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ancak güvenilirlik stratejilerinde bu çalışma kapsamında ele alınan iyileştirici adımlar ek enerji sarfiyatı gerektirmekte ve dolayısıyla da ağ

ömrünü kısaltmaktadır. Nitekim, DÇK için ağ ömrü değerleri TK'ya göre %56,2 daha kısa olmuştur. Sadece dengeli kullanım stratejisinin yer aldığı DTK'da ise TK'ya göre ağ ömründe %25,8 oranında bir kısalma görülürken, kaybedilen veri oranları dikkate alındığında ise ağ güvenilirliğinde %61,1 kadar iyileşme görülmüştür. Ayrıca algılayıcıların veri kaybı oranlarına bağlı olarak belirlenen sınıflandırmada ise DTK stratejisinin % 21,9 daha fazla oranda iyi durumda algılayıcıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde DKK<sup>komşu</sup>,da ise ağ üzerinde %13,7'lik veri kaybının önüne geçilmiş ancak TK'da herhangi bir güvenlik stratejisi uygulanmadığı için yoğun olarak kullanılan bir düğümün çökmesi sonucu %18'lik veri kaybı meydana gelmiştir. Ayrıca DKK<sup>komşu</sup>,da iyi durumda olan algılayıcı sayısının ise % 10,3 oranında daha fazla olduğu dolayısıyla komşuda kopyalama yaklaşımının ağ güvenilirliğine sağladığı katkı görülmüştür. Ancak ağ güvenliği için alınan tedbirler daha fazla enerji kullanılmasını da beraberinde getirdiğinden DKK<sup>komşu</sup> için ortalama ağ ömrü TK'ya oranla %25 azalmıştır.

DTK ve DKK<sup>komşu</sup>,nun veri kaybı oranları incelendiğinde veri kaybının yaşanmadığı DÇK modeline göre ağ güvenilirliklerinin daha düşük olduğu fakat ağ ömrü açısından sırasıyla %69,6 ve %91,6 daha iyi performans gösterdikleri tespit edilmiştir. DTK ve DKK<sup>komşu</sup> birbirleriyle karşılaştırıldığında ise ağ ömrü ve ağ güvenilirliği olarak birbirine en yakın oldukları görülmektedir. Ağ güvenilirliğinden bahsedildiğinde DKK<sup>komşu</sup>,nun veri kaybı oranının %58 daha az ve % 6,54 daha az iyi durumda olan algılayıcı sayısına sahip olduğu görülmüştür. DTK'nın iyi durumda olan algılayıcı sayısı daha fazla olmasına rağmen MD'nin çökertilmesi sonucu verinin kayıpsız iletimini garantileyebilecek bir stratejiye sahip değildir. Bu durum aslında ağ güvenliği açısından DKK<sup>komşu</sup>,nun daha iyi durumda olduğunu göstermektedir. Ağ ömrü açısından ise tüm örnekler için %4,3 ve sadece MD açılan örnekler baz alınarak %6,4 oranında daha iyi sonuca sahip olduğu anlaşılmıştır. Özetle, DTK'nın dengeli kullanım stratejisiyle algılayıcıda oluşan arıza sebebiyle iletilmeyen veri miktarı TK'ya göre daha az olmaktadır. Ancak DKK<sup>komşu</sup> ile arasındaki fark ağda sadece bir düğümün merkezi olarak seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak DTK modeli için MD'ye gelecek saldırı sonucu herhangi bir yedekleme yapılmadığından kurtarılamayan veri miktarını azaltmış olsa da

verinin tamamının *BS*'ye iletiminde başarılı olamamaktadır. Sonuç olarak ağ ömrü ve ağ güvenilirliği arasındaki ödünleşim ihtiyaç olduğu takdirde kullanılan tek MD ile etkili şekilde sağlanabilmektedir.

Ağ ömrüne ve ağ güvenilirliğine bağlı olarak ağ ömrü tamamlandıktan sonra sistemde kalan enerji miltarları karşılaştırılarak hangi stratejilerde enerjinin daha etkin kullanıldığına dair çıkarımların yapılması mümkün olmaktadır. Önceden de bahsedildiği gibi ağ güvenilirliği açısından alınan her önlem aslında fazladan enerji kullanımı gerektirmektedir. Enerji kriterleri için yapılan analizlerden ilki ağ üzerinde kalan toplam enerji miktarıdır. Sonuçlar incelendiğinde TK modeline göre DTK modelinde TKE oranında %8,4 artış gözlemlenmiştir. Bu artış aslında dengeli kullanım stratejisinin ağda harcanan enerji miktarına etkisini göstermektedir. Kopyalama stratejisinin ele alındığı DÇK ve DKK<sup>komşu</sup>'nın sonuçları incelendiğinde ise DTK'ya göre sırasıyla %60,4 ve %18,9 daha enerji verimli çalışmaları gözlemlenmiştir. Bu durum, dengeli kullanım nedeniyle birincil akış iletimi için fazlaca kullanılmayan algılayıcıların enerjilerinin DÇK ve DKK<sup>komşu</sup>'da ikincil akışın iletiminde kullanılabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca DKK<sup>komşu</sup> ile DTK arasındaki fark, MD'nin enerjinin etkili kullanımına katkısından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak toplam kalan enerji oranları incelendiğinde enerjinin verimli kullanımı açısından en kuvvetli ve zayıf stratejiler sırasıyla TK ve DTK'dır.

Diğer analiz ise ağda kalan toplam enerji miktarıyla ilişkili olan MKE miktarı üzerine yapılmıştır. Beklenildiği gibi bu aşamada da ortalama TKE analizindeki benzer sonuçlara ulaşılmıştır. TK, %40,1'lik ortalama MKE ile beklenildiği gibi enerjinin en verimli kullanıldığı strateji olmuştur. İkinci en iyi strateji ise TK'dan %18 daha yüksek MKE değerine sahip olan DÇK'dır. DKK<sup>komşu</sup>'da ise MKE oranı DTK stratejisine göre %23,8 daha düşüktür. Bu fark MD'nin varlığını katkısı olarak yorumlanmıştır.

Son olarak Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da önerilen kaynakta kopyalama stratejisi ile DKK<sup>komşu</sup> modeli arasında ağ ömrü ve çözüm süreleri açısından karşılaştırılmıştır.. Bütün algılayıcıların veri sezme yeteneğine sahip olduğu ağlarda her iki stratejiyle aynı ağ ömrü değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Dolayısıyla benzer bir analiz ağdaki



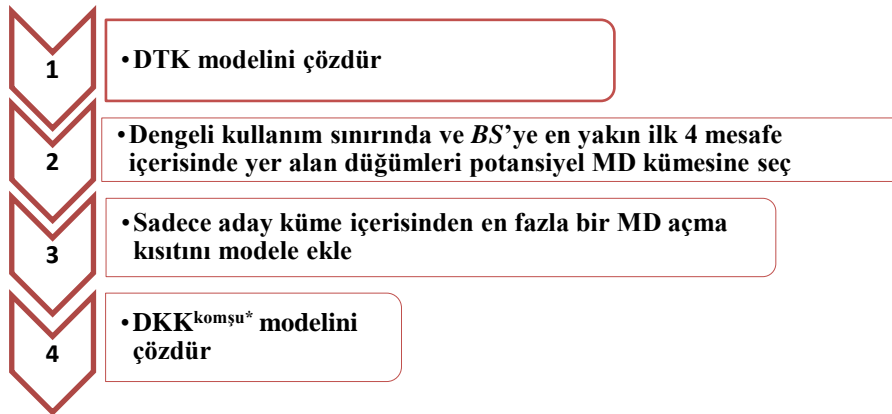
algılayıcıların yarısının veri sezme ve iletme diğer yarısının da sadece veri iletme yeteneğine sahip olduğu heterojen ağlar kullanılarak yapılmıştır. Sonuç olarak DKK<sup>komşu</sup> ile çok daha kısa sürelerde daha iyi ağ ömrü değerleri elde edilmiştir. Genel ortalamalar incelendiğinde ortalama ağ ömrü açısından DKK<sup>komşu</sup>'nin %149,1 oranında daha iyi sonuçlara %76 daha kısa sürede ulaşabildiği görülmüştür. Sonuç olarak başlangıçtaki motivasyonu destekler şekilde, kopyalamanın *BS*'ye daha yakın mesafede yapılmasının faydası gösterilmiştir.

## 5. SEZGİSEL YAKLAŞIM

Yapılan incelemeler sonucunda ağ büyüklüğü arttıkça  $DKK^{komşu}$ 'nun çözüm süresinin de arttığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmada 4 saatlik çözüm süresi limiti içerisinde en fazla 41 düğümlü ağlar için optimal sonuçlar elde edilebilmiş daha büyük ağlarda ise optimal çözümü bulmak zorlaşmış hatta 71 düğümlü örneklerin hiçbirinde optimal çözüme ulaşılamamıştır. Dolayısıyla  $DKK^{komşu}$  modelinin çözüm süresini kısaltabilmek ve optimale yakın değerleri elde edebilmek amacıyla sezgisel yaklaşım geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu bölümde sezgisel yönteme ait adımlardan detaylı olarak bahsedilecektir.

Bölüm 3.5'te ayrıntılı şekilde bahsedildiği üzere  $DKK^{komşu}$  da hangi yollardan ne kadar birincil akış gönderileceğine ve eğer ağ ömrünü iyileştirecekse hangi algılayıcının MD olarak seçileceğine karar verilmektedir. KAA'da yoğun kullanımıyla ağ ömrüne katkı sağlayabilecek bir düğüm yoksa MD seçilmemektedir.  $DKK^{komşu}$  MD kullanmadığı durumlarda DTK'ya indirgenmekte, sadece birincil akış üreten algılayıcılar dengeli kullanım kısıtları altında veri transferi yapmakta ve ağda fazladan veri üretilmemektedir. Önerilen sezgisel yöntemde de DTK ve  $DKK^{komşu}$  modelleri arasındaki bahsedilen ilişkiden yararlanılmıştır.

Geliştirilen yöntem dört temel aşamadan oluşmaktadır. Yöntemin aşamaları arasındaki hiyerarşik ilişki (yukarıdan aşağıya) Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Sezgisel Yönteme ait Aşamalar.

Buna göre ilk aşamada MD'nin olmadığı sadece dengeli kullanım stratejisine sahip olan DTK modeli çözdürülmektedir. Bir doğrusal programlama modeli olan DTK'nın optimal çözümü büyük ağlarda bile oldukça hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. İkinci aşamada çözüm içerisinde dengeli kullanım kısıtları altında en yoğun kullanılan yani üzerinden  $\alpha S_j t$  kadar veri geçen düğümler tespit edilmektedir. Bu tip düğümler yoğun kullanımdan dolayı ağ ömrüne fayda sağlayabileceği düşünülerek potansiyel merkezi düğüm kümesine eklenmiş ve böylece aday küme belirlenmiştir. Modellerin tamamında ağ ömrü en büyüklendiğinden, eğer ağ üzerinde bu potansiyele sahip bir düğüm varsa bu düğümün DTK modelinde de mümkün olan en yoğun şekilde kullanılıyor olması gerekmektedir. Nitekim Bölüm 4.4.3'te ağ güvenilirliği ile ilgili performans testleri incelendiğinde önerilen modelde MD olarak seçilen algılayıcının aslında TK ve DTK modellerinde de önemli konumda olduğu elde edilen kayıp veri oranlarından anlaşılmıştır. Dolayısıyla dengeli kullanım için belirlenen sınırdaki veri transferi yapan algılayıcıların, daha az kullanılan algılayıcılara göre ağ ömrüne sağlayacakları potansiyel katkı daha büyük olacaktır. Ayrıca algılayıcılar  $BS$ 'ye olan mesafeleri açısından azalmayan şekilde sıralandığında genel olarak modelde MD'nin  $BS$ 'ye en yakın ilk dört algılayıcı arasından seçildiği görülmüştür. Bu duruma sebebiyet veren en önemli faktör enerji gereksinimi açısından en kısa yollar üzerinden verilerin iletilmesinin istenmesidir. Sonuç olarak yoğun kullanılan algılayıcılar arasından  $BS$ 'ye en yakın ilk dört mesafedeki algılayıcılar potansiyel merkezi düğüm kümesine dâhil edilmektedir. Üçüncü aşamada potansiyel merkezi düğümler kullanılarak  $DKK^{komşu}$  modelinin tüm algılayıcılar için değil de daha az sayıdaki algılayıcılar arasından MD'ye karar vermesi sağlanmaktadır. Bu durum ikili  $h_i$  değişkenlerinin sayısını azaltmakta ve  $DKK^{komşu}$ 'nun çözümünü nispeten hızlandırmaktadır. Bu amaçla son aşamada kullanılan  $DKK^{komşu}$ 'nun MD açma kısıtı olan (3.19), potansiyel düğümler dikkate alınarak aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir:

$$\sum_{j \in C^*} h_j \leq 1 \quad (5.1)$$

$$\sum_{j \in N_0 - C^*} h_j = 0 \quad (5.2)$$

Yeni model  $DKK^{komşu^*}$  olarak isimlendirilmiştir. Burada  $C^*$ , MD olma potansiyeline sahip aday düğümlerin kümesini ifade etmektedir.  $DKK^{komşu^*}$  modelinde merkezi düğüm seçilecekse bunun ancak aday küme içerisinde bir algılayıcı olabileceğini (5.1) belirtmektedir. (5.2) ise diğer düğümlerin merkezi düğüm olamayacaklarını ifade etmektedir. Sezgisel yöntemin son aşamasında  $DKK^{komşu^*}$ 'nin çözdürülmesiyle sonuca ulaşılmaktadır.

### 5.1 Performans Testi ve Analizler

Bu bölümde sezgisel yaklaşımın performans analizini yapabilmek için 51-71 düğümlü ağlar üzerinde testler yapılmıştır. Sezgisel yöntem kullanılarak elde edilen ağ ömrü değerleri ve çözüm süreleri,  $DKK^{komşu}$  modeline ait elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan testlerin bir tanesi hariç hepsinde sezgisel yöntem ile çözüm bulunabilmiştir. Bu testlerden  $DKK^{komşu}$ 'nin 4 saat limiti içinde çözülebilmiş örneklerin hepsinde sezgisel ile çok daha kısa sürelerde optimal çözüme ulaşılabilmektedir. Diğer yandan  $DKK^{komşu}$ 'nin 4 saat içinde çözemediği durumlarda da sezgisel ile kısa sürelerde kaliteli çözümlere ulaşılabilmektedir. Çözüm sürelerini karşılaştırmak için bahsedilen her bir düğüme ait tüm örneklerin  $DKK^{komşu^*}$  ve  $DKK^{komşu}$  çözüm sürelerini içeren Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3 oluşturulmuştur. Çözüm süreleri CPU saniye cinsinden gösterilmiştir. Bu analiz için de dört saat çözüm süresi sınırlaması geçerli olmuştur.

Beklenildiği gibi ağ büyüklüğü arttıkça sezgisel yöntemin ve  $DKK^{komşu}$  modelinin çözüm sürelerinde büyük oranda artış görülmüştür. Elde edilen veriyi daha sağlıklı inceleyebilmek amacıyla öncelikle her ağ büyüklüğü için ayrı ayrı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çizelge 5.1 : 51 Dügümlü Örnek için DKK<sup>komşu</sup> Modeline ve Sezgisel Yönteme Ait Çözüm Süreleri.

Örnek (N=51)	$CPU_{DKK}^{komşu}$ (sn.)	$CPU_{DKK}^{komşu*}$ (sn.)
1	3125,8	<b>3518,3</b>
2	2616,6	1339,8
3	(t=11,9)*	1972,9 (t=11,9)
4	1922,1	1044,5
5	2805,2	1962,1
6	2765,0	1643,2
7	7820,2	2281,3
8	7,3	11,9
9	523,7	332,6
10	(t=7,4)*	2581,0 (t=7,4)
<b>Ort.</b>	<b>5038,6</b>	<b>1668,8</b>

51 düğümlü örnekler için DKK<sup>komşu</sup> ve sezgisel yöntemin çözüm süreleri karşılaştırıldığında 3 ve 10 numaralı örneklerde DKK<sup>komşu</sup> modeli dört saat zaman limitine takılmıştır. Bu örneklerde optimal çözüme sırasıyla %0,2 ve %9 uzaklıkta sonuçlar elde edilmiş ancak sezgisel yöntemin bu örneklerde çok daha kısa sürelerde aynı çözüme ulaştığı tespit edilmiştir. Sezgisel yöntemin ağ ömrü değerlerinin DKK<sup>komşu</sup> modelindeki değerlerle aynı olduğu görülmüştür. İlk örnek için DKK<sup>komşu</sup> modelinin sezgisel yönteme göre bir miktar daha kısa sürede optimal çözümü bulduğu görülmüştür. Diğer örneklerin tamamında sezgisel yöntemin çözüm süresinin çok daha kısa olduğu gözlemlenmiştir. Genel ortalamalar incelendiğinde DKK<sup>komşu</sup> modelinin ortalama çözüm süresinin 5038,6 saniye ve sezgisel yöntemin ortalama çözüm süresinin ise 1668,8 saniye olduğu görülmektedir. Sonuç olarak 51 düğümlü ağlarda sezgisel yaklaşım ile çözüm kalitesinden ödün verilmeden çözüm süresi ortalama %67 azaltılmıştır.

Çizelge 5.2 : 61 Dügümlü Örnek için DKK<sup>komşu</sup> Modeline ve Sezgisel Yönteme ait CPU Süreleri.

Örnek (N=61)	CPU <sub>DKK</sub> <sup>komşu</sup> (sn.)	CPU <sub>DKK</sub> <sup>komşu*</sup> (sn.)
1	6957,2	3899,6
2	3308,7	1712,4
3	6818,9	3076,9
4	13,1	23,2
5	12560,9	12321,4
6	(t=13,5)*	12454,1 (t=13,5)
7	(t=8,6)*	10412,4 (t=8,6)
8	10703,0	5827,6
9	(t=10,4)*	3530,9 (t=10,4)
10	3416,3	4088,2
<b>Ort.</b>	<b>8697,8</b>	<b>5734,7</b>

61 düğümlü örnekler için sonuçlara bakıldığında DKK<sup>komşu</sup> da 6,7 ve 9 numaralı örneklerde dört saatlik çözüm süresi limitine takılarak optimal çözüme sırasıyla %9,5, %35,4 ve %5,4 uzaklıkta değerler elde edilmiştir. Bu örneklerin hepsinde sezgisel yöntem ile DKK<sup>komşu</sup> da elde edilen çözüme dört saatten önce ulaşılmıştır. Sadece 10. örnek için DKK<sup>komşu</sup> modelinin sezgisel yönteme göre daha hızlı çözüldüğü görülürken diğer örneklerin tamamında sezgisel yöntemin daha hızlı çalıştığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu örnekler için sezgisel model ile yine çözüm kalitesini bozmadan çözüm süresinin ortalamada %34 kısaltıldığı görülmüştür.

Çizelge 5.3 : 71 Dügümlü Örnek için DKK<sup>komşu</sup> Modeline ve Sezgisel Yönteme Ait Ağ Ömrü Değerleri.

Örnek (N=71)	$t_{DKK}^{komşu}$ (aralık%)	$t_{DKK}^{komşu*}$
1	7,5(26,5%)	7,6*
2	9,45(0,01%)	9,5
3	0(100%)	10,7*
4	9,8(9,8%)	9,8*
5	10,9(29,5%)	11,2
6	7,1(24,8%)	7,1
7	6,5(25,4%)	6,6
8	0(100%)	5,7
9	9,4(23,9%)	9,7
10	10,0(26,8%)	10,2
<b>Ort.</b>	<b>7,1</b>	<b>8,8</b>

Çizelge 5.3'te gösterildiği gibi 71 düğümlü örneklerde DKK<sup>komşu</sup> modeli tüm örnekler için dört saat zaman limitine takılırken sezgisel yöntem ise bu örnekler arasında 1, 3 ve 4 numaralı örnekler dışındaki tüm örneklerde benzer bir durumla karşılaşmıştır. Dolayısıyla bu örnek için ağ ömrü sonuçlarının karşılaştırılması performans analizi açısından daha uygun görülmüştür. Ayrıca dört saat sonunda ticari çözücünden elde edilen aralık değerleri de parantez içinde ifade edilmiştir. Her iki yöntem için elde edilen ortalamalara bakıldığında DKK<sup>komşu</sup> modeli ortalama 14400 saniyede, sezgisel yöntemin ise 13310,74 saniyede olurlu çözüme ulaştığı görülmüştür. Ağ ömrü açısından değerlendirildiğinde ise sezgisel yöntemin yaklaşık %24 oranında daha iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Sonuçlar genel olarak incelendiğinde 30 örneğin 16'sında sezgisel yöntem DKK<sup>komşu</sup> modelinin bulduğu optimal sonuçlara ulaşmıştır. Ayrıca Cplex'in zaman limitine takıldığı fakat sezgiselin dört saatten önce çözüm verdiği 7 örnek bulunmakta ve bu örneklere ait sonuçlarda sezgisel yöntemin DKK<sup>komşu</sup> modeline oranla genel ortalama %39 kadar hızlı çalıştığı tespit edilmiştir.

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tüm algılayıcıların başlangıç enerjilerinin, veri üretim kapasitelerinin, kapsama alanlarının, bir birim verinin üretilmesi için harcadıkları enerjinin bilindiği KAA'larda ağ ömrü ve ağ güvenilirliği arasında ödünleşimin yani ağ ömrünün iyileştirilmesinin yanı sıra ağ güvenilirliğinin de dikkate alınmasını sağlamak amacıyla kısmi fazlalığa dayalı bir yol iletişim stratejisi önerilmiştir. DKK<sup>komşu</sup> olarak adlandırılan bu stratejinin optimal performansla çalışabilmesi amacıyla bir karma tam sayılı matematiksel model önerilmiştir. Bu matematiksel modelin amaç fonksiyonu ağ ömrünün en büyüklenmesi olurken güvenilirliği arttırmak adına çok yollu rotalama, algılayıcıların dengeli kullanımı ve çok kopya oluşturma teknikleri kullanılmıştır.

Çalışmanın temel motivasyonu KAA üzerindeki iletişim yollarını hem ağ ömrü en büyük olacak hem de dışarıdan gelebilecek saldırılara veya olası aksaklıklara rağmen mümkün olduğunca ağ bütünlüğünü koruyacak şekilde belirlemektir. Bu anlamda çok yollu rotalama ve sensörlerin dengeli kullanımı ile amaçlanan bir sensörün ağ bütünlüğü üzerinde belirgin etkisinin olmasının bir dereceye kadar engellenmesidir. Diğer yandan MD ile ilintili verinin fazladan kopyasının oluşturulması ile de yoğun kullanımı nedeniyle aksamaları daha muhtemel olan MD'nin fonksiyonelliğini yitirse bile veri iletimi devam ettirilebilecektir. MD seçimi veri iletim yollarının belirlenmesiyle eş zamanlı olarak yapılmaktadır. Şöyle ki her ne kadar bütün algılayıcıların dengeli bir biçimde kullanılması istense de ağ üzerinde yoğun kullanımıyla algılayıcıların veri iletim yollarını kısaltarak ağ ömrünü iyileştirecek bir düğüm varsa bu algılayıcının merkezi olarak seçilmesine izin verilmektedir. Bu çalışmada merkezilik tanımı yoğun kullanıma bağlı olarak algılayıcıların üzerlerinden iletilen akış miktarına bağlı olarak belirlenmektedir. Geliştirilen yeni protokolda en kısa yollar üzerinde bulunan MD'lerin konumları gereği sağladıkları avantajlardan faydalanılırken, bu düğümlerde çeşitli aksaklıklar meydana geldiğinde oluşabilecek büyük çaplı veri kaybı problemlerini önlemek amacıyla kısmi kopyalama stratejisi kullanılmıştır. Buna göre MD'de bir hasar oluştuğunda üzerinden geçen verinin korunması adına MD'ye doğrudan veri aktaran algılayıcıların bu veriyi kopyalayıp ikincil akış olarak başka düğüm ayırık yollardan



*BS*'ye göndermesi sağlanmaktadır. Mevcut çalışmada en fazla bir MD'nin kullanılabileceği temel durum ele alınmıştır. Modelde algılayıcılar dengeli kullanılmakta ve mutlaka merkezi bir düğüm seçilmek zorunlu kılınmamaktadır. Güvenilirliği iyileştirmek amacıyla önerilen stratejiye eklenen her kuralın etkisini daha iyi anlayabilmek adına üç yardımcı strateji de tez kapsamında ele alınmıştır. Bunlar ne dengeli kullanımın ne de çoklu kopyanın dikkate alınmadığı çoklu yollar üzerinden tek kopya veri iletilen TK stratejisi; sadece dengeli kullanım koşulunu TK'ya ekleyerek elde edilen dengeli tek kopya DTK stratejisi ve her sensörün sezdiği verinin iki kopyasını düğüm ayrık yollar üzerinden *BS*'ye göndermesi şartının DTK'ya eklenmesiyle elde edilen DÇK'dır.

Performans analizinde tüm modeller ağ ömrü değerleri, ağda kalan toplam ve en fazla enerji miktarı kriterlerine göre karşılaştırılarak stratejilerin enerji verimliliği hakkında yorumlar yapılmıştır. Ayrıca ağ güvenilirliği analizi için de MD'nin çökertilmesi durumunda ağ üzerinde iletilemeyecek veri oranı ele alınmıştır. Geliştirilen protokollerin performansları incelenirken TK modeli baz alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> stratejilerinde ağ ömrünün TK'ya kıyasla sırasıyla %25,8 %56,2 ve %21,9 oranında daha kısa olduğu görülmüştür. DÇK modelindeki fazladan kopyalamanın ağ ömrünü oldukça olumsuz etkilediği; DKK<sup>komşu</sup>'nun ise DTK'ya göre ağ ömrüne olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Ağ ömrüyle ilişkili olan TKE ve MKE değerleri incelendiğinde ise diğer modellere göre TK modelinin en düşük DTK modelinin ise en yüksek orana sahip olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla enerji verimliliği açısından TK'nın diğer stratejilere göre daha iyi, DTK'nın ise daha kötü bir yaklaşım olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç aslında dengeli kullanım stratejisinin enerji verimliliğine olumsuz olarak etkisinin birebir görüldüğü bir durumdur. Dengeli kullanım kısıtlarının yer aldığı DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> da ise sadece birincil akış için bu kısıt geçerli olup ikincil akış için dengeli kullanım durumu geçerli olmadığından bu kısıtların enerji verimliliğine olumsuz etkisi bir miktar ortadan kalkmıştır. Yani birincil akışta sıkça kullanılmayan düğümler ikincil akışta daha yoğun kullanılma fırsatını yakalamışlardır.

Ağ güvenilirliği ile ilgili yapılan analizlerde  $DKK^{komşu}$ , da MD kullanılan örnekler baz alınarak merkezi olan düğümün çökertilmesi sonucu  $BS$ 'ye iletilemeyecek veri oranları bütün alternatif stratejiler için hesaplanmıştır.  $DÇK$  ve  $DKK^{komşu}$ , da sadece MD'ye ait veri kurtarılamayacağı için ikisi için de aynı ve %2,9 oranında veri kaybı olurken kopyalama yapılmayan TK ve DTK modellerinde ise %18 ve %7 oranlarında kayıp veri olduğu tespit edilmiştir.  $DKK^{komşu}$  modelinde komşuda kopyalama stratejisinin benimsenmesiyle ortalama %13,7'lik veri kaybının önüne geçilmektedir. Ayrıca veri kaybı oranından yola çıkılarak  $DÇK$  hariç tüm modeller için algılayıcıların durumları *iyi*, *orta* ve *kötü* olarak belirlenmiştir. Tüm stratejilerin *orta* sınıfına giren algılayıcı sayısı birbirlerine çok yakın iken asıl farklılık *iyi* ve *kötü* durumları için geçerli olmuştur. TK *iyi* durumdaki en düşük sayıda algılayıcıya sahip olmuştur. DTK ve  $DKK^{komşu}$  incelendiğinde ise bu oran sırasıyla ortalama 88,6 ve 78,4 olarak belirlenmiş yani algılayıcıların dengeli kullanımının olumlu etkisi görülmüştür.

Özetlemek gerekirse TK modelinden sonra en uzun ağ ömrü değerlerine  $DKK^{komşu}$  ile ulaşılmıştır.  $DKK^{komşu}$  ve DTK'nın ağ ömrü oranları ağ büyüklüğü arttıkça birbirine yaklaşmaktadır. Bunun sebebi ağ büyüklüğü arttıkça hem  $DKK^{komşu}$  için optimal çözüm elde etmenin zorlaşması yani dört saatlik limitin sonunda elde edilen en iyi çözümün alınması hem de verinin iletiminde yeni yolların ortaya çıkması ve dolayısıyla MD'ye ihtiyacın azalması olarak belirtilebilir. Ağ ömrü açısından her iki model için de tüm olurlu çözüm ve sadece optimal çözümler için sırasıyla %3,6 ve %5,3 elde edilmiştir.  $DKK^{komşu}$ , nun %1,7 daha uzun ağ ömrüne sahip olduğu bu farkla MD kullanımının ağ ömrüne katkısı görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda  $DKK^{komşu}$  modelinde kısmi fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolünün kullanılmasıyla yoğun kullanılan MD'nin meydana getirdiği büyük veri kaybı riskleri giderilirken, ağ ömrüne sağladığı avantajlardan faydalandığı gözlenmiştir.  $DÇK$  ve  $DKK^{komşu}$  modellerinin korunan veri oranları olarak  $DÇK$ 'nin daha iyi durumda olduğu ancak ağ ömrü olarak  $DKK^{komşu}$  modelinin % 91,1 daha iyi durumda olduğu görülmüştür.

Stratejiler arasında yapılan analizlere ek olarak Şendil ve Altın-Kayhan [46]'da önerilen kaynakta kopyalamalı strateji ile  $DKK^{komşu}$  ağ ömrü ve çözüm süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Söz konusu stratejinin komşuda kopyalamadan en

önemli farkı MD'ye gelebilecek saldırı ihtimaline karşı verinin üretildiği kaynak tarafından kopyalanması şartının getirilmesi yani kopyalamanın yapıldığı yerdeki farklılıktır. Test sonuçları incelendiğinde iki stratejinin de aynı ağ ömrü değerlerine ulaştığı görülmüştür. Bu duruma kullanılan örneklerde bütün algılayıcıların hem veri sezme hem de veri iletme fonksiyonlarına sahip özdeş algılayıcılar olması sebep olmuştur. Dolayısıyla kopyalamanın yapıldığı yerlerdeki farklılık ağ ömrüne etki etmemiştir. Devamında kaynak sayısının ağ ömrüne ve güvenilirliğe etkisini incelemek amacıyla  $DKK^{komşu}$  stratejisinin kaynak sayısı  $BS$  hariç toplam algılayıcı sayısının %50'si kadar olma sınırı getirilerek bazı sensörlerin veri sezme ve iletme bazılarının ise sadece veri iletme görevlerinin olduğu heterojen ağ örnekleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Sonuç olarak kopyalama işleminin  $BS$ 'ye daha yakın mesafedeki algılayıcılar tarafından gerçekleştirilmesinin ağ ömrünü olumlu yönde etkileyeceği gösterilmiş ve  $DKK^{komşu}$  ile kaynakta kopyalama stratejisine göre yaklaşık 2,5 kat daha uzun ağ ömrü elde edilmiştir.

Modellerin performans analizlerinden sonra  $DKK^{komşu}$  modelinin daha büyük ağlarda çözüm süresinin kısaltılabilmesi için optimizasyon tabanlı sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde problem dört aşamada çözdürülmektedir. İlk aşamada MD'nin kullanılmadığı sadece dengeli kullanım stratejisine sahip DTK modeli kullanılmaktadır. Daha sonra DTK modelinin çözümlerinde dengeli kullanım sınırına dayanan, yani kısıtlar altında konumu gereği en yoğun kullanılan düğümler arasından  $BS$ 'ye en yakın ilk dört algılayıcı tespit edilmekte ve bu algılayıcılar potansiyel MD kümesine dâhil edilmektedir. Bir sonraki aşamada kullanılan  $DKK^{komşu}$  modelinin MD seçimini kolaylaştırabilmek için seçimin sadece bu potansiyel küme içerisinde yapılması sağlanmaktadır.  $DKK^{komşu}$  modeline potansiyel MD kümesi içerisinde en fazla bir MD'nin açılacağı ve geri kalan algılayıcıların MD olamayacağını ifade eden kısıtlar eklendikten sonra model çözdürülmekte ve optimal sonuca ulaşılmaktadır. Yapılan analizler sonucunda  $DKK^{komşu}$  için ticari çözücü kullanılarak zaman limiti içinde optimal çözümün elde edilebildiği örneklerle kıyaslandığında sezgisel yöntemin genel ortalama  $DKK^{komşu}$  modelinin optimal çözümüne %34 oranında daha hızlı ulaştığı görülmüştür.

Özetlemek gerekirse bu çalışmada homojen KAA'lar üzerinde ağ ömrüne fayda sağlaması koşulu ile en fazla bir tane MD kullanımına izin verildiği durum ele alınmıştır. Test sonuçları incelendiğinde MD kullanımının ağ ömrünü uzatabildiği görülmüştür. Bu çalışmanın devamı olarak gelecekte algılayıcıların enerji seviyesi, kapsama alanı gibi özelliklerinin birbirlerinden farklı olduğu heterojen ağlar incelenebilir. Saldırı senaryosu olarak tek bir düğüm yerine belirli bir bölgenin ya da aynı anda birkaç düğümün çökertilmesi varsayımı altında hedef kapsama alanının belirli bir oranın altına düşmesini engelleyecek güvenilirlik stratejisi geliştirilebilir. Ayrıca merkezilik tanımı farklılaştırılabilir. Örneğin mevcut çalışmada düğümlerin diğer düğümler tarafından kullanım oranları dikkate alınmıştır. Alternatif olarak her bir algılayıcının diğer algılayıcılar tarafından kullanım sıklığına dayalı bir tanım da tercih edilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Akkaya, K. ve Younis, M., A survey on routing protocols for wireless sensor networks, *Ad hoc networks*, **3**(3), 325-349, 2005.
- [2] Akyıldız, L.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. ve Çayırıcı, E., Wireless sensor networks: a survey, *Computer networks*, **38**(4) 393-422, 2002.
- [3] 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.
- [4] Al-Karaki, J.N. ve Kamal, A.E., Routing techniques in wireless sensor networks: a survey, *IEEE Wireless Communications*, 11(6), 6-28, 2004.
- [5] Bouabdallah, F., Bouabdallah, N., The tradeoff between maximizing the sensor network lifetime and the fastest way to reliably and event using reporting nodes' selection, *Computer Communications*, 31, 1763-1766, 2008.
- [6] Castano, F., Bourreau, E., Velasco, N., Rossi, A. ve Sevaux, M., A column generation approach to extend lifetime in wireless sensor networks with coverage and connectivity constraints, *Computer and Operation Research*, 52, 220-230, 2014.
- [7] Castano, F., Bourreau, E., Velasco, N., Rossi, A. ve Sevaux, M., Exact approaches for lifetime maximization in connectivity constrained wireless multi-role sensor networks, *European Journal of Operation Research*, 241, 28-38, 2015.
- [8] Challal, Y., Quadjaout, A., Lasla, N., Bagaa, M. ve Hadjidj, A., Secure and efficient disjoint multipath construction for fault tolerant routing in wireless sensor networks, *Journal and Network Applications*, 34, 1380-1397, 2011.
- [9] Chang, J.H.ve Tassiulas, L., Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks, *37th Annu. Allerton Conf. Communication, Control and Computing*, Monticello, IL, 1999.
- [10] Chatzigiannakis, I., Kinalis, A. ve Nikolettseas, S., Efficient data propagation strategies in wireless sensor networks using a mobile sink, *Computer Communications*, 31, 896- 914, 2008.
- [11] Cheng, Z., Perillo, M. ve Heinzelman, W.B., General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies, *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 7, 484-497, 2007.
- [12] Cristescu, R.,Beferrull-Lozano, B. veVetterli, M., On Network Correlated Data Gathering, *IEEE Infocom*, Hong Kong, 2004.
- [13] Deng, J., Han, R. ve Mishra, S., INSENS: intrusion-tolerant routing in wireless sensor networks, *Technical Report CUCS-939-02*, Department of Computer Science, University of Colorado, 2002.

- [14] Ding, W., Iyengar, S.S., Kannan, R. ve Rummmler, W., Energy equivalence routing in wireless sensor networks, *Microprocessors and Microsystems*, 28, 467-475, 2004.
- [15] Djukic, P. ve Valee, S., Minimum energy fault tolerant sensor networks, *Proceedings of IEEE Networks*, 2, 685-696, 2002.
- [16] Ettus M., System capacity, latency, and power consumption in multihop-routed SS-CDMA wireless networks, in *Proc. Radio and Wirelessn Conf. (RAWCON)*, Colorado Springs, U.S.A, 55–58,1998.
- [17] Goel, A.,Estrin, D., Simultaneous Optimization for Concave Costs: Single Sink Aggregation or Single Source Buy-and-Bulk, *ACMSIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Baltimore, U.S.A, 2003.
- [18] Gupta, S. ve Roy, K.C., Comparison of different Energy Minimization Techniques in Wireless Sensor Networks, *International Journal of Computer Applications*, 75, 20-26, 2013.
- [19] Heinzelman, W., Kulik , J.,Balakrishnan,H., Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, in *the Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference*.
- [20] Hua, C., Yum, T.S.P., Optimal Routing for Maximizing Lifetime of Wireless Sensor Networks, *Proc. of IEEE INFOCOM*, Miami, U.S.A, 2005.
- [21] İncebacak, D., Tavlı, B. ve Bıcağcı, K., Evaluating Energy Cost of Route Diversity for Security in Wireless Sensor Networks with Linear Programming, *Computer Standards and Interfaces*, 39, 44-57, 2015.
- [22] Kacimi, R., Dhaou, R. ve Beylot, A., Load balancing techniques for lifetime maximizing in wireless sensor networks, *Ad Hoc Networks*, 11, 2172-2186, 2013.
- [23] Kalpakis, K., Dasgupta, K. ve Namjoshi, P., Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks, *Computer Networks*, 42, 697- 716, 2003.
- [24] Karlof, C., Li, Y.P. ve Polastre, J., ARRIVE: Algorithm for robust routing in volatile environments, *Technical report UCB/CSD-03-1233 University of California*, 2003.
- [25] Lee, S. ve Choi, Y., ARMS: an authenticated routing message in sensor networks, *Secure Mobile Ad-hoc Networks and Sensors Workshops (MADNES'05)*, Lecture notes in Computer Science, Springer, 2005.
- [26] Lee, S. ve Choi, Y., A secure alternate path routing in sensor networks, *Computer Communications*, Elsevier 30 (1), 153-165, 2006.
- [27] Lee, S. ve Choi, Y., A resilient packet forwarding scheme against maliciously packet-dropping nodes in sensor networks, in: *Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Security of Ad hoc and Sensor Networks (SASN'06)*, 59-70, 2006.

- [28] Lee, J.H., Moon, I., Modeling and optimization of energy efficient routing in wireless sensor networks, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 2280-2289, 2014.
- [29] Liu, C.M., Lee, C.H., Wang, L.C., Distributed clustering algorithms for data-gathering in wireless mobile sensor networks, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 67, 1187-1200, 2007.
- [30] Madan, R., Lall, S., Distributed Algorithms for Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks, *Global Telecommunications Conference GLOBECOM, IEEE*, Dallas, Texas, U.S.A, 2004.
- [31] Marta, M. ve Cardei, M., Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks, *Pervasive and Mobile Computing*, 5, 542-555, 2009.
- [32] Modupe, A.I., Olugbara, O.O. ve Modupe A., Minimizing Energy Consumption in Wireless Ad hoc Networks with Meta heuristics, The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013), *Procedia Computer Science*, 19, 106-115, 2013.
- [33] Montemanni ,R., Maximum Lifetime Broadcasting Topologies in Wireless Sensor Networks: Advanced Mathematical Programming Models, *Wireless Sensor Network*, 2, 924-935, doi:10.4236/wsn.2010.212111 Published Online December 2010 (<http://www.scirp.org/journal/wsn>).
- [34] Nasser, N. ve Chen, Y., SEEM: Secure and energy-efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks, *Computer Communications*, 30(11), 2401-2412, 2007.
- [35] Paradis, L. ve Han, Q., A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks, *Journal of Network and System Management*, 2007.
- [36] Park S.,Srivastava M., Power aware routing in sensor networks using dynamic source routing, *ACM MONET Special Issue on Energy Conserving Protocols in Wireless Networks*, 1999.
- [37] R. Shah and J. Rabaey, Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks, *in the Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, Florida, U.S.A, 2002.
- [38] Ramadan, R., Abdelghany, K., El-Rewini, H., On the Optimal Deployment of Heterogeneous Sensing Devices, *4th ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA-06)*, Dubai, Sharjah,UAE, 898-905, 2006.
- [39] Sadagopan, N., Krishnamachari, B., Maximizing Data Extraction in Energy-Limited Sensor Networks, *IEEE Infocom, Hong Kong, Mart 2004. on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, Seattle, WA,U.S.A, 1999.
- [40] Sankar, A., Liu, Z., Maximum Lifetime Routing In Wireless Ad-Hoc Networks, *IEEE Conference on Computer Communications , Infocom*, Hong Kong, China, 2004.

- [41] Schumacher, A., Orponen, P., Thaler, T. ve Hanpaa, H., Lifetime Maximization in Wireless Sensor Networks by Distributed Binary Search, *Lab. for Theoretical Computer Science*, TKK – Helsinki University of Technology.
- [42] Sha, K., Shi, W., Modeling the Lifetime of Wireless Sensor Networks, *Technical Report MIST-TR-2004-011*, Wayne State University, 2004.
- [43] Shepard T., A channel access scheme for large dense packet radio networks, *in Proc. ACM SIGCOMM*, Stanford, CA, U.S.A, 219–230, 1996.
- [44] Singh S.,Woo M.,Raghavendra C., Power-aware routing in mobile ad hoc networks, *in Proc. 4th Annual ACM/IEEE Int. Conf. Mobile Computing Networking*, 1998.
- [45] Stavrou, E. ve Pitsillides, A., A survey on secure multipath routing protocols in WSNs, *Computer Networks*, 54, 2215-2238, 2010.
- [46] Şendil, M. ve Altın-Kayhan, A., Optimal Path Selection under Different Data Redundancy Policies for Energy Efficient Wireless Sensor Networks,*yükseklisans tezi (gönderildi)*, 2015.
- [47] Quadjaout, A., Challal, Y., Lasla, N. ve Bagaa, M., SEIF: secure and efficient intrusion fault tolerant routing protocol for wireless sensor networks, *Proceedings of the Third International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES)*, 503-508, 2008.
- [48] Tavli, B., Kayaalp M., Ceylan, O., Bağcı, İ.E., Data processing and communication strategies for lifetime optimization in wireless sensor networks, *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, 64, 992–998, 2010
- [49] Yılmaz, O., Demirci, S., Kaymak, Y., Ergun, S. ve Yıldırım, A., Shortest hop multipath algorithm for wireless sensor networks, *Computers and Mathematics with Applications*, 63, 48-59, 2012.
- [50] Younis, M., Şentürk, I. F., Akkaya, K., Lee, S. ve Şenel, F., Topology Management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey, *Computer Networks*, 58, 254 – 283, 2014.
- [51] Youssef M.,Younis M.,Arisha K., A Constrained Shortest-Path Energy-aware Routing for Wireless Sensor Networks, *Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, Florida, U.S.A, 2002.
- [52] Zussman, G., Segal, A., Energy efficient routing in ad hoc disaster recovery networks, *Ad Hoc Networks*, 1, 405-421, 2005.



## EKLER

EK 1: Ağ Büyüklüklerine ait Ağ Ömrü Değerleri

EK 2: TK ve DTK Modellerine ait Veri Kaybı Yüzdesi

EK 3: TK ve DTK Modelleri için İyi-Orta-Kötü Durumdaki Algılayıcı Sayısı

EK 4: Tüm Modeller için Ağdaki Toplam Kalan Enerji Miktarı

EK 5: Tüm Modeller için Ağdaki Maksimum/Minimum Enerji Miktarı

EK6: DKK<sup>komşu</sup> ve Kaynakta Kopyalama Stratejilerine ait Ağ Ömrü ve CPU Süreleri

**EK 1**

<b>N=21</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komsu</sup></b>
1	25,11	16,12	11,97	19,11
2	23,33	17,12	0	17,12
3	35,57	24,67	18	28,33
4	29,15	14,01	11,52	18,3
5	29,54	22,9	14,14	24,88
6	21,68	15,47	10,53	17,02
7	32,13	23,23	0	24,1
8	31,72	27,02	15,1	27,02
9	21,98	14,05	10,61	17,45
10	35,86	19,14	15,83	25,82
<b>Ort.</b>	<b>28,6</b>	<b>19,4</b>	<b>10,8</b>	<b>21,9</b>

Çizelge Ek.1: 21 Dügümlü Örnek için Ağ Ömrü Değerleri.

<b>N=31</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komsu</sup></b>
1	24,89	16,08	10,77	17,31
2	24,87	16,65	10,51	16,65
3	21,18	14,74	8,88	14,74
4	23,77	17,29	11,44	17,8
5	27,51	21,44	12,65	21,44
6	26,24	21,86	12,82	21,99
7	6,49	5,69	3,26	5,88
8	16,64	7,87	6,67	11,02
9	11,85	7,58	4,97	9,99
10	9,45	5,59	4,1	6,49
<b>Ort.</b>	<b>19,3</b>	<b>13,5</b>	<b>8,6</b>	<b>14,3</b>

Çizelge Ek.1: 31 Dügümlü Örnek için Ağ Ömrü Değerleri.

<b>N=41</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komsu</sup></b>
1	15,28	11,04	6,76	11,64
2	17,19	14,04	8,36	14,26
3	20,95	20,95	10,4	20,95
4	16,64	15,41	8,13	15,41
5	17,19	14,04	8,36	14,26
6	22,04	20,7	10,82	20,7
7	13,3	11,02	6,63	11,04
8	14,81	11,88	6,89	11,88
9	20,2	14,97	9,54	14,97
10	13,86	10,82	6,4	10,82
<b>Ort.</b>	<b>17,1</b>	<b>14,5</b>	<b>8,2</b>	<b>14,6</b>

Çizelge Ek.1: 41 Dügümlü Örnek için Ağ Ömrü Değerleri.

<b>N=51</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komsu</sup></b>
1	12,7	8,89	5,56	8,89
2	20,14	14,61	8,91	14,61
3	14,34	11,87	6,57	11,87*
4	18,48	13,91	8,36	13,91
5	19,81	10,93	7,71	11,54
6	13,69	11,56	6,72	11,8
7	13,96	9,64	6,29	9,69
9	16,32	16,24	8,14	16,24
10	12,46	7,32	5,1	7,35
<b>Ort.</b>	<b>14,2</b>	<b>10,5</b>	<b>6,3</b>	<b>10,6</b>

Çizelge Ek.1: 51 Dügümlü Örnek için Ağ Ömrü Değerleri.

---

**Dipnot:** (\*) ile gösterilenler optimal olarak elde edilemeyen olurlu çözümlerdir.

<b>N=61</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komsu</sup></b>
1	15,92	11,83	7,69	11,83
2	23,62	18,25	11,09	18,25
3	14,96	10,88	6,78	10,88
5	18,08	12,85	8,05	12,95
6	17,54	13,5	8	13,52*
7	16,14	8,32	5,79	8,68*
8	11,31	9,17	5,61	9,19
9	14,27	10,23	6,51	10,42*
10	12,68	10,31	6,29	10,64
<b>Ort.</b>	<b>14,5</b>	<b>10,5</b>	<b>6,6</b>	<b>10,6</b>

Çizelge Ek.1: 61 Dügümlü Örnek için Ağ Ömrü Değerleri.

<b>N=71</b>	<b>TK</b>	<b>DTK</b>	<b>DÇK</b>	<b>DKK<sup>komsu</sup></b>
1	11,32	7,59	5,49	7,48*
2	11,42	9,11	5,7	9,49*
3	13,51	10,21	6,7	0
4	14,5	9,69	7,04	9,82*
5	16,32	11,07	0	10,89*
6	10,79	7,09	0	7,09*
7	9,6	6,63	4,58	6,53*
8	9,45	5,69	4,29	0
9	13,71	9,39	6,1	9,35*
10	13,94	9,96	6,88	9,99
<b>Ort.</b>	<b>12,5</b>	<b>8,6</b>	<b>4,7</b>	<b>7,1</b>

Çizelge Ek.1: 71 Dügümlü Örnek için Ağ Ömrü Değerleri.

## EK 2

<b>N=21</b>	<b>TK(%)</b>	<b>DTK(%)</b>
1	24,5	7,8
2	28,7	7,9
3	11,7	7,9
4	23,8	8
5	13,7	7,9
6	17,3	8
7	7,7	7,9
9	19,1	7,9
10	30,4	8
<b>Ort.</b>	<b>7,92</b>	<b>19,66</b>

Çizelge Ek.2: 21 Dügümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı Oranı.

<b>N=31</b>	<b>TK(%)</b>	<b>DTK(%)</b>
1	14,8	7,8
3	9,3	7,8
4	35,4	7,8
6	29,5	7,8
7	8	8
8	21,6	8
9	6	2
10	54	8
<b>Ort.</b>	<b>22,33</b>	<b>7,15</b>

Çizelge Ek.2: 31 Dügümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı Oranı.

<b>N=41</b>	<b>TK(%)</b>	<b>DTK(%)</b>
2	23,6	7,7
3	30,5	7,7
5	23,6	7,7
7	31,9	7,7
8	7,7	7,7
10	23,7	7,7
<b>Ort.</b>	<b>23,5</b>	<b>7,7</b>

Çizelge Ek.2: 41 Düğümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı Oranı.

<b>N=51</b>	<b>TK(%)</b>	<b>DTK(%)</b>
2	6,4	6,1
3	17	4,1
5	19,7	6,1
6	6,7	6,1
7	15	6
10	50	1
<b>Ort.</b>	<b>19,13</b>	<b>4,9</b>

Çizelge Ek.2: 51 Düğümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı Oranı.

<b>N=61</b>	<b>TK(%)</b>	<b>DTK(%)</b>
2	17,1	5,1
3	7,1	5,1
5	9,2	5,1
6	7,2	5,1
7	30,5	5
8	14,8	5
9	29,5	5,1
10	12,2	5,1
<b>Ort.</b>	<b>15,95</b>	<b>5,08</b>

Çizelge Ek.2: 61 Düşümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı Oranı.

**EK 3**

<b>N=21</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>
<b>Örnek</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>
<b>1</b>	18	1	0	10	0	9
<b>2</b>	16	0	3	10	1	8
<b>3</b>	17	0	2	15	2	2
<b>4</b>	16	2	1	12	0	7
<b>5</b>	16	1	2	14	2	3
<b>6</b>	16	2	1	13	0	6
<b>7</b>	16	1	2	16	1	2
<b>9</b>	18	0	1	12	1	6
<b>10</b>	16	3	0	8	2	9
<b>Ort.</b>	<b>16,6</b>	<b>1,1</b>	<b>1,3</b>	<b>12,2</b>	<b>1,0</b>	<b>5,8</b>

Çizelge Ek.3: 21 Düğümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı.

<b>N=31</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>
<b>Örnek</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>
<b>1</b>	26	1	2	24	2	3
<b>3</b>	27	0	2	25	1	3
<b>4</b>	27	1	1	17	0	12
<b>6</b>	28	0	1	18	2	9
<b>7</b>	26	0	3	26	1	2
<b>8</b>	25	1	3	21	1	7
<b>9</b>	28	0	1	27	0	2
<b>10</b>	26	1	2	13	1	15
<b>Ort.</b>	<b>25,4</b>	<b>0,8</b>	<b>1,7</b>	<b>19,9</b>	<b>1,1</b>	<b>6,9</b>

Çizelge Ek.3: 31 Düğümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı.



<b>N=41</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>
<b>Örnek</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>
<b>2</b>	35	2	2	28	1	10
<b>3</b>	34	4	1	23	1	15
<b>5</b>	35	2	2	28	1	10
<b>7</b>	35	0	4	21	5	13
<b>8</b>	36	0	3	35	1	3
<b>10</b>	35	2	2	28	2	9
<b>Ort.</b>	<b>33,7</b>	<b>1,6</b>	<b>2,3</b>	<b>26,7</b>	<b>1,9</b>	<b>9,0</b>

Çizelge Ek.3: 41 Dügümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı.

<b>N=51</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>
<b>Örnek</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>
<b>2</b>	46	0	3	44	1	4
<b>3</b>	46	0	3	40	1	8
<b>5</b>	45	0	4	39	1	9
<b>6</b>	44	2	3	45	1	3
<b>7</b>	46	0	3	40	1	8
<b>10</b>	49	0	0	21	3	25
<b>Ort.</b>	<b>46</b>	<b>0,3</b>	<b>2,7</b>	<b>38,2</b>	<b>1,3</b>	<b>9,5</b>

Çizelge Ek.3 :51 Dügümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı.

<b>61</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>	<b>&lt;%30</b>	<b>[%30-%50)</b>	<b>&gt;=%50</b>
<b>Örnek</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>	<b>İyi</b>	<b>Orta</b>	<b>Kötü</b>
<b>2</b>	55	1	3	48	2	9
<b>3</b>	56	0	3	53	2	4
<b>5</b>	54	3	2	52	1	6
<b>6</b>	55	2	2	53	3	3
<b>7</b>	54	2	3	40	0	19
<b>8</b>	55	2	2	48	4	7
<b>9</b>	55	0	4	41	0	18
<b>10</b>	56	0	3	48	3	8
<b>Ort.</b>	<b>55</b>	<b>1,25</b>	<b>2,75</b>	<b>47,9</b>	<b>1,9</b>	<b>9,3</b>

Çizelge Ek.3 :61 Dügümlü Örnekte TK ve DTK Modelleri için MD Üzerinden Geçen Veri Miktarı.

**EK 4**

N=21	TK			DTK			DÇK			DKK		
	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı
<b>1</b>	98,7	25,9	19	81,7	83,7	12	94,1	65,2	17	95,6	62,6	23
<b>2</b>	59,9	89,1	6	45,2	91,7	1	98,8	43,6	56	95,6	91,8	28
<b>3</b>	97,5	27,7	18	91,8	39,5	13	90,8	57,9	13	97,7	21,4	25
<b>4</b>	95,8	46,7	18	73,4	89,3	10	91,1	77,2	16	98,1	56,7	29
<b>5</b>	92,2	66,8	16	80,5	92,7	11	89,7	84,4	14	90,3	76,1	23
<b>6</b>	98,3	33,6	19	85,6	75,2	11	93	78,1	16	97,5	76,1	28
<b>7</b>	90,8	70,3	16	78,3	72,7	8				93	54,3	20
<b>8</b>	91,7	81,1	17	89,7	77,4	15	92,5	77,6	17	93,6	80,5	18
<b>9</b>	91,6	70,1	16	60	88,8	1	87,2	87,4	11	80	77,1	18
<b>10</b>	98,7	16	18	85,4	63,3	12	94,9	49,7	17	88,2	84,1	19
<b>Ort.</b>	<b>91,5</b>	<b>52,7</b>	<b>16,3</b>	<b>77,2</b>	<b>77,4</b>	<b>9,4</b>	91,6	72,2	15,1	<b>93</b>	<b>68,1</b>	<b>23,1</b>

Çizelge Ek.4 :21 Dügümlü Örnek için TK, DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> Modellerine Ait Enerji Kriteri Üzerine İstatistikler.

N=31	TK			DTK			DÇK			DKK		
	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı
1	96,4	86,2	28	86,4	81,4	22	95,6	62,6	23	97,6	71,5	29
2	98,8	35,8	28	88,8	92,6	23	95,6	91,8	28	86,6	95,3	21
3	100	0	30	95,4	75,4	24	97,7	21,4	25	97,3	31,2	22
4	99,1	28	29	92,9	74,2	24	98,1	56,7	29	95,6	74,8	26
5	92,8	55	25	80,8	85,1	17	90,3	76,1	23	80,4	75,4	17
6	97,4	57,7	28	91,1	85,1	24	97,5	76,1	28	91,1	73,1	25
7	89,4	82,1	25	88,6	73,8	19	93	54,3	20	80	91,5	15
8	98,6	34,7	28	72	89,1	13	93,6	80,5	18	95,9	87,7	27
9	97,1	60,4	27	76,3	80,8	17	80	77,1	18	82,1	68,4	17
10	95,2	49,6	25	76,5	92,6	16	88,2	84,1	19	80,1	85,9	16
<b>Ort.</b>	<b>96,5</b>	<b>48,9</b>	<b>27,3</b>	<b>84,9</b>	<b>83</b>	<b>19,9</b>	93	68,1	23,1	<b>88,7</b>	<b>75,5</b>	<b>21,5</b>

Çizelge Ek.4 :31 Dügümlü Örnek için TK, DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> Modellerine Ait Enerji Kriteri Üzerine İstatistikler.

N=41	TK			DTK			DÇK			DKK		
	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı
1	98	79,6	39	90,2	90,7	34	92,5	95,4	35	90	95,8	33
2	100	0	40	95,5	84,9	36	99	41,2	39	98	81,3	39
3	99,8	7,7	39	94	48,1	32	86,4	45,5	11	98,8	28,6	36
4	97,4	65,7	38	95,5	86,6	37	97,3	70,3	38	94,8	89,4	36
5	100	0	40	95,5	84,9	36	99	41,2	39	98	81,3	39
6	97,8	84,9	38	95,5	96,8	37	96,1	92,2	33	93,1	96,8	30
7	97,5	98,8	39	94,7	95,8	36	97,5	98,8	39	96,8	97,8	37
8	99,4	24,4	39	89,2	82	30	91,5	93,7	32	93,9	58,6	35
9	100	0	40	94,8	74,3	36	99,2	31,4	39	96,7	74,3	36
10	99,3	29,3	39	94,4	77,3	35	98,9	29,6	35	92,2	92	33
<b>Ort.</b>	<b>98,9</b>	<b>39</b>	<b>39,1</b>	<b>93,9</b>	<b>82,1</b>	<b>34,9</b>	<b>95,7</b>	<b>63,9</b>	<b>34</b>	<b>95,2</b>	<b>79,6</b>	<b>35,4</b>

Çizelge Ek.4 :41 Düşümlü Örnek için TK, DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> Modellerine Ait Enerji Kriteri Üzerine İstatistikler.

N=51	TK			DTK			DÇK			DKK		
	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı
1	98,2	65,1	48	89,5	97,1	42	97,8	50,8	44	87,9	96,9	35
2	99,1	43	49	92,9	85,1	44	97,7	29,8	44	95,9	73,5	44
3	92,5	76,6	40	82,9	91,4	34	90,1	39,8	20	82,2	76,3	24
4	100	0	50	96,5	91,3	46	99,1	45,2	49	96,5	91,3	45
5	98,5	73,1	49	90,8	97,7	42	96,7	92,5	45	99	27,5	47
6	99,3	36,9	49	95,1	74,2	44	98,2	46,8	47	96,3	50,8	46
7	100	0	50	88,7	80	41	97,2	33,1	44	94	50,8	43
8												
9	41,8	48	40	98,6	36	45	94,1	48,2	39	98,3	37,8	42
10	77,6	48	39	90	96,5	43	95,1	86	45	91,7	96,5	43
<b>Ort.</b>	<b>46</b>	<b>47,9</b>	<b>39,1</b>	<b>91,7</b>	<b>83,3</b>	<b>42,3</b>	<b>96,2</b>	<b>52,5</b>	<b>41,9</b>	<b>93,5</b>	<b>66,8</b>	<b>41</b>

Çizelge Ek.4 :51 Dügümlü Örnek için TK, DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> Modellerine Ait Enerji Kriteri Üzerine İstatistikler.

N=61	TK			DTK			DÇK			DKK		
	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algilayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algilayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algilayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algilayıcı Sayısı
1	99,7	20,3	59	97,2	87,1	57	99,6	23,2	59	96,4	68,6	54
2	100	0	60	93,8	87,3	51	98,8	43,6	56	97,2	48,4	54
3	99,1	38,8	58	90,7	84,6	50	97,1	49,7	54	90,8	89,9	47
4										95,1	89,9	52
5	100	0	60	91,9	70,9	47	97,5	37,7	51			
6	99,6	25	59	92,9	94,6	50	97,9	59,4	53			
7	99,9	8,4	59	88,4	94,9	49	96,7	46,1	52			
8	99	58,4	59	95,1	79,2	52	98,8	69,7	59	99,6	22,9	59
9	98,4	94,8	59	92,2	98,2	49	98,1	85,5	54			
10	100	0	60	96,2	60,3	54	100	0	60	95,8	63,9	53,2
<b>Ort.</b>	<b>99,5</b>	<b>27,3</b>	<b>59,2</b>	<b>93,2</b>	<b>84,1</b>	<b>51</b>	<b>98,3</b>	<b>46,1</b>	<b>55,3</b>	<b>96,4</b>	<b>68,6</b>	<b>54</b>

Çizelge Ek.4 :61 Dügümlü Örnek için TK, DTK, DÇK ve DKK<sup>komşu</sup> Modellerine Ait Enerji Kriteri Üzerine İstatistikler.

N=71	TK			DTK			DÇK		
	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı	TKE(%)	MKE(%)	Tüm Enerjisini Kullanan Algılayıcı Sayısı
<b>1</b>	99,4	42,1	69	92,6	95,2	61	98,4	49,5	65
<b>2</b>	100	0	70	96,5	71,7	65	100	0	70
<b>3</b>	99	66,7	69	95,1	95,6	63	98,9	76,9	69
<b>4</b>	100	0	70	93,2	85,8	60	99,4	17,5	65
<b>5</b>	99,1	60,6	69	91	96,5	56	99,4	18,5	65
<b>6</b>	99,5	35,5	69	93,9	98,3	65	98	77	67
<b>7</b>	99,1	61,6	69	91,9	94,5	61	97,9	42,2	61
<b>8</b>	100	0	70	89,3	90,9	59	98,2	26,1	61
<b>9</b>	100	0	70	93,6	97,1	61	97,4	56,8	62
<b>10</b>	100	0	70	91,8	93,5	59	97,2	87,7	66
<b>Ort.</b>	<b>99,6</b>	<b>26,7</b>	<b>69,5</b>	<b>92,9</b>	<b>91,9</b>	<b>61</b>	<b>98,5</b>	<b>45,2</b>	<b>65,1</b>

Çizelge Ek.4 :21 Dügümlü Örnek için TK, DTK ve DÇK Modellerine Ait Enerji Kriteri Üzerine İstatistikler.

**EK 5**

$N=21$	$CPU_{DKK}^{komşu}$	$CPU_{[46]}$	$t_{DKK}^{komşu}$	$t_{[46]}$
1	17,41	17,11	19,11	18,23
2	3,84	2,54	17,12	17,12
3	18	12,92	28,33	28,33
4	27,11	20,25	18,3	18,29
5	13,09	13,17	24,88	25,36
6	45,82	18,11	17,02	17,06
7	4,71	2,79	24,1	24,1
8	11,08	8,8	27,02	27,02
9	14,93	10,8	17,45	17,46
10	77,52	23,43	15,82	25,19
<b>Ort.</b>	<b>23,4</b>	<b>12,9</b>	<b>21</b>	<b>21,8</b>

Çizelge Ek.5: 21 Döğümlü Örnekte DKK<sup>komşu</sup> ve Kaynakta Kopyalama Stratejilerine Ait Çözüm Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.

$N=31$	$CPU_{DKK}^{komşu}$	$CPU_{[46]}$	$t_{DKK}^{komşu}$	$t_{[46]}$ (%aralık)
1	5358,59	<b>14400</b>	17,31	16,5(% <b>0,02</b> )
2	1019,26	106,47	16,65	16,65
3	2082,52	109,01	14,74	14,74
4	91,28	103,24	17,8	17,67
5	83,17	113,44	21,44	21,44
6	143,66	26,41	21,99	21,86
7	160,49	478,74	5,88	5,88
8	218,36	252,22	11,02	11,33
9	48,19	142,32	9,99	9,28
10	154,68	62	6,49	6,58
<b>Ort.</b>	<b>936,02</b>	<b>1579,4</b>	<b>14,3</b>	<b>14,2(%<b>0,02</b>)</b>

Çizelge Ek.5: 31 Döğümlü Örnekte DKK<sup>komşu</sup> ve Kaynakta Kopyalama Stratejilerine Ait Çözüm Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.



$N=41$	$CPU_{DKK}^{komşu}$	$CPU_{[46]}$	$t_{DKK}^{komşu}(\%aralık)$	$t_{[46]}$
1	546,21	295,25	11,64	11,64
2	1321,59	463,23	14,26	14,24
3	2771,01	55,18	20,95	20,95
4	206,36	231,69	15,41	15,41
5	1333,92	468,75	14,26	14,24
6	280,44	273,89	20,7	20,7
7	573,29	141,42	11,04	11,02
8	5561,05	853,78	11,88	11,88
9	523,82	240,12	14,97	14,97
10	<b>14400</b>	453,67	10,82( <b>%0,91</b> )	10,82
<b>Ort.</b>	<b>2751,8</b>	<b>347,7</b>	<b>14,6(%0,91)</b>	<b>14,6</b>

Çizelge Ek.6: 41 Dügümlü Örnekte DKK<sup>komşu</sup> ve Kaynakta Kopyalama Stratejilerine Ait Çözüm Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.

$N=51$	$CPU_{DKK}^{komşu}$	$CPU_{[46]}$	$t_{DKK}^{komşu}(\%aralık)$	$t_{[46]}$
1	3125,79	<b>14400</b>	8,89	8,89( <b>%7,8</b> )
2	2616,59	1195,25	14,61	14,61
3	<b>14000</b>	6728,95	11,87( <b>%0,17</b> )	11,87
4	1922,07	2489,39	13,91	13,91
5	2805,21	<b>14400</b>	11,4	11,4( <b>%0,02</b> )
6	2764,98	1515,44	11,8	11,8
7	7820,00	12742,74	9,69	9,73
8	7,33	5,52	0	0
9	523,74	364,37	16,24	16,24
10	<b>14400</b>	8638,2	7,35( <b>%8,95</b> )	7,32
<b>Ort.</b>	<b>4998,6</b>	<b>6248,0</b>	<b>10,6(%4,56)</b>	<b>10,6(%2,61)</b>

Çizelge Ek.5: 51 Dügümlü Örnekte DKK<sup>komşu</sup> ve Kaynakta Kopyalama Stratejilerine Ait Çözüm Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.

$N=61$	$CPU_{DKK}^{komşu}$	$CPU_{[46]}$	$t_{DKK}^{komşu}(\%aralık)$	$t_{[46]}(\%aralık)$
1	6957,19	6790,68	11,83	11,83
2	3308,69	4137,91	18,25	18,26
3	6818,91	<b>14400</b>	10,88	10,88( <b>%0,02</b> )
4	13,07	0	0	0
5	12560,86	<b>14400</b>	12,95	12,85( <b>%8,39</b> )
6	<b>14400</b>	<b>14400</b>	13,52( <b>%9,5</b> )	13,52( <b>%0,75</b> )
7	<b>14400</b>	<b>14400</b>	8,68( <b>%35,37</b> )	8,53( <b>%33,32</b> )
8	10702,95	4033,45	9,19	9,17
9	<b>14400</b>	<b>14400</b>	10,42( <b>%5,38</b> )	10,28( <b>%10,22</b> )
10	3416,25	5717,81	10,64	10,57
<b>Ort.</b>	<b>8697,8</b>	<b>9268,0</b>	<b>10,6(%16,75)</b>	<b>10,6(%10,54)</b>

Çizelge Ek.5: 61 Dügümlü Örnekte DKK<sup>komşu</sup> ve Kaynakta Kopyalama Stratejilerine Ait Çözüm Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.

$N=71$	$CPU_{DKK}^{komşu}$	$CPU_{[46]}$	$t_{DKK}^{komşu}(\%aralık)$	$t_{[46]}(\%aralık)$
1	<b>14400</b>	<b>14400</b>	7,48( <b>%26,47</b> )	0
2	<b>14400</b>	5465,93	9,49( <b>%0,01</b> )	9,46
3	<b>14400</b>	<b>14400</b>	0( <b>%100</b> )	10,61( <b>%0,14</b> )
4	<b>14400</b>	<b>14400</b>	9,82( <b>%9,8</b> )	9,72( <b>%13,4</b> )
5	<b>14400</b>	<b>14400</b>	10,89( <b>%29,47</b> )	11,07( <b>%26,14</b> )
6	<b>14400</b>	12734,14	7,09( <b>%24,83</b> )	7,09
7	<b>14400</b>	<b>14400</b>	6,53( <b>%25,4</b> )	6,58( <b>%21,09</b> )
8	<b>14400</b>	<b>14400</b>	0( <b>%100</b> )	0( <b>%100</b> )
9	<b>14400</b>	<b>14400</b>	9,35( <b>%23,85</b> )	9,41( <b>%23,36</b> )
10	<b>14400</b>	<b>14400</b>	9,99( <b>%26,02</b> )	9,95( <b>%25,86</b> )
<b>ORT.</b>	<b>14400</b>	<b>13340,0</b>	<b>7,1(%36,6)</b>	<b>7,4(%23,3)</b>

Çizelge Ek.5: 71 Dügümlü Örnekte DKK<sup>komşu</sup> ve Kaynakta Kopyalama Stratejilerine Ait Çözüm Süreleri ve Ağ Ömrü Değerleri.

**EK 6**

<i>N=41</i>	<i>t</i>	<i>CPU</i>
<b>1</b>	26,0	120,7
<b>2</b>	28,4	77,0
<b>3</b>	54,2	33,5
<b>4</b>	34,9	27,2
<b>5</b>	28,4	71,3
<b>6</b>	42,5	23,2
<b>7</b>	24,0	80,0
<b>8</b>	26,1	51,5
<b>9</b>	29,4	3761,2
<b>10</b>	29,7	46,9
<b>ORT.</b>	<b>32,4</b>	<b>429,2</b>

Çizelge Ek.6: 41 Düğümlü Örnekte Kısıtlı Kaynağa Sahip DKK<sup>komşu</sup> Modeli için Ağ Ömrü ve Çözüm Süreleri

<i>N=51</i>	<i>t</i>	<i>CPU</i>
<b>1</b>	22,1	602,6
<b>2</b>	37,9	423,3
<b>3</b>	28,2	2122,4
<b>4</b>	30,7	272,6
<b>5</b>	28,8	431,8
<b>6</b>	26,2	120,7
<b>7</b>	22,9	240,7
<b>9</b>	32,6	49,1
<b>10</b>	16,7	536,0
<b>ORT.</b>	<b>27,3</b>	<b>533,2</b>

Çizelge Ek.6: 51 Düğümlü Örnekte Kısıtlı Kaynağa Sahip DKK<sup>komşu</sup> Modeli için Ağ Ömrü ve Çözüm Süreleri

<i>N=61</i>	<i>t</i>	<i>CPU</i>
<b>1</b>	28,6	321,4
<b>2</b>	36,3	2033,6
<b>3</b>	25,4	703,1
<b>5</b>	34,3	536,3
<b>6</b>	31,8	440,7
<b>7</b>	23,1	1754,0
<b>8</b>	21,2	603,3
<b>9</b>	24,9	621,8
<b>10</b>	24,7	342,6
<b>ORT.</b>	<b>27,8</b>	<b>817,4</b>

Çizelge Ek.6: 61 Dügümlü Örnekte Kısıtlı Kaynağa Sahip DKK<sup>komşu</sup> Modeli için Ağ Ömrü ve Çözüm Süreleri

<i>N=71</i>	<i>t</i>	<i>CPU</i>	<i>GAP(%)</i>
<b>1</b>	16,98	3395,07	0
<b>2</b>	20,97	988,88	0
<b>3</b>	23,79	2985,16	0
<b>4</b>	23,07	2304,43	0
<b>5</b>	30,28	3693,45	0
<b>6</b>	15,86	2621,58	0
<b>7</b>	13,76	14412,07	13,6
<b>8</b>	13,43	14411,28	5,8
<b>9</b>	20,24	4150,02	0
<b>10</b>	23,94	2953,44	0
<b>ORT.</b>	<b>20,232</b>	<b>5191,538</b>	<b>9,7</b>

Çizelge Ek.6: 71 Dügümlü Örnekte Kısıtlı Kaynağa Sahip DKK<sup>komşu</sup> Modeli için Ağ Ömrü ve Çözüm Süreleri

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Tuğçe Yücel  
**Uyruğu** : TC  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 20.10.1990/Elazığ  
**E-posta** : tugcefeoglu@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, TOBB ETÜ, Mühendislik, Endüstri Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2015, TOBB ETÜ, Endüstri Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2013-2015	TOBB ETÜ	Tam burslu Yüksek Lisans

### Yabancı dil

İngilizce, İspanyolca, Arapça

### Yayınlar

**Yücel, T.** ve Altın-Kayhan, A., 2015. Kablosuz Algılayıcı Alarda Fazlalığa Dayalı Güvenilirlik Stratejisi ile Enerji Verimli Ağ Tasarımı, YAEM-2015: 35. Ulusal Yöneyim Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi, 9-11 Eylül, Ankara, Türkiye.