

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ÇOKLU OMURGA ÜZERİNDEN
TÜME GÖNDERİM PROBLEMİNİN HEDEF PROGRAMLAMA İLE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra GÜLTEKİN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

AĞUSTOS 2022

TEZ BİLDİRİMİ

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

Büşra GÜLTEKİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ÇOKLU OMURGA ÜZERİNDEN

TÜME GÖNDERİM PROBLEMİNİN HEDEF PROGRAMLAMA İLE

OPTİMİZASYONU

Büşra GÜLTEKİN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Eş Danışman: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Tarih: Ağustos 2022

Bu çalışmada, Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) literatüründe genelde teke gönderim bağlamında ele alınmış olan sıcak nokta probleminin grup haberleşmesindeki karşılığı araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, tüme gönderim yapan bir KAA uygulamasında çoklu omurgalar kullanılarak maksimum enerji tüketimi enküçüklenmiştir. Çoklu omurga tasarımıyla, ağdaki düğümlere yapılan rol atamasının ve kullanılan bağlantıların değişebilmesine izin verilmiştir. Bu amaçla Akış Tabanlı (İng. Flow Based-FB) ve Düğüm Tabanlı (İng. Node Based-NB) olarak adlandırılan iki farklı Karma Tamsayı Programlama (İng. Mixed Integer Programming-MIP) modeli kurulmuştur. Performans karşılaştırması yapıldığında NB'nin daha ölçeklenebilir olduğuna karar verilmiş ve çalışmaya bu modelle devam edilmiştir. Ayrıca bir ağdaki kullanılabilir omurga sayısı için teorik bir üst sınır elde edilmiştir. İkinci aşamada, ağdaki toplam enerji tüketimi ve maksimum enerji tüketimi metrikleri ayrı ayrı eniyilenerek ortak topoloji örneklerinde ağın aynı şekilde davranmadığı kanıtlanmıştır. Son olarak, maksimum enerji tüketimi ve uçtan uca gecikme metrikleri

hem ayrı ayrı hem de birlikte eniyilenmiştir. Birbiriyle çelişen bu iki metrik arasındaki ödünleşim çok amaçlı bir eniyileme yöntemi olan Hedef Programlama (İng. Goal Programming-GP) ile analiz edilmiştir. Tüm matematiksel modeller PYTHON kodlama dili ve CPLEX ticari çözücüsü kullanılarak çözdürülmüş, alınan tüm testlerde optimal sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz algılayıcı ağ, Tüme gönderim, Grup haberleşmesi, Karma tamsayılı programlama, Hedef programlama, Omurga



ABSTRACT

Master of Science

GOAL PROGRAMMING APPROACH WITH MULTIPLE BACKBONES FOR BROADCAST IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Büşra GÜLTEKİN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Date: August 2022

In this study, the counterpart of the hotspot problem in group communications, which is generally considered in the context of unicast in the Wireless Sensor Network (WSN) literature, has been investigated. In the first phase of the study, maximum energy dissipation is minimized by using multiple backbones in a broadcasting WSN application. With the multi-backbone design, the role assignment of nodes in the network and the connections used are allowed to change. For this purpose, two different Mixed Integer Programming (MIP) models called Flow Based (FB) and Node Based (NB) are constructed. When the performance comparison are made, it is decided that the NB is more scalable and the study continues with this model. In addition, a theoretical bound has been obtained for the number of backbones that can be used in a network. In the second phase, the total energy consumption and maximum energy consumption metrics in the network are optimized separately, and it is proved that the network do not behave in the same way in the common topology samples. Finally, maximum energy consumption and end-to-end delay metrics are optimized both separately and together. The trade-off between these two contradictory metrics is analyzed by Goal Programming (GP), which is a multi-objective optimization method.

All mathematical models are solved using PYTHON coding language and CPLEX commercial solver, and optimal results are achieved in all tests.

Keywords: Wireless sensor network, Broadcast, Group communication, Mixed integer programming, Goal programming, Backbone



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	7
3. YÖNTEM	11
3.1 Sistem Modeli	11
3.2 Enerji Modeli.....	12
3.3 Akış Tabanlı (FB) 0-1 MIP Modeli.....	14
3.4 Düğüm Tabanlı (NB) Alternatif 0-1 MIP Modeli	19
3.5 Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli	21
3.5.1 Gecikme tabanlı (DB) 0-1 MIP modeli	22
3.5.2 Hedef programlama (GP) ile çok amaçlı 0-1 MIP modeli	23
4. ANALİZLER	25
4.1 Test Kümeleri	25
4.2 Alternatif MIP Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi	25
4.3 Alternatif Amaç Fonksiyonlarının Karşılaştırmalı Analizi	26
4.4 Omurga Sayısının Etkisi.....	29
4.5 Maksimum Enerji Tüketimi ve Uçtan Uca Gecikme Metrikleri Arasındaki Ödünleşimin Analizi	33
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tipik bir KAA sıcak nokta problemi	2
Şekil 1.2 : KAA'larda trafik rejimleri	3
Şekil 1.3 : Rastgele bir topoloji için olası iki farklı omurga örneği	4
Şekil 3.1 : Çok yönlü anten yapısı	11
Şekil 4.1 : Disk topolojisi	25
Şekil 4.2 : Farklı ağ boyutlarında toplam ve maksimum enerji tüketimindeki değişimler	27
Şekil 4.3 : Rastgele bir örnek topolojide $TopE$ ve E^{max} ile elde edilen omurga yapıları	28
Şekil 4.4 : Farklı N_b değerleri için maksimum enerji tüketimi	30
Şekil 4.5 : 50 düğümlü bir ağ topolojisinin tek omurgalı durumda davranışı ($N_b = 1, s_1 = 1440$)	31
Şekil 4.6 : 50 düğümlü bir ağ topolojisinin iki omurgalı durumda davranışı ($N_b = 2, s_1 = 733, s_2 = 707$)	32
Şekil 4.7 : (a) $n = 20$, (b) $n = 30$, (c) $n = 40$, (d) $n = 50$ ağ boyutlarında maksimum enerji tüketimi ve uçtan uca gecikmenin ödünleşmesi	34
Şekil 4.8 : Birinci örnek ($N_b = 1$ için $\gamma_1 = 1$ ve $\gamma_1 = 0.75$ ile elde edilen omurga yapıları)	35
Şekil 4.9 : İkinci örnek ($N_b = 1$ için $\gamma_1 = 1$ ve $\gamma_1 = 0.75$ ile elde edilen omurga yapıları)	36

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Literatür taraması.....	7
Çizelge 3.1 : Her bir iletim güç seviyesine $l \in \{1, \dots, 26\}$ karşılık gelen iletim gücü tüketimi $P_{tx}^{crc}(l)$ (mW) ve anten çıkış gücü $P_{tx}^{ant}(l)$ (mW).....	12
Çizelge 3.2 : Sembol listesi.....	14
Çizelge 3.3 : NB için tanımlanan ek karar değişkenlerinin listesi.....	19
Çizelge 3.4 : DB için tanımlanan ek karar değişkenlerinin listesi.....	22
Çizelge 4.1 : NB ile ortalama çözüm süreleri ($ V = 60$).....	26



KISALTMALAR

BS	: Baz İstasyonu (İng. Base Station-BS)
DB	: Gecikme tabanlı (İng. Delay-Based-DB)
FB	: Akış tabanlı (İng. Flow-Based-FB)
FSD	: İlk ölen düğüm (İng. First Sensor Dies-FSD)
GP	: Hedef Programlama (İng. Goal Programming-GP)
KA	: Kablosuz Algılayıcı Ağ (İng. Wireless Sensor Network-WSN)
MIP	: Karma Tamsayılı Programlama (İng. Mixed Integer Programming-MIP)
NB	: Düğüm tabanlı (İng. Node-Based-NB)
NL	: Ağ ömrü (İng. Network Lifetime-NL)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
V	Tüm düğümler kümesi (Baz istasyonu-BS dahil)
W	Tüm algılayıcılar kümesi $W = V \setminus \{BS\}$
B	Omurgalar kümesi $B = \{1, \dots, N_b\}$
L	İletim güç seviyeleri kümesi
n	Ağdaki toplam düğüm sayısı
N_b	İzin verilen maksimum omurga sayısı
M_P	Veri paketi uzunluğu
P_{slp}	Uyku modunda güç tüketimi
$P_{tx}^{crc}(l)$	$l \in L$ iletim gücü seviyesine karşılık gelen iletim gücü tüketimi
$P_{tx}^{ant}(l)$	$l \in L$ iletim gücü seviyesine karşılık gelen anten çıkış gücü
P_{rx}^{crc}	Veri almak için harcanan güç
P_{DA}	İşlemciyi ve sensör kartını aktif moda çalıştırma gücü
T_{DA}	Toplam veri toplama ve işleme süresi
T_{rnd}	Tur süresi
T_{slot}	Aktif zaman dilimi
$T_{tx}(M_P)$	Veri paketi iletimi için geçen süre
T_{rsp}	Yayımlama gecikmesi

T_{grad}	Koruma süresi
ξ	Kanal veri hızı
E_{DA}	Birim veri toplama ve işleme enerjisi
E_l^{tx}	Gönderici düğümün $l \in L$ güç seviyesindeki enerji tüketimi
E^{rx}	Alıcı düğümün enerji tüketimi
M	Ağ ömrü boyunca BS tarafından gönderilecek veri paketlerinin sayısı

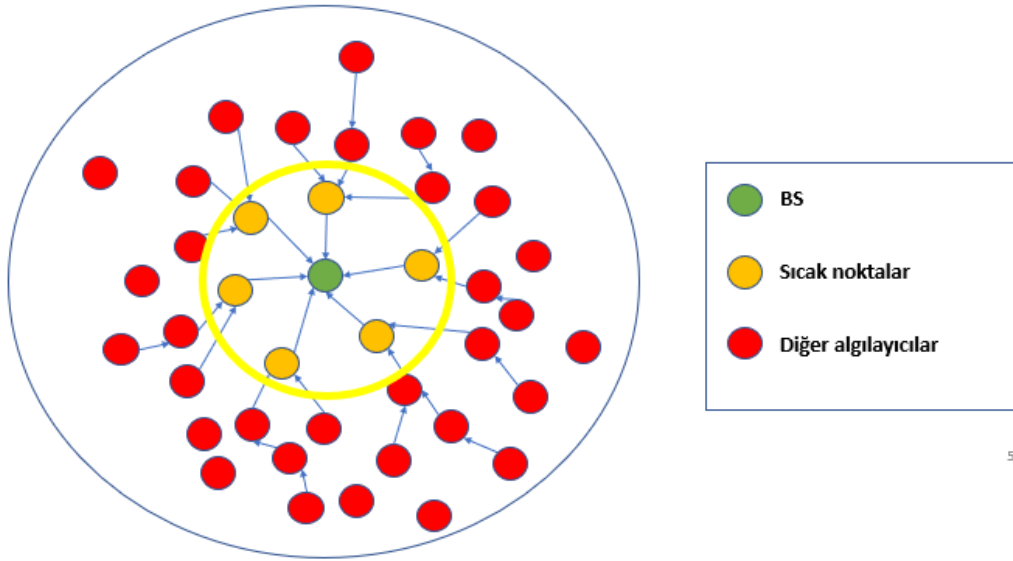


1. GİRİŞ

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA'lar) sınırlı bilgi işleme ve algılama kapasitesine sahip, kablosuz bir ortamda birbirlerine mesaj gönderebilen küçük algılayıcılardan oluşur [1]. Bu algılayıcılar buldukları ortamın sıcaklık, nem, gürültü gibi özelliklerini ve etraflarında bulunan bir cismin hızını, boyutunu ya da yönünü sezebilirler. KAA'ların bilinen ilk kullanımı Vietnam Savaşı'nda Igloo White operasyonu sırasında [2]. Teknolojinin gelişmesiyle özellikle son 20 senedir KAA'ların uygulama alanları hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Arazinin gözetlenmesi, düşman güçlerinin izlenmesi gibi askeri; yüksek riskli kalp/solunum hastalarının sürekli takibi, hastanelerde gerçek zamanlı hasta takibi ve acil durum uyarı sistemi gibi sağlık; sismik/volkanik hareketlerin takibi, orman yangını tespiti gibi çevresel uygulamalarının yanında akıllı evlerde/ulaşım sistemlerinde/şehirlerde oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır [3]. Böylece KAA çalışmalarının mümkün olduğunca pratik ve gerçekçi varsayımlarla inşa edilmesi kritik hale gelmiştir.

KAA'larda ağ ömrünün (İng. network lifetime-NL) eniyilenmesi, üzerine birçok çalışmanın yapıldığı en önemli konulardan biridir. Sınırlı bataryaya sahip algılayıcı düğümlerin mümkün olduğunca uzun süre boyunca ağda aktif olması istenir. Algılayıcıların batarya değişimi çoğu zaman mümkün olmadığından sahip oldukları enerjinin verimli bir şekilde kullanılması gerekir. Dolayısıyla genellikle enerji verimli protokollerle mümkün olduğunca az enerji harcayan, uzun ömürlü ağ omurgasını tasarlamak üzerine çalışmalar yapılmaktadır. NL tanımı olarak optimizasyon tabanlı çalışmalarda sıklıkla *ilk algılayıcı enerjisini tüketene kadar geçen süre* (İng. First Sensor Dies – FSD) metriği kullanılmaktadır [4-7]. FSD sayesinde ağda bulunan algılayıcılar enerjilerini dengeli bir şekilde harcarlar ve herhangi bir algılayıcının enerjisi tükendiğinde ortaya çıkabilecek topoloji değişikliklerinin dikkate alınmasına gerek kalmaz. Tez kapsamında da NL metriği olarak FSD kullanılmaktadır. Dolayısıyla algılayıcılardan biri enerjisini tükettiğinde ağın ömrünün bittiği varsayılmaktadır.

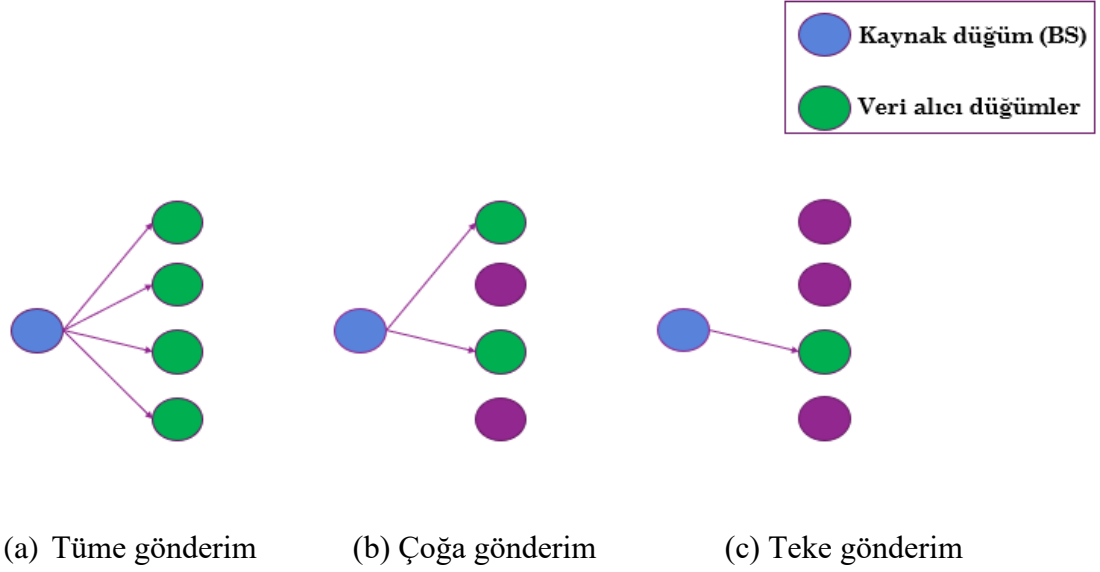
KAA’larda algılayıcılar etraflarından sezdikleri veriyi genellikle *çok atlamalı iletim* (İng. multihop transmission) aracılığıyla teke gönderim yaparak baz istasyonuna (İng. base station-BS’ye) ulaştırırlar. Genelde rastgele bir alana dağıtılmış olan algılayıcılardan BS’ye yakın olanların üzerindeki trafik yükü daha fazladır. Bu sebeple enerjilerini ilk önce tüketerek NL’yi belirlerler. Bu düğümlere literatürde *sıcak nokta* (İng. hotspot) denilmektedir. Şekil 1.1’de de görülebileceği gibi sarı çemberin içinde kalan kısım sıcak nokta bölgesidir (İng. hotspot area).



Şekil 1.1: Tipik bir KAA sıcak nokta problemi.

KAA’larda üç farklı trafik rejimi bulunmaktadır (Şekil 1.2): *teke gönderim* (İng. unicast), *çoğa gönderim* (İng. multicast) ve *tüme gönderim* (İng. broadcast). Tüme gönderim yapan ağlarda kaynak düğümden ağda bulunan diğer tüm algılayıcılara veri iletimi yapılır (Şekil 1.2.a). Çoğa gönderim yapan ağlarda kaynak düğüm, çoğa gönderim grubunda bulunan algılayıcılara veri gönderimi yapar (Şekil 1.2.b). Teke gönderimde ise kaynak düğüm tek bir algılayıcıya veri iletimi yapar (Şekil 1.2.c).

KAA’larda en yaygın kullanılan iletişim kurgusu teke gönderimdir [8]. Buna paralel olarak literatürde teke gönderim yapan ağlar için optimizasyon tabanlı birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak göz ardı edilen diğer önemli bir operasyon vardır ki o da sınırlı iletim menziline sahip BS’nin algılayıcılara topluca veri ilettiği tüme gönderim kurgusudur. Dolayısıyla çok atlamalı iletim aracılığıyla yapılan tüme gönderim farklı



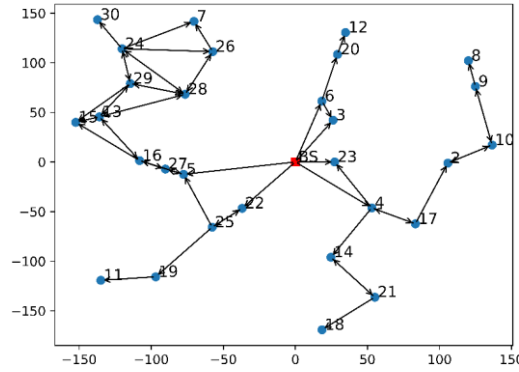
Şekil 1.2: KAA'larda trafik rejimleri.

durumlarda önemli bir enerji tüketimi nedeni haline gelebilir. Teke gönderim protokollerinde rota keşfi, izleme ve bakım için tüme gönderim kullanılmaktadır [9]. Ayrıca rota güncellemelerinden ağdaki tüm algılayıcıları bilgilendirmek, yer keşfi ve sorgulama (İng. querying) için de kullanılmaktadır [10, 11]. Ek olarak yazılım güncellemesi yapmak ya da güvenlik amaçlı kriptografik şifre değişimi gibi nedenlerle de tüme gönderime ihtiyaç duyulur.

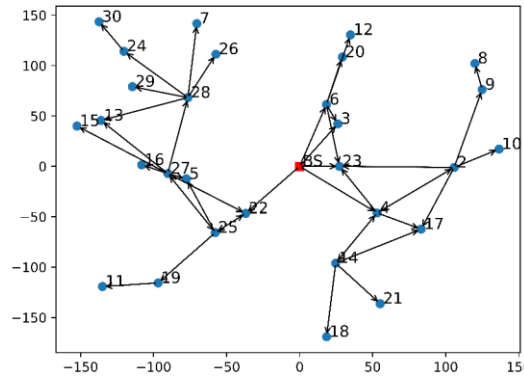
Tüme gönderim sırasında ağda harcanan enerjinin minimizasyonu önemli bir araştırma konusudur. Literatürde çoğunlukla harcanan toplam enerji en aza indirilmeye çalışılmıştır. Ancak bu durum bazı düğümlere çok yüklenmesi nedeniyle enerji tüketiminin dengesiz dağılmasına ve dolayısıyla da sıcak noktaların oluşmasına neden olabilir. Diğer bir yaklaşım ise NL'nin FSD ile ölçüldüğü durumda NL enbüyükleme probleminin bir Min-Max problemi (Maksimum enerji tüketimini enküçükleme) olarak formüle edilmesidir. Literatürde bu iki yaklaşımın optimizasyon bakış açısıyla irdelendiği çalışmalar oldukça nadirdir. Her ne kadar bu çalışmalarda ikinci yaklaşım kullanılıyor olsa da mevcut çalışmalar tezdeki yaklaşımdan çok daha yüzeyseldir. Daha detaylı açıklamalar Bölüm 2'de sunulmaktadır.

Tüm grup haberleşmesi kurgularında bir düğüm, gelen verileri ileten bir *röle düğümü* ya da herhangi bir iletim yapmadan sadece alan bir *yaprak düğümü* olabilir. Ortaya

çıkan omurga BS, röle düğümleri, yaprak düğümler ve bunların arasındaki aktif bağlantılardan oluşur. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi düğüm ya da bağlantılardaki tek bir değişiklik farklı bir omurga yapısına yol açar. Bu çalışmada, enerjiyi en verimli şekilde kullanmak için çoklu omurga yapısının kullanılmasına izin verilmektedir. Bunun nedeni tek omurga kullanılan durumda Min-Max yaklaşımı ile tüketim dengelemesi yapılırsa da belli düğümlere daha fazla yüklenilmesinin kaçınılmaz olmasıdır. Tez çalışmasında enerji tüketimini dengeli tutmak adına farklı omurgalar üzerinden iletim yapılması esnekliği dikkate alınmıştır. Tüme gönderim literatüründe çoklu omurga tasarımına daha önce rastlanılmamış olması nedeniyle tez çalışmasının en önemli özgün katkılarından birisi budur.



(a) Omurga yapısı 1



(b) Omurga yapısı 2

Şekil 1.3: Rastgele bir topoloji için olası iki farklı omurga örneği.

KAA'lardaki tüm iletişim kurgularında enerji metriğinin yanında incelenmesi gereken bir diğer husus da ağdaki uçtan uca gecikmedir. Ancak ağdaki gecikmenin ve maksimum enerji tüketiminin minimizasyonu birbiri ile çelişmektedir. Yani bir ağdaki gecikme enküçüklendiğinde maksimum enerji tüketimi artmaktadır. Bu sebeple

oluşturulan optimizasyon problemi çerçevesinde maksimum enerji tüketimi ve uçtan uca gecikme birlikte eniyilenmiştir. Birbiriyle çatışan bu iki metriğin arasındaki ödünleşimin analiz edilmesi ve bu sırada ağıın davranışının gözlemlenmesi benzer bir çalışmanın daha önce yapılmamış olması nedeniyle de tez çalışmasını literatürden farklı kılmaktadır. Çok amaçlı bir eniyileme yöntemi olarak Hedef Programlama (İng. Goal Programming-GP) kullanılması literatüre yöntemsel açıdan da katkı sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında tüme gönderim yapan bir KAA'da toplam enerji tüketimi, maksimum enerji tüketimi ve uçtan uca gecikmenin enküçüklenmesi problemleri tek/çok omurgalı altyapılarla ayrı ayrı ve birlikte eniyilenmiştir. Yapılan analizler KAA'nın davranışı için oldukça kapsamlı fikirler elde edilmesine yardımcı olmuştur. Kurulan eniyileme çerçevesinin yanında, bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan simetrik iletim menzili modeli olan *Birim Disk Modeli* (İng. Unit Disc Model) yerine, simetrik olmayan *Log-normal Gölgeleme Modeli* (İng. Log-normal Shadowing Model) kullanılmıştır. Gerçek hayat uygulamalarında algılayıcılardaki anten yapısı ve ortam gibi nedenlerle pürüzsüz simetri sağlanamadığından entegre edilen iletim menzili modeli gerçekçi kurgulara oldukça yakındır. Diğer bir fark da sinyal gürültü oranının enerji modeline dahil edilmesi ve verilerin paketler halinde iletildiğinin kabul edilmesidir. Sonuç olarak literatürde bu çalışmadaki gibi kapsamlı bir model ve optimal çözümlerle elde edilmiş bir analiz bulunmamaktadır.

Çalışmada, öncelikle maksimum enerji tüketimi minimizasyonu problemini çözmek için iki adet alternatif Karma Tamsayı Programlama (İng. Mixed Integer Programming-MIP) modeli kurulmuştur. İki farklı bakış açısıyla kurulan modellerin performans analizi yapılarak daha ölçeklenebilir olan model ile çalışmaya devam edilmiştir. Daha sonra bu modele enerji yerine uçtan uca gecikme metriği entegre edilerek yeni bir model kurulmuştur. Ardından maksimum enerji tüketimi ve uçtan uca gecikmenin çok amaçlı eniyilemesi GP ile yapılmıştır. Her aşamada kurulan modele önceki paragrafta bahsedilen gerçekçi enerji ve iletim menzili modeli entegre edilmiştir. Ticari çözücü kullanılarak kapsamlı bir parametre uzayında tüm örnekler için modeller optimal olarak çözdürülmüş ve sonuçları analiz edilmiştir.

Tez çalışmasının gelecek bölümleri şu şekildedir: Bölüm 2’de Literatür Taraması, Bölüm 3’te oluşturulan tüm matematiksel modellerin, sistem ve enerji modeli özelliklerinin detaylı bir şekilde anlatıldığı Yöntem, Bölüm 4’te aşama aşama yapılan tüm analizlerin ve çıkarımların bulunduğu Analiz ve Bölüm 5’te Sonuç ve Öneriler yer almaktadır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde tüme gönderim literatürü detaylı bir şekilde incelenmiştir. Mevcut çalışmalar ele alınan metrik, kullanılan yöntem ve izin verilen omurga yapısı açısından gruplandırılarak Çizelge 2.1’de özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 2.1: Literatür taraması.

Çalışma	Metrik				Yöntem				Omurga	
	Toplam Enerji Tüketimi	Maksimum Enerji Tüketimi	Uçtan Uca Gecikme	Tüme Gönderim Süresi	Algoritma	MIP	Çok Amaçlı Eniyileme	Hedef Programlama	Tek	Çok
[12]	✓				✓				✓	
[13]	✓				✓				✓	
[14]	✓				✓				✓	
[15]	✓				✓				✓	
[16]	✓				✓				✓	
[17]	✓				✓	✓			✓	
[18]	✓				✓				✓	
[19]	✓				✓				✓	
[20]	✓				✓	✓			✓	
[21]	✓		✓		✓		✓		✓	
[22]	✓		✓	✓	✓				✓	
[23]	✓			✓	✓		✓		✓	
[24]	✓				✓	✓			✓	
[25]	✓				✓				✓	
[26]		✓			✓				✓	
[27]		✓			✓				✓	
[28]		✓			✓				✓	
[29]		✓			✓				✓	
[30]		✓				✓			✓	
[31]		✓			✓	✓			✓	
[32]		✓			✓				✓	
[33]			✓		✓		✓		✓	
[34]			✓		✓					✓
[35]			✓		✓				✓	
[36]				✓	✓				✓	
TEZ	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓

Mevcut çalışmalarda tüme gönderim yapan KAA'larda ele alınan başlıca metrikler toplam enerji tüketimi, maksimum enerji tüketimi, uçtan uca gecikme ve tüme gönderim süresidir. [12-25]'te toplam enerji tüketimi enküçüklenmeye çalışılmıştır. [14, 24, 25]'te ele alınan bu problem, literatürde NP-zor olduğu kanıtlanmış Minimum Bağlı Baskın Küme (İng. Minimum Connected Dominating Set-MCDS) problemine benzetilmiştir. Bu çalışmalar, MCDS'deki gibi düğüm sayısının enküçüklenmesi toplam enerji tüketiminin minimizasyonu ile paralel bir amaç olduğundan Çizelge 2.1'deki gibi gruplandırılmıştır. Öte yandan [26-32]'de maksimum enerji tüketimi minimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmalarda ağ ömrü metriği olarak FSD kullanıldığından problem ağ ömrü enbüyüklemesi olarak da tanımlanmıştır.

[21, 22]'de uçtan uca gecikme toplam enerji tüketimiyle beraber ele alınırken, [33-35]'te tek başına değerlendirilmiştir. [21, 35]'te ağın gecikmesi tüme gönderim esnasında verinin en son düğüme ulaşmak için yaptığı atlama sayısı olarak tanımlanırken, [22, 33, 34]'te kaynak düğümden son düğüme ulaşmak için geçen süre olarak tanımlanmıştır. [19, 20]'de ise uçtan uca gecikme eniyilenen bir metrik olarak değil, bir kısıt olarak ele alınmıştır. Bu çalışmalarda asıl amaç toplam enerji tüketimi minimizasyonu iken, uçtan uca gecikmenin belli bir eşik değerinin altında olması kısıt olarak eklenmiştir.

Son olarak [22, 23, 36]'da tüme gönderim süresi (İng. Broadcast times) en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalarda bir kaynağın tüme gönderim yapması için gereken süre ele alınmıştır. Aslında bu metrik uçtan uca gecikme ile doğru orantılıdır. Yani bir ağdaki tüme gönderim süresi uzunsa, uçtan uca gecikme de fazladır. Bu nedenle her ne kadar farklı bir metrik olarak tanımlanmış olsa da uçtan uca gecikme ile aynı kapıya çıkmaktadır.

İncelenen çalışmalarda Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi ağırlıklı olarak algoritmik yöntemler kullanılmıştır. MIP kullanılan çalışmalar oldukça nadirdir. Dolayısıyla algoritmalarından elde edilen sonuçların gerçekte ne kadar iyi olduklarının somut bir şekilde değerlendirilebilmesi bakımından MIP çözümleri oldukça değerlidir. [12-16, 18-19, 21-23, 25-29, 32-36]'da yöntem olarak sadece algoritmalar kullanılırken, [30]'da sadece MIP kullanılmıştır. [17, 20, 24, 31]'de ise her iki yöntem birlikte kullanılmaktadır. [17]'de düğüm sayısı arttığında matematiksel modelde sonuç

alınmadığından akış-denge kısıtları (İng. flow-balance constraints) gevşetilerek bir üst sınır bulunmuştur. Ardından tasarlanan SPA algoritması bulunan üst sınır ile karşılaştırılarak performans analizi yapılmıştır. Benzer şekilde [20]'de MIP modeli büyük boyutlu örneklerde makul sürede optimal çözümleri bulamadığından belli oranda en iyiye yakınlığı garanti eden yaklaşıklık algoritması (İng. approximation algorithm) tasarlanmıştır. [24]'te MCDS ve Çekişmeye Duyarlı Bağlı Baskın Küme (İng. Contention Aware Connected Dominating Set-CACDS) temel alınarak iki farklı matematiksel model önerilmiş, sonrasında Benders Ayrıştırma Yöntemi kullanılmıştır. [30]'da enerji modelleri ve iletişim protokolleri farklılaştırılarak 3 farklı MIP modeli önerilmiştir. Modellerin hepsinde bulunan alt tur eleme kısıtlarının çözüm süresini ciddi oranda arttırdığı görülmüştür. Bu nedenle devam çalışması niteliğinde olan [31]'de modele geçerli eşitsizlikler eklenmiştir. Ancak bu durumda da bazı düğümlerin gereksiz bir şekilde yüksek seviyeden veri gönderimi yapmaya zorlandığı fark edilmiştir. Sonrasında Tohe Algoritması kullanılarak enerji tasarrufu yapılmaya çalışılmıştır. Böylece en iyiye yakın çözümlere ulaşılmıştır.

Literatürde birden fazla metriğin çok kriterli eniyileme ile ele alındığı çalışmalar oldukça azdır. [21]'de toplam enerji tüketimi ve uçtan uca gecikme birlikte değerlendirilmiştir. [23]'te ise toplam enerji tüketimi ve tüme gönderim süresi aynı anda ele alınmıştır. [33]'te iletim kapasitesi enbüyüklenirken uçtan uca gecikme enküçüklenmiştir. Bu çalışmaların hiçbirinde yöntem olarak GP kullanılmamıştır.

Son olarak çalışmalardaki omurga yapısı incelenmiştir. [12–33, 35-36]'nın tamamında tek omurga yapısı kullanılmaktadır. Sadece [34]'te çok omurgadan bahsedilmiştir. Ancak burada tez çalışmasında olduğu gibi tek bir ağ ömrü içerisinde farklı omurgalara izin vermek yerine, düğümlerin rol atamasının sürekli değiştiği bir yapı kullanılmıştır. Dolayısıyla tez çalışmasından farklı bir omurga ağ yapısı söz konusudur.

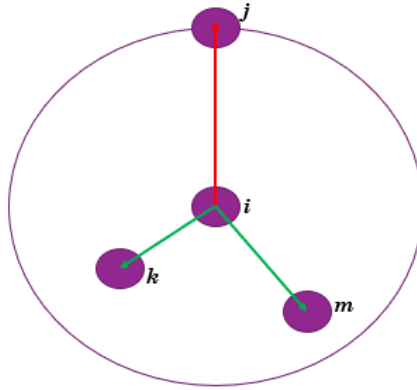


3. YÖNTEM

3.1 Sistem Modeli

Bu çalışmada tek BS ve çoklu algılayıcı düğümlerden oluşan statik bir ağ topolojisi üzerine çalışılmıştır. BS, ağdaki tüm düğümlere periyodik olarak bir mesaj yayınlamak zorundadır. Ağdaki her bir düğüme röle ya da yaprak düğüm olarak bir rol ataması yapılır. Düğümlerin rollerine ve aralarındaki aktif bağlantılara göre omurga meydana gelir. Tez kapsamında düğümlerin enerjilerini dengeli harcamak için ağda çoklu omurga yapısının kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.

Her düğümün toplam enerji tüketimi, veri iletme/alma/algılama ve uyku esnasında harcadığı enerjinin toplamına eşittir. Literatürde çoğu çalışmada olduğu gibi bu çalışma kapsamında da ağda bulunan algılayıcıların çok yönlü (İng. omnidirectional – aynı zamanda yönsüz sözcüğü de bu anlamda kullanılmaktadır) antenlere sahip oldukları yani iletim alanlarının Şekil 3.1’de gösterildiği gibi dairesel şekilde olduğu varsayılmıştır [15, 31]. Böylece bir i düğümünden j düğümüne veri gönderildiğinde, i 'ye j 'den daha yakın olan diğer düğümler de bu veriyi alabilecektir. Bu nedenle, veri gönderici düğümün enerji tüketimi, kablosuz çoğa gönderim avantajına (İng. wireless multicast advantage) göre en uzak düğüme ulaşmak için gereken enerji miktarına eşittir [12]. Enerji modeli hakkında daha ayrıntılı açıklama Bölüm 3.2’de sunulmuştur. Ayrıca optimizasyon modeline gerçekçi grup iletişimi özelliklerini dahil etmek amacıyla Log-normal Gölgeleme Modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Çok yönlü anten yapısı.

3.2 Enerji Modeli

Veri iletim gücü seviyesine bağlı olarak her algılayıcının enerji tüketimi, tüme gönderim ağına uygun ve gerçekçi bir enerji modeli ile çalışmadaki tüm eniyileme modellerine dahil edilmiştir. Bu amaçla [37]'deki enerji modeli temel alınarak tüme gönderim kurgusuna uyarlanmıştır. Mica2 model düğümler 26 farklı güç seviyesiyle veri iletimi gerçekleştirebilmektedir. Çizelge 3.1'de her bir iletim güç seviyesine $l \in \{1, \dots, 26\}$ karşılık gelen iletim gücü tüketimi ($P_{tx}^{crc}(l)$) ve anten çıkış gücü ($P_{tx}^{ant}(l)$) gösterilmiştir. Veri alma için harcanan gücün sabit ve 35,4 mW olduğu ($P_{rx}^{crc} = 35,4$ mW) varsayılmıştır.

Çizelge 3.1: Her bir iletim güç seviyesine $l \in \{1, \dots, 26\}$ karşılık gelen iletim gücü tüketimi $P_{tx}^{crc}(l)$ (mW) ve anten çıkış gücü $P_{tx}^{ant}(l)$ (mW).

l	$P_{tx}^{crc}(l)$	$P_{tx}^{ant}(l)$	l	$P_{tx}^{crc}(l)$	$P_{tx}^{ant}(l)$
1 (l_{min})	25,8	0,0100	14	32,4	0,1995
2	26,4	0,0126	15	33,3	0,2512
3	27,0	0,0158	16	41,4	0,3162
4	27,1	0,0200	17	43,5	0,3981
5	27,3	0,0251	18	43,6	0,5012
6	27,8	0,0316	19	45,3	0,6310
7	27,9	0,0398	20	47,4	0,7943
8	28,5	0,0501	21	50,4	1,0000
9	29,1	0,0631	22	51,6	1,2589
10	29,7	0,0794	23	55,5	1,5849
11	30,3	0,1000	24	57,6	1,9953
12	31,2	0,1259	25	63,9	2,5119
13	31,8	0,1585	26 (l_{max})	76,2	3,1623

Çalışma kapsamında zamanın 60 saniyelik turlara bölüdüğü varsayılmıştır ($T_{rnd} = 60$ s). BS'nin veri üretim hızı ve buna karşılık harcadığı enerjinin aynı ve sabit olduğu kabul edilmiştir. Veri toplamak için enerji tüketimi $E_{DA} = P_{DA} \times T_{DA} = 600 \mu J$

olarak hesaplanır. Burada P_{DA} (30 mW) işlemciyi ve sensör kartını aktif moda çalıştırma gücünü, T_{DA} (20 ms) ise veri toplama ve işlem süresini ifade eder.

Veri paketi uzunluğu (M_P) 256 Byte olarak alınmıştır. Veriler paket iletimi (İng. packet transmission- $T_{tx}(M_P)$), yayılma gecikmesi (İng. propagation delay- $T_{rsp} = 250$ ms) ve koruma sürelerini (İng. guard times- $2 \times T_{grd} = 200$ μ s) içeren önceden belirlenmiş tek bir zaman dilimi içerisinde (T_{slot}) gönderici düğümden alıcı düğüme iletilir. Böylece aktif zaman dilimi $T_{slot} = [2 \times T_{grd} + T_{tx}(M_P) + T_{rsp}] = 107$ ms olarak hesaplanır. Burada $T_{tx}(M_P)$, toplam bit sayısının kanal veri hızına (İng. channel data rate- $\xi = 19.2$ Kbps) bölünmesiyle elde edilir.

Matematiksel modellerde kullanılan enerji parametreleri aşağıdaki verilen (3.1-3.10) ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma_{ij}[dB] = \gamma_0[dB] + 10n \log_{10} \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right) + X_\sigma[dB] \quad (3.1)$$

$$P_{rx,ij}^{ant}(l)[dBm] = P_{tx}^{ant}(l)[dBm] - \gamma_{ij}[dB] \quad (3.2)$$

$$\varphi_{ij}(l)[dB] = P_{rx,ij}^{ant}(l)[dBm] - P_n[dBm] \quad (3.3)$$

$$P_{ij}^s(l, \varphi) = \left(1 - \frac{1}{2} \exp \left(\frac{-\varphi_{ij}(l)}{2} \frac{1}{0.64} \right) \right)^{8\varphi} \quad (3.4)$$

$$P_{ij}^f(l, \varphi) = 1 - P_{ij}^s(l, \varphi) \quad (3.5)$$

$$E_{tx}^P(l, M_P) = P_{tx}^{crc}(l) T_{tx}(M_P) \quad (3.6)$$

$$E_{tx}(l, M_P) = E_{tx}^P(l, M_P) + P_{rx}^{crc}(T_{slot} - T_{tx}(M_P)) \quad (3.7)$$

$$E_{tx}^D(l) = E_{PP} + E_{tx}(l, M_P) \quad (3.8)$$

$$E_{rx}(l) = P_{rx}^{crc} T_{slot} \quad (3.9)$$

$$E_{rx}^D(l) = E_{PP} + P_{rx}^{crc} T_{slot} \quad (3.10)$$

3.3 Akış Tabanlı (FB) 0-1 MIP Modeli

Bu bölümde tüme gönderim yapan bir ağda, ağ omurgasını yeniden yapılandırabilen Akış Tabanlı (FB) 0-1 MIP Modeli sunulmuştur. Amaç, en fazla enerji harcayan düğümün enerji tüketimini enküçükmektir. Ağ topolojisi yönlü bir $G = (V, A)$ çizgesi olarak tanımlanmıştır. Burada V , BS dahil tüm düğümlerin kümesidir. A , ise tüm yönlü bağlantıları temsil eder. Çalışma kapsamında kurulan tüm matematiksel modellerde ortak olarak kullanılan kümeler, parametreler ve FB modelinin karar değişkenleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2: Sembol listesi.

Kümeler	
V	Tüm düğümler (BS dahil)
W	Tüm algılayıcılar $W = V \setminus \{BS\}$
B	Omurgalar $B = \{1, \dots, N_b\}$
L	İletim güç seviyeleri
Parametreler	
n	Ağdaki toplam düğüm sayısı
N_b	İzin verilen azami omurga sayısı
P_{stp}	Uyku modunda güç tüketimi miktarı ($3 \mu W$)
T_{DA}	Toplam veri toplama ve işleme süresi ($20 ms$)
T_{rnd}	Tur süresi ($60 s$)
T_{slot}	Aktif zaman dilimi ($107 ms$)
E_{DA}	Birim veri toplama ve işleme enerjisi ($600 \mu J$)
E_l^{tx}	Gönderici düğümün $l \in L$ güç seviyesindeki enerji tüketimi miktarı
E^{rx}	Alıcı düğümün enerji tüketimi
M	Ağ ömrü boyunca BS tarafından gönderilecek veri paketlerinin sayısı
a_{il}^j	1 eğer $j \in V$ düğümü $i \in V \setminus \{j\}$ tarafından $l \in L$ güç seviyesinde gönderilen verileri alabiliyorsa, 0 d.d.
Karar Değişkenleri	
x_{il}^b	1 eğer $i \in V$ düğümü $b \in B$ omurgasında $l \in L$ güç seviyesinde veri paketi iletiyorsa, 0 d.d.
f_{ij}^b	1 eğer $i \in V$ düğümü $b \in B$ omurgasında $j \in W \setminus \{i\}$ düğümüne veri paketi iletiyorsa, 0 d.d.
g_{ij}^b	1 eğer $j \in W$ düğümü $b \in B$ omurgasında ilk veri paketini $i \in V \setminus \{j\}$ düğümünden alıyorsa, 0 d.d.
r_{il}^b	$b \in B$ omurgasında $i \in V$ düğümü tarafından $l \in L$ güç seviyesinde gönderilen toplam veri paketi sayısı

Çizelge 3.2: (devam)

m_{ij}^b	$b \in B$ omurgasında $i \in V$ düğümünden $j \in W \setminus \{i\}$ düğümüne gönderilen toplam veri paketi sayısı
u_i^b	$b \in B$ omurgasında $i \in V$ düğümünün ilk veri paketini alma sırası
$T_{bsy,i}^b$	$b \in B$ omurgasında $i \in V$ düğümünün meşgul olduğu toplam süre
E_i	$i \in V$ düğümünün harcadığı toplam enerji miktarı
E^{max}	En çok enerji tüketen düğüm tarafından harcanan enerji miktarı
s_b	$b \in B$ omurgasında dağıtılan toplam veri paketi sayısı

Sonuç olarak önerilen FB matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$\text{Minimize } E^{max} \quad (3.11)$$

$$\text{öyle ki: } T_{bsy,i}^b = T_{slot} \left(\sum_{l \in L} r_{il}^b + \sum_{j \in V \setminus \{i\}} m_{ji}^b \right) \quad \forall i \in W, b \in B \quad (3.12)$$

$$T_{bsy,BS}^b = T_{slot} \sum_{l \in L} r_{BSl}^b + T_{DA} s_b \quad \forall b \in B \quad (3.13)$$

$$E_i = \sum_{b \in B} \sum_{l \in L} r_{il}^b E_l^{tx} + E^{rx} \sum_{b \in B} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} m_{ji}^b \quad \forall i \in W \quad (3.14)$$

$$+ P_{slp} \left(\sum_{b \in B} s_b T_{rnd} - \sum_{b \in B} T_{bsy,i}^b \right)$$

$$E_{BS} = \sum_{b \in B} \sum_{l \in L} r_{BSl}^b E_l^{tx} + E_{DA} \sum_{b \in B} s_b \quad (3.15)$$

$$- \sum_{b \in B} T_{bsy,BS}^b$$

$$E^{max} \geq E_i \quad \forall i \in V \quad (3.16)$$

$$\sum_{b \in B} s_b = M \quad (3.17)$$

$$r_{il}^b \leq M x_{il}^b \quad \forall i \in V, l \in L, b \in B \quad (3.18)$$

$$r_{il}^b \leq s_b \quad \forall i \in V, l \in L, b \in B \quad (3.19)$$

$$r_{il}^b \geq s_b - M(1 - x_{il}^b) \quad \forall i \in V, l \in L, b \in B \quad (3.20)$$

$$m_{ij}^b \leq M g_{ij}^b \quad \forall i \in V, j \in V \setminus \{i\}, b \in B \quad (3.21)$$

$$m_{ij}^b \leq s_b \quad \forall i \in V, j \in V \setminus \{i\}, b \in B \quad (3.22)$$

$$m_{ij}^b \geq s_b - M(1 - g_{ij}^b) \quad \forall i \in V, j \in V \setminus \{i\}, b \in B \quad (3.23)$$

$$\sum_{l \in L} x_{il}^b \leq 1 \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.24)$$

$$\sum_{l \in L} x_{il}^b \leq s_b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.25)$$

$$s_b \leq M \sum_{l \in L} x_{BSl}^b \quad \forall b \in B \quad (3.26)$$

$$x_{il}^b a_{il}^j \leq f_{ij}^b \quad \forall i \in V, j \in W \setminus \{i\}, l \in L, b \in B \quad (3.27)$$

$$f_{ij}^b \leq \sum_{l \in L} x_{il}^b a_{il}^j \quad \forall i \in V, j \in W \setminus \{i\}, b \in B \quad (3.28)$$

$$x_{jl}^b \leq \sum_{i \in V \setminus \{j\}} f_{ij}^b \quad \forall j \in W, l \in L, b \in B \quad (3.29)$$

$$s_b \geq s_{b+1} \quad \forall b \in B, b \leq |B| \quad (3.30)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} f_{ij}^b \leq s_b \quad \forall j \in W, b \in B \quad (3.31)$$

$$M \sum_{i \in V \setminus \{j\}} f_{ij}^b \geq s_b \quad \forall j \in W, b \in B \quad (3.32)$$

$$u_i^b \leq u_j^b - 1 + (n - 1)(1 - g_{ij}^b) \quad \forall i \in V, j \in W \setminus \{i\}, b \in B \quad (3.33)$$

$$u_i^b \geq u_j^b - 1 - (n - 1)(1 - g_{ij}^b) \quad \forall i \in V, j \in W \setminus \{i\}, b \in B \quad (3.34)$$

$$u_i^b \leq u_k^b + (n - 1)(2 - g_{ij}^b - f_{kj}^b) \quad \forall i \in V, j \in W \setminus \{i\}, b \in B, \\ k \in V \setminus \{i, j\} \quad (3.35)$$

$$g_{ij}^b \leq f_{ij}^b \quad \forall i \in V, j \in W \setminus \{i\}, b \in B \quad (3.36)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} g_{ij}^b = 1 \quad \forall j \in W, b \in B \quad (3.37)$$

$$u_{BS}^b = 1 \quad \forall b \in B \quad (3.38)$$

$$u_j^b \geq 2 \quad \forall j \in W, b \in B \quad (3.39)$$

$$u_j^b \leq \sum_{i \in V} \sum_{l \in L} x_{il}^b + 1 \quad \forall j \in W, b \in B \quad (3.40)$$

$$E^{max} \geq 0 \quad (3.41)$$

$$f_{ij}^b, g_{ij}^b \in \{0,1\} \quad \forall b \in B, i \in V, j \in V \quad (3.42)$$

$$E_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (3.43)$$

$$T_{bsy,i}^b \geq 0 \quad \forall b \in B, i \in V \quad (3.44)$$

$$s_b \geq 0 \quad \forall b \in B \quad (3.45)$$

$$r_{il}^b \geq 0 \quad \forall b \in B, i \in V, l \in L \quad (3.46)$$

$$m_{ij}^b \geq 0 \quad \forall b \in B, i \in V, j \in V \quad (3.47)$$

$$x_{il}^b \in \{0,1\} \quad \forall b \in B, i \in V, l \in L \quad (3.48)$$

$$u_i^b \in \{0,1\} \quad \forall b \in B, i \in V \quad (3.49)$$

Amaç fonksiyonu (3.11)'de ağdaki en fazla enerji harcayan düğümün enerji tüketimini en aza indirilmesine çalışılmaktadır. Eğer herhangi bir veri paketi göndermiyor veya almıyorlarsa, BS dışındaki tüm düğümlerin uyku modunda oldukları varsayılmıştır. Böylece, bu düğümlerin toplam meşgul oldukları süre (3.12) ile hesaplanmaktadır. Öte yandan, BS alıcı düğüm olamayacağı için iletim veya veri toplama sırasında meşguldür ve dolayısıyla ilgili süre (3.13) ile hesaplanmaktadır. Ayrıca, her bir $i \in$

W düğümünün toplam enerji tüketimi, (3.14)'te tüm omurgalardaki veri iletimi, alımı ve uyku modundaki enerji tüketiminin toplamı olarak ifade edilmektedir. Diğer yandan (3.15) ise BS'nin tüm omurgalarda meşgul olduğu süre boyunca tükettiği toplam enerji miktarını ifade etmektedir. Amaç fonksiyonunun değeri (3.16)'da tüm düğümler arasındaki maksimum enerji tüketimi miktarı olarak tanımlanır. Kısıt (3.17), BS'nin tüm omurgalar üzerinden ağ ömrü boyunca gerekli veri paketlerinin tamamını göndermesini sağlamak için eklenmiştir. Burada iletilmesi istenen veri paketi miktarının (M) parametre olarak tanımlanmasındaki amaç, iletilen veri miktarı bazında farklı protokollerle ağdaki enerji tüketim davranışını gözlemlemek ve değerlendirmektir. M değeri BS'nin dakikada 1 kez ağa mesaj yayınladığı varsayıldığında tüm gün boyunca $60 \times 24 = 1440$ adet veri paketi göndereceği esas alınarak belirlenmiştir.

(3.18)-(3.20), herhangi bir omurgadaki bir röle düğümü tarafından iletilen veri paketi sayısını o omurgada dağıtılan veri paketi sayısına eşitlemektedir. Öte yandan, (3.21)-(3.23), bir alıcı düğüm tarafından bir omurgada alınan veri paketi sayısının, BS'nin o omurgada ilettiği veri paketi sayısına eşit olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.24) her düğümün bir veri gönderici düğüm olması gerektiğini ve fakat öyleyse de bir omurgada tek bir güç seviyesiyle veri iletimi yapabileceğini ifade etmektedir. (3.25)-(3.26) kullanılmayan bir omurgadaki düğümlere rol atanmasını önlerken (3.27)-(3.28), iletim güç seviyesine bağlı olarak her düğümün doğrudan iletim yapabileceği düğümleri, yani tek atlama bağlantı kümesini tanımlamaktadır. Bu kısıtlarla, röle düğümün veri paketlerini iletişim aralığındaki tüm düğümlere iletilmesi sağlanırken daha ötesine iletilmesine izin verilmez. Kısıt (3.29), $j \in W$ düğümünün bir omurgada röle olabilmesi için başka bir düğümden veri alması gerektiğini ifade etmektedir. Kullanılabilecek azami omurga sayısı N_b olarak verildiğinde, (3.30) ile omurgaların ardışık olarak numaralandırılması garanti edilmektedir. (3.31)-(3.32), kullanılan her bir omurgada dağıtılacak veri paketi sayısının alt ve üst sınırlarını sırasıyla 1 ve M olarak belirler.

Tüme gönderim yapısına uyarlanmış Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) alt tur eleme kısıtları (3.33)-(3.34) ile modele eklenmiştir. Ortaya çıkan bir omurgada, bir algılayıcı

aynı veri paketini farklı düğümlerden alabilir. Dolayısıyla, her omurga için (3.35)-(3.36), bir algılayıcının veri aldığı ilk röle düğümünü belirlerken (3.37) bu ilk düğümün her algılayıcı için benzersiz olmasını sağlar. Ayrıca (3.38) ile BS'nin herhangi bir omurgada veri alan ilk düğüm olması ve diğer tüm düğümlerin de (3.39)'un garanti ettiği gibi BS'den sonra sıralanması sağlanmaktadır. Benzer şekilde (3.40), ağdaki her düğümün sırasını, omurgadaki toplam veri gönderici düğüm sayısının bir fazlası ile sınırlamaktadır. Son olarak, (3.41)-(3.49) karar değişkenleri için işaret kısıtlarıdır.

3.4 Düğüm Tabanlı (NB) Alternatif 0-1 MIP Modeli

Çalışma kapsamında FB'ye alternatif olarak Düğüm Tabanlı (NB) 0-1 MIP modeli kurulmuştur. İki model arasındaki temel fark, FB'nin bağlantı tabanlı, NB'nin ise düğüm tabanlı veri paketi akış kontrolüne sahip olmasıdır. Ancak kümeler, parametreler ve bazı karar değişkenleri (E^{max} , E_i , $T_{bsy,i}^b$, s_b , r_{il}^b ve x_{il}^b) her iki modelde de ortaktır. NB için tanımlanan ek karar değişkenleri Çizelge 3.3'te açıklanmıştır.

Çizelge 3.3: NB için tanımlanan ek karar değişkenlerinin listesi.

h_{ij}^b	$b \in B$ omurgasında $i \in V$ düğümünden çıkan veri paketlerini $j \in V$ aracılığıyla dağıtan röle düğüm sayısı ($j \in V$ dahil)
c_i^b	$b \in B$ omurgasında $i \in V$ düğümünün aldığı toplam veri paketi sayısı
y_i^b	1 eğer $i \in V$ düğümü $b \in B$ omurgasında veri paketi alıyorsa, 0 d.d.

NB modelinde her bir $i \in V$ düğümüne gelen toplam akışa odaklanılarak FB'deki m_{ij}^b yerine c_i^b değişkenleri tanımlanmıştır. Benzer şekilde, düğüm çifti bilgilerini tutan f_{ij}^b yerine, omurgadaki düğümleri takip eden y_i^b değişkeni kullanılmıştır. Buna paralel olarak g_{ij}^b değişkeni NB'de bulunmamaktadır. Sonuç olarak, alternatif NB modeli aşağıdaki gibidir:

$$\text{Minimize } E^{max} \quad (3.50)$$

$$\text{öyle ki: } T_{bsy,i}^b = T_{slot} \left(\sum_{l \in L} r_{il}^b + c_i^b \right) \quad \forall i \in W, b \in B \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned}
E_i = & \sum_{b \in B} \sum_{l \in L} r_{il}^b E_l^{tx} + E^{rx} \sum_{b \in B} c_i^b \\
& + P_{slp} \left(\sum_{b \in B} s_b T_{rmd} \right. \\
& \left. - \sum_{b \in B} T_{bsy,i}^b \right) \quad \forall i \in W \quad (3.52)
\end{aligned}$$

$$y_i^b \leq s_b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.53)$$

$$M y_i^b \geq s_b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.54)$$

$$c_i^b \leq M y_i^b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.55)$$

$$c_i^b \leq s_b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.56)$$

$$c_i^b \geq s_b - M(1 - y_i^b) \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.57)$$

$$\sum_{l \in L} x_{il}^b a_{il}^j \leq y_j^b \quad \forall i \in V, j \in V, b \in B \quad (3.58)$$

$$y_j^b \leq \sum_{i \in V} \sum_{l \in L} x_{il}^b a_{il}^j \quad \forall j \in V, b \in B \quad (3.59)$$

$$\sum_{l \in L} x_{il}^b \leq y_i^b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.60)$$

$$h_{ij}^b \leq M \sum_{l \in L} x_{il}^b a_{il}^j \quad \forall i \in V, j \in V, b \in B \quad (3.61)$$

$$h_{ii}^b = 0 \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.62)$$

$$\sum_{i \in V} h_{iBS}^b = 0 \quad \forall b \in B \quad (3.63)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{BS\}} h_{BSj}^b = \sum_{i \in V \setminus \{BS\}} \sum_{l \in L} x_{il}^b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.64)$$

$$\sum_{j \in V} h_{ji}^b - \sum_{j \in V} h_{ij}^b = \sum_{l \in L} x_{il}^b \quad \forall i \in V \setminus \{BS\}, b \in B \quad (3.65)$$

$$\sum_{j \in V} h_{ij}^b \leq n \sum_{l \in L} x_{il}^b \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.66)$$

$$\sum_{j \in V} h_{ij}^b \leq n \sum_{l \in L} x_{jl}^b \quad \forall j \in V, b \in B \quad (3.67)$$

$$\sum_{i \in V} h_{ij}^b \geq \sum_{l \in L} x_{jl}^b \quad \forall j \in V \setminus \{BS\}, b \in B \quad (3.68)$$

$$(3.13), (3.15) - (3.20), (3.24) - (3.26), (3.30), (3.41) - (3.42), (3.43) - (3.46), (3.48) \quad (3.69)$$

$$c_i^b \geq 0 \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.70)$$

$$y_i^b \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, b \in B \quad (3.71)$$

Burada (3.51)-(3.52) sırasıyla (3.12) ve (3.14) ile paraleldir. Aynı ilişki (3.53)-(3.54) ve (3.31)-(3.32) arasında da söz konusudur. Ayrıca, (3.55)-(3.57), $b \in B$ omurgasındaki tüm algılayıcıların s_b sayıda veri paketini almasını garanti ederken (3.58)-(3.60) her bir omurgadaki düğümlerin kümesini tanımlamaktadır. Omurgada izin verilen akışlar (3.61)-(3.63) ile ifade edilmektedir.

NB'deki temel farklardan biri MTZ alt tur eleme kısıtlarının kullanılmamasıdır. Bunun yerine, (3.64)-(3.65), düğümlere bir birim giren akışa izin veren akış kısıtlarıdır. (3.66)-(3.68) ise $b \in B$ omurgasındaki röle düğümlerini dikkate alarak h_{ij}^b değerlerinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlar. Son olarak, (3.70)-(3.71) yeni tanımlanan karar değişkenleri için işaret kısıtlarıdır.

3.5 Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli

FB ve NB modelleri bütün sensörler arasından en fazla enerji harcayan algılayıcının enerji tüketimini en aza indirmeyi amaçlar. Bu bölümde, çok amaçlı bir optimizasyon çerçevesinde, maksimum toplam gecikme ve maksimum enerji tüketimi olmak üzere birbiriyle çelişen iki metriğin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın motivasyonu, bu metriklerin ayrı ayrı, tek başlarına veya birlikte eniyilendiği durumlarda ağ performansının değerlendirilmesidir.

Ağdaki gecikme, bir omurgadaki toplam atlama sayısı ile ifade edilmektedir. Dolayısıyla her bir $b \in B$ omurgası için toplam gecikme, $\{(i,j): i \in V, j \in W \setminus \{i\}\}$ düğüm çiftleri arasındaki toplam doğrudan iletimlerin sayısıdır. Ayrıca çok

amaçlı optimizasyon çerçevesi FB'den daha kompakt ve ölçeklenebilir olan NB üzerine kurulmuştur. Bölüm 3.5.1'de gecikme metriği dikkate alınarak NB revize edilmektedir. Ardından, Bölüm 3.5.2'de Gecikme Tabanlı (DB) MIP modelinden elde edilen Hedef Programlamaya dayalı formülasyon sunulmaktadır.

3.5.1 Gecikme tabanlı (DB) 0-1 MIP modeli

Bu bölümde NB güncellenerek Gecikme Tabanlı (DB) MIP modeli sunulmuştur. NB'deki karar değişkenlerine ek olarak yeni tanımlanan değişkenler Çizelge 3.4'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.4: DB için tanımlanan ek karar değişkenlerinin listesi.

p_{ij}^b	1 eğer (i, j) akışı $b \in B$ omurgasında kullanılıyorsa, 0 d.d. $\forall i, j \in V: i \neq j$
θ	Tüm omurgalarda meydana gelen maksimum gecikme
d_i	1 eğer $i \in V$ en fazla enerji tüketen düğüm ise, 0 d.d.

Yeni amaç fonksiyonu (3.72) ve NB'ye (3.73)-(3.77) eklenerek elde edilen DB modeli aşağıdaki gibidir:

$$\text{Minimize } \theta \quad (3.72)$$

$$\theta \geq \sum_{(i,j) \in A} p_{ij}^b \quad \forall b \in B \quad (3.73)$$

$$np_{ij}^b \geq h_{ij}^b \quad \forall i, j \in V, b \in B \quad (3.74)$$

$$h_{ij}^b \geq p_{ij}^b \quad \forall i, j \in V, b \in B \quad (3.75)$$

$$E^{max} \leq E_i + M(1 - d_i) \quad \forall i \in V \quad (3.76)$$

$$\sum_{i \in V} d_i = 1. \quad (3.77)$$

Amaç fonksiyonu (3.72), kısıt (3.73) ile aşağıdan sınırlanan tüm omurgalardaki maksimum gecikmeyi enküçükmektedir. Diğer yandan (3.74)-(3.75), p_{ij}^b değişkeninin 1 değerini alabilmesinin ancak ve ancak (i, j) akışı $b \in B$ omurgasında

kullanıldığında mümkün olduğunu göstermektedir. Ayrıca (3.16)'ya ek olarak, tüm düğümler arasında en yüksek enerji tüketimi miktarını hesaplamak için (3.76)-(3.77) eklenmiştir.

3.5.2 Hedef programlama (GP) ile çok amaçlı 0-1 MIP modeli

Hedef Programlama (GP), birden fazla amaç arasındaki ödünleşimi sağlamak için kullanılan çok kriterli bir karar verme yöntemidir [38-40]. Gecikme enküçüklemesi daha kısa iletim yollarının kullanılmasını gerektirdiğinden, BS yakınındaki algılayıcıların trafik yükünün ve dolayısıyla da enerji tüketimlerinin artmasına yol açabilir. Dolayısıyla toplam gecikmenin ve maksimum enerji tüketiminin eş zamanlı olarak enküçüklenmesi, birbiriyle çelişmektedir. Bu çalışmada

$$\widehat{G}_1 = \text{minimize } \max_{i \in V} \{E_i\} = \text{minimize } E^{max} \quad (3.78)$$

$$\widehat{G}_2 = \text{minimize } \max_{b \in B} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} p_{ij}^b \right\} = \text{minimize } \theta \quad (3.79)$$

şeklinde tanımlanan iki amaçlı optimizasyon modelini çözmek için GP kullanılmıştır. GP'nin genel motivasyonu, her bir amacın optimal değerinden ağırlıklı maksimum sapmayı enküçükleyen bir çözüm bulmaktır. Dolayısıyla GP modeli (GPM)

$$\text{Minimize } z \quad (3.80)$$

$$z \geq \gamma_i \frac{G_i - G_i^*}{G_i^*} \quad \forall i \in \{1,2\} \quad (3.81)$$

$$G_1 \geq G_1^* \quad (3.82)$$

$$G_2 \geq G_2^* \quad (3.83)$$

şeklinde dir. Burada , G_1^* ve G_2^* sırasıyla NB ve DB'nin optimal değerleridir. Dolayısıyla, γ_i parametresinin $G(i) \forall i \in \{1,2\}$ amacına atanan göreceli önem ağırlığını ifade ettiği modelde (3.81), GPM çözümünün ilgili metriklerin optimal

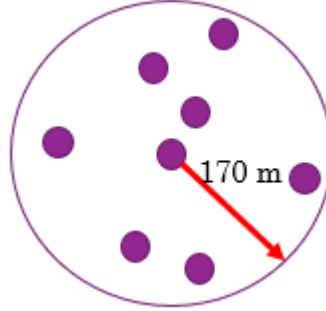
değerinden azami ağırlıklı sapma değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu değer, (3.80)'de en küçüklenmektedir. Ayrıca (3.82)-(3.83) ile her bir metriğin GPM çözümündeki değerinin o metrik tek başına en iyilendiğinde elde edilecek optimal değerinden daha iyi olamayacağı belirtilmektedir. GPM'deki temel motivasyon, z 'yi en aza indirerek G_1 ve G_2 arasındaki ödünleşmeyi dengelemektir.



4. ANALİZLER

4.1 Test Kümeleri

Bu bölüm tez kapsamında yapılan testlerin sonuçlarını ve bunlara dayanarak yaptığımız analizleri kapsar. Testler, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi 170 metre yarıçapına sahip bir diske belli sayıda algılayıcının rastgele saçıldığı topolojilerde alınmıştır. Algılayıcılar, düzgün rastgele dağılım kullanılarak bölgeye yerleştirilmiş ve PYTHON kullanılarak her ağ boyutu $|V| \in \{20,30,40,50,60,70\}$ için 50’şer adet rastgele örnek ağ topolojileri oluşturulmuştur. Her $|V|$ değeri için ilgili 50 rastgele örneğin ortalama değeri dikkate alınmış ve böylece sonuçlarda topoloji kaynaklı olarak ortaya çıkabilecek taraflılığın giderilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca tüm testler 64 GB RAM, 12 çekirdekli CPU ve 100 GB disk alanı olan sanal bir bilgisayarda alınmıştır. Tüm matematiksel modeller PYTHON’da kodlanmış ve ILOG OPL Studio ile birlikte kullanılmıştır.



Şekil 4.1: Disk topolojisi.

4.2 Alternatif MIP Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi

İlk olarak FB ve NB çözüm sürelerine göre karşılaştırılmıştır. Her iki modelde de çoklu omurgaya izin verilmesine karşın, $N_b \geq 2$ olduğunda, FB ile üç saatlik zaman sınırı içinde hiç bir örnek için optimal çözüm bulunamamıştır. Dolayısıyla, bu bölümdeki bütün karşılaştırmalarda tek omurgalı iletim farklı ağ boyutlarında $|V| \in \{20, 30, 40, 50, 60\}$ için yapılmıştır. Her iki model de bütün örneklerde aynı optimal sonuçları bulmuştur ki böylece iki modelin de geçerli olduğu teyit edilmiştir. Ayrıca

tüm testlerde FB'nin çözüm süresi 30 saniyenin altındayken, NB için bu değer 1 saniyenin altındadır.

Diğer yandan, çoklu omurga kullanımının ağ performansına etkisini incelemek amacıyla NB modelinde $2 \leq N_b \leq 6$ alınarak testler yapılmıştır. Alınan sonuçların ayrıntılı analizleri gelecek alt bölümlerde verilecektir. Burada sadece ağ boyutu $|V| = 60$ olduğunda ortalama çözüm sürelerinin Çizelge 4.1'deki gibi değiştiği gösterilmektedir. NB'nin artan ağ büyüklüğü ve omurga sayısı ile FB'ye kıyasla daha ölçeklenebilir olduğu görüldüğünden testlere NB ile devam edilmiştir.

Çizelge 4.1: NB ile ortalama çözüm süreleri ($|V| = 60$).

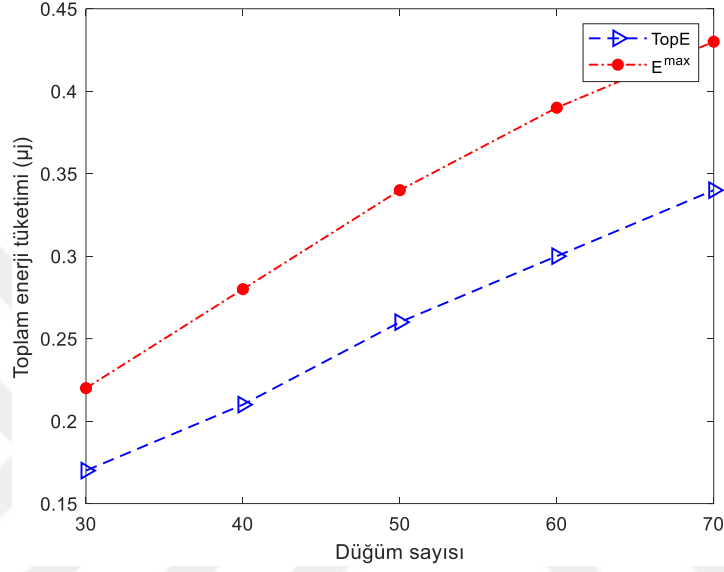
N_b	2	3	4	5	6
Çözüm süresi (sn)	20	47	85	152	613

4.3 Alternatif Amaç Fonksiyonlarının Karşılaştırmalı Analizi

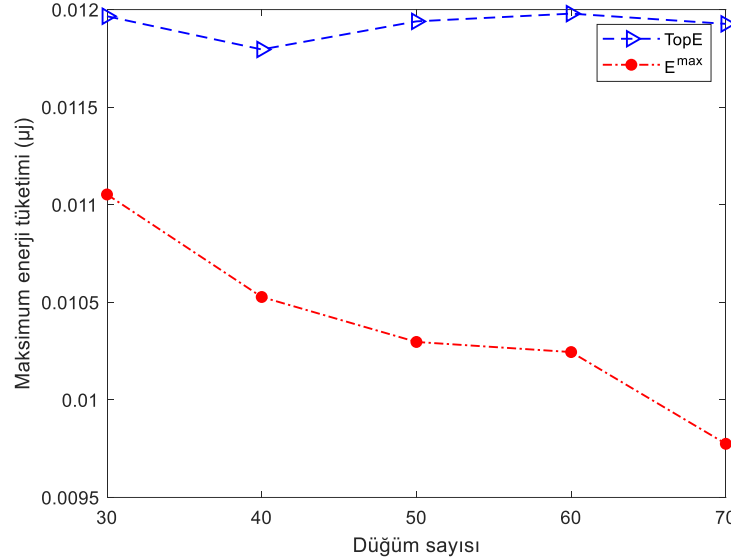
Bu bölümde, tek omurga olduğu durum için toplam enerji ve maksimum enerji tüketimi enküçükleme problemleri NB modeli kullanılarak karşılaştırılmıştır. Temel olarak, her bir metriğe göre iki çözümün performansı $|V| \in \{30, 40, 50, 60, 70\}$ boyutlu ağlar için mukayese edilmiştir. Şekil 4.2, her ağ boyutu için ilgili amaç fonksiyonu değerlerinin ortalamalarını göstermektedir. Burada $TopE$ ve E^{max} etiketleri amaç fonksiyonlarının sırasıyla $\min \sum_{i \in V} E_i$ ve $\min \max_{i \in V} E_i$ olarak belirlendiği modellerin çözümlerini temsil etmektedir.

Beklenildiği gibi, her model amaç fonksiyonunda ele aldığı metriğe göre yapılan karşılaştırmada diğerinden daha iyi performans göstermiştir. Bu nedenle daha anlamlı bir analiz yapmak adına, görel performanslardaki değişim incelenmiştir. Buna göre, Şekil 4.2.a, artan ağ büyüklüğü ile toplam enerji tüketimindeki değişimin her iki model için de benzer bir eğilim izlediğini göstermektedir. Özetlemek gerekirse, E^{max} ile $TopE$ 'ye kıyasla toplam enerji tüketimi ortalama %30 daha yüksektir. Bu oran 30 düğümlü örneklerde %29 iken, 70 düğümlü örneklerde ise %26'dır. Öte yandan, Şekil 4.2.b'de tamamen farklı bir durum söz konusudur. $TopE$ için maksimum enerji tüketimi büyüklüğü artsa bile hemen hemen aynı kalırken, E^{max} olduğunda ağ boyutu arttıkça maksimum enerji tüketimi önemli ölçüde iyileşmektedir. Burada, E^{max}

olduğunda maksimum enerji tüketimi ortalamada %13 daha azdır. Bu oran 30 düğümlü ve 70 düğümlü örneklerde sırasıyla %8 ve %18'dir. Yapılan analizlerin anlam kazanması için maksimum enerji tüketimini enküçüklemenin, enerjisini tüketecek ilk algılayıcının ömrünü enbüyüklemek anlamına geldiğini tekrar vurgulamak gerekir. Dolayısıyla E^{max} ile enerji tüketimi daha etkin bir şekilde dengelenebildiğinden ağ ömrünün $TopE$ 'ye kıyasla daha iyi olduğu görülmektedir.



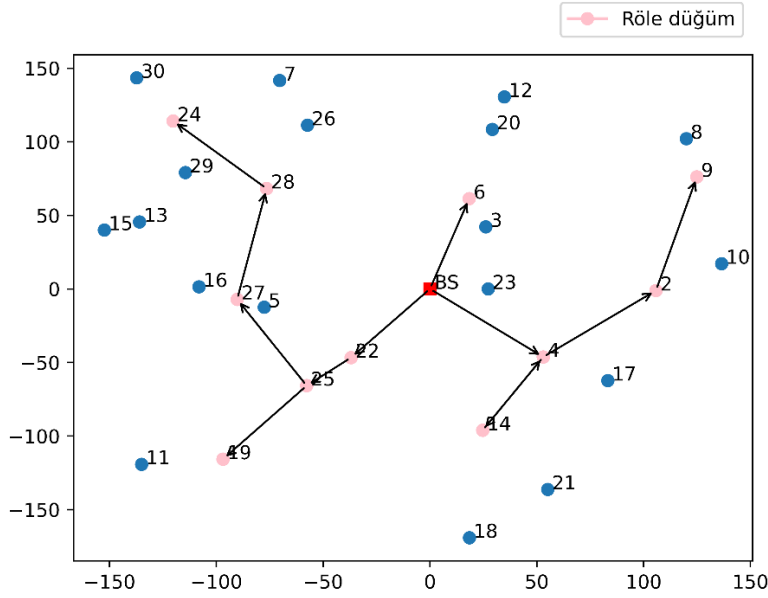
(a) $|V| \in \{30, 40, 50, 60, 70\}$ için ortalama toplam enerji tüketimi



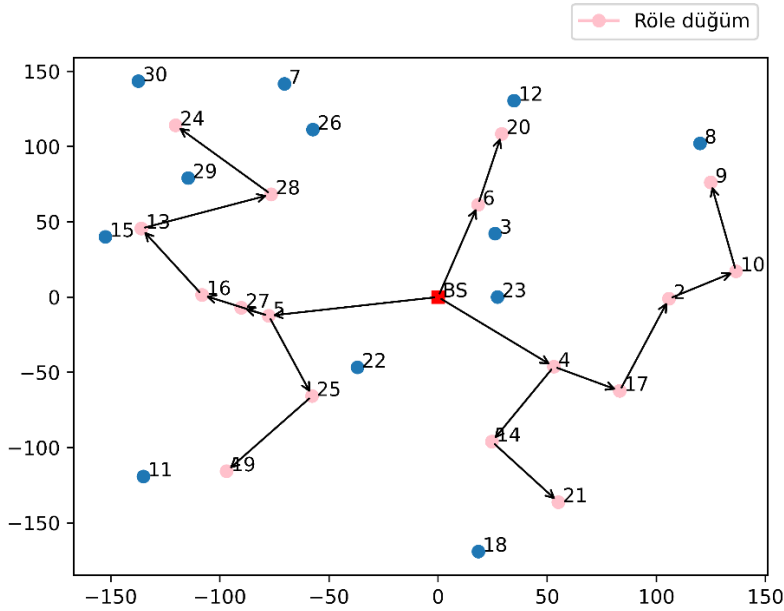
(b) $|V| \in \{30, 40, 50, 60, 70\}$ için ortalama maksimum enerji tüketimi

Şekil 4.2: Farklı ağ boyutlarında toplam ve maksimum enerji tüketimlerindeki değişimler.

Son olarak her iki amaç fonksiyonu ile elde edilecek omurga yapısının nasıl farklılaşabildiğini daha iyi gösterebilmek adına 30 düğümlü örnek bir topoloji için elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'teki gibi görselleştirilmiştir. Buna göre ortada bulunan BS'den çıkan veri, pembe renkli röle düğümler aracılığıyla diğer mavi renkli yaprak düğümlere iletilir.



(a) $\min \sum_{i \in V} E_i$ ($TopE$)



(b) $\min \max_{i \in V} E_i$ (E^{max})

Şekil 4.3: Rastgele bir örnek topolojide $TopE$ ve E^{max} ile elde edilen omurga yapıları.

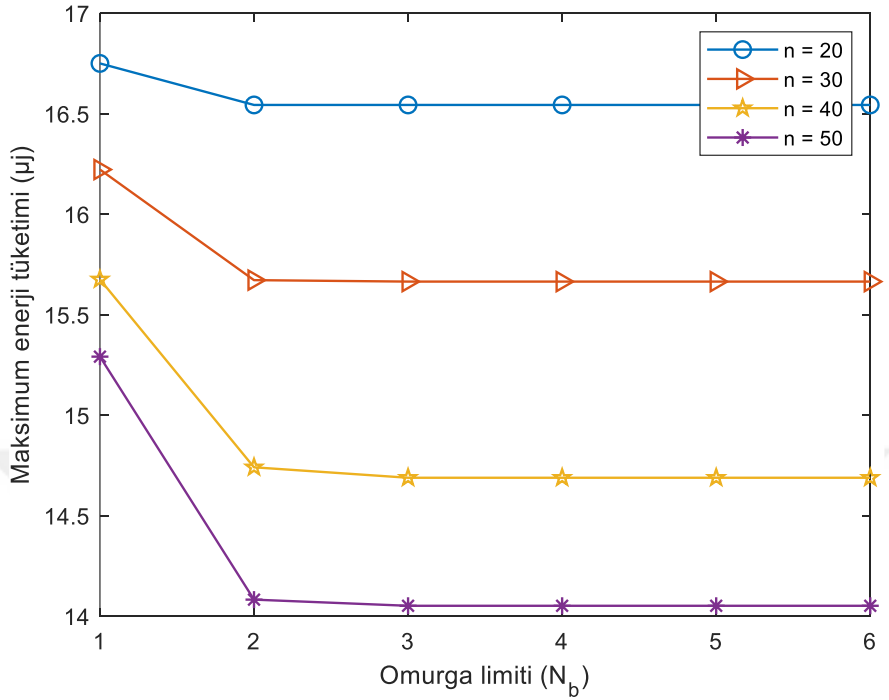
Öncelikle Şekil 4.3.a'da *TopE* çözümü gösterilmektedir. Bu durumda toplam enerji tüketimi enküçüklenirken, düğümlerin enerjilerini hangi sırada tükettikleri gözetilmediğinden veri dağıtım görevini üstlenen röle sensörlerin sayısı, E^{max} ile elde edilen omurgaya göre (Şekil. 4.3.b) daha azdır. Bunun sebebi E^{max} kullanıldığında toplam enerji tüketimi yerine ağda enerjisini ilk önce bitiren düğümün enerji tüketiminin gözetilmesi ve dolayısıyla da enerjinin daha dengeli kullanılması amacıyla röle düğüm sayısının artırılmasıdır. Bu sayede enerjisini daha önce tüketebilecek düğümlerin yani olası sıcak noktaların üstündeki enerji tüketimi yükü azaltılmakta ve ağ ömrü uzatılmaktadır.

4.4 Omurga Sayısının Etkisi

Bu bölümde, BS'nin farklı omurgalar üzerinden iletim yapmasına olanak sağlanmaktadır. Buna göre BS, röle düğümler aracılığıyla ağdaki tüm algılayıcılara veri paketlerini ileterek tüme gönderim gerçekleştirirken en fazla N_b tane farklı omurga kullanabilmektedir. Bu bölüme yapılan analizlerde, bahsedilen esnekliğin ağdaki maksimum enerji tüketimi üzerindeki etkisi incelenerek marjinal iyileşme oranlarına göre omurga sayısı için makul bir sınır değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bölüm 4.2'de de belirtildiği üzere, FB omurga limitini ifade eden N_b 'nin birden büyük olduğu durumlarda hiçbir örnek için çözülemiyorken NB'de limitin 6 olduğu durumlarda dahi sonuç alınabilmektedir. Bu sebeple analizlere NB ile devam edilmiştir. Sabit büyüklükte bir diske $|V| \in \{20, 30, 40, 50\}$ sensörün rastgele saçıldığı her büyüklük için rastgele 50'şer örnek oluşturulmuş ve her $N_b \in \{1, \dots, 6\}$ değeri için NB çözdürülmüştür. Artan omurga sayısı limiti ile ağdaki maksimum enerji tüketiminin değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. $N_b = 1$ olduğu örneklem kümelerinin ağdaki maksimum enerji tüketimi, $N_b = 2$ olduğunda ortalama olarak $|V| \in \{20, 30, 40, 50\}$ için sırasıyla %1,25, %3,39, %5,99, ve %7,91 azalmıştır. Bununla birlikte, $N_b = 3$ 'e çıkarıldığı zaman tüm ağ boyutlarında $N_b = 2$ olduğu duruma göre maksimum enerji tüketiminde bir azalma görülmemiştir. Aynı şekilde $N_b = \{4, 5, 6\}$ olduğu durumlarda da maksimum enerji tüketimindeki azalma %0'dır. Yapılan bu testlere göre, ağda maksimum enerji tüketimine yol açan düğüm üzerindeki yükü azaltmak için ağda yalnızca iki omurga yapısının kullanılması yeterlidir. Başka bir

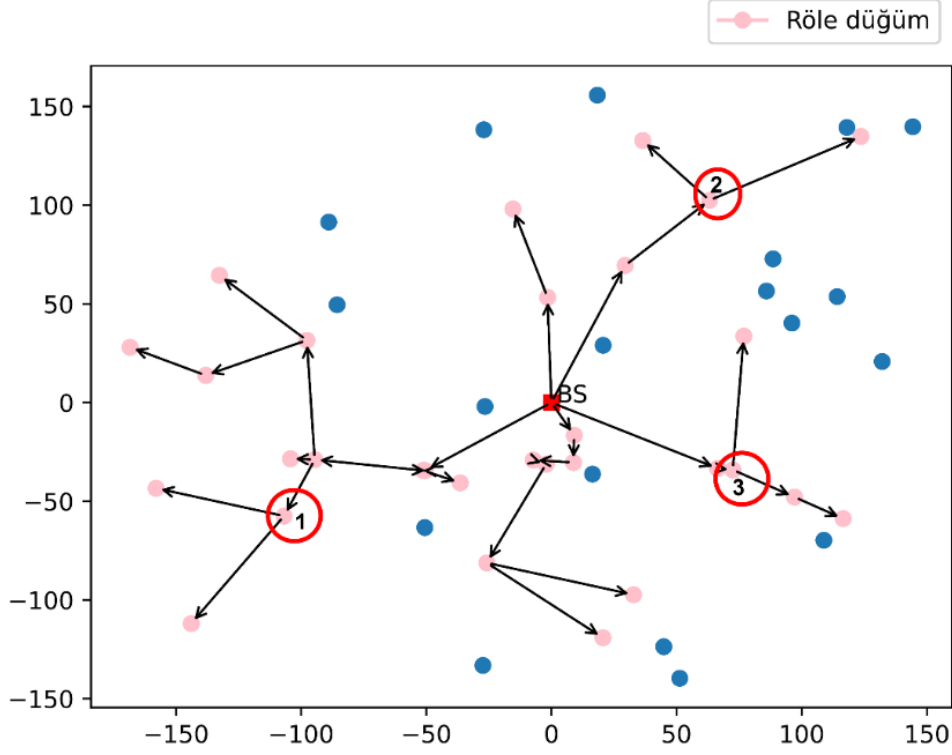
deyişle, kullanılacak omurga sayısının ikiden fazla olduğu durumda ağdaki maksimum enerji tüketiminin daha fazla azaltılamayacağı, yani $N_b = 2$ 'nin en makul sınır olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.4: Farklı N_b değerleri için maksimum enerji tüketimi.

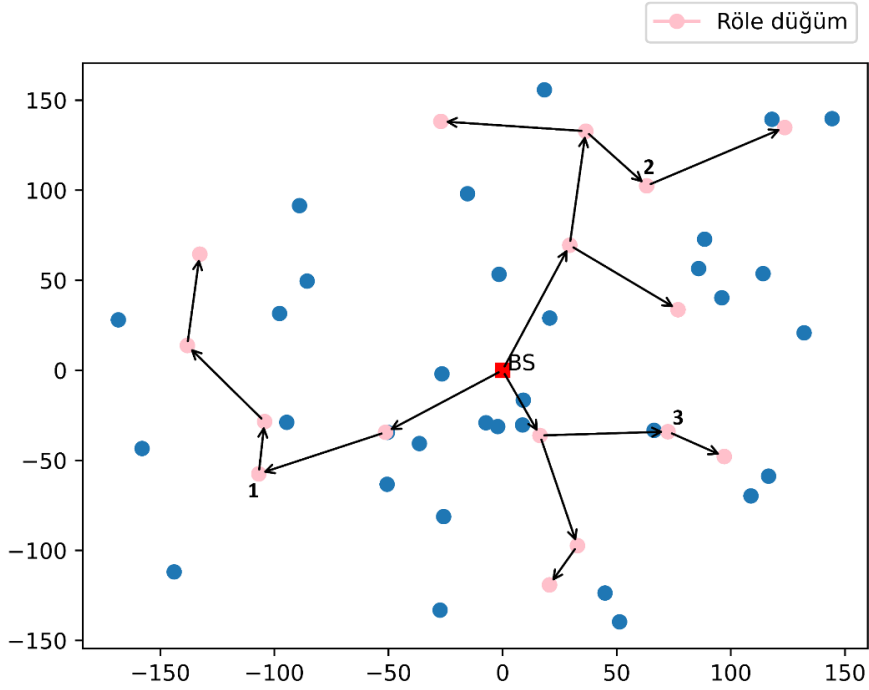
Ek olarak, tek omurgalı durumdan iki omurgalı ilettime geçildiğinde ağın nasıl bir davranış gösterdiğini incelemek için bir ağ topolojisi örneği incelenmiştir. Bu noktada çok omurgalı iletimin etkisinin %7,91 ile en belirgin şekilde gözleendiği örnekler, 50 sensörlü olanlardır. Buna bağlı olarak Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da N_b sayısına göre ağın davranışını gösteren 50 düğümlü bir ağ topolojisi örneği verilmiştir. Seçilen bu örnek, 50 rastgele örneklem kümesi içerisinde ağdaki maksimum enerji tüketiminin %29 oranında iyileştiği ve dolayısıyla da en büyük azalma oranına sahip olan beş topolojiden birisidir. Şekil 4.5'te $N_b = 1$ iken, yani ağda omurga değişimine izni verilmediğinde, oluşan omurga yapısı gösterilirken; Şekil 4.6.a ve Şekil 4.6.b'de ise sırasıyla $N_b = 2$ iken tüm ağ ömrü boyunca omurga yapısında iki değişiklik yapmış ağ topolojisi örneğinin kullandığı birinci ve ikinci omurga yapısı verilmiştir. Burada $N_b = 1$ iken maksimum enerji tüketimine yol açan sıcak noktalar 14.59 µJ enerji harcayan 1, 2 ve 3 numaralı algılayıcı düğümlerdir. Omurga yapısının iki defa değiştirilmesine izin verilen $N_b = 2$ durumunda ise bu düğümlerin harcadıkları enerji

miktarları sırasıyla 9.4 μJ , 10.32 μJ ve 10.32 μJ olmuştur. Dolayısıyla da üzerlerindeki enerji tüketimi yükü yine sırasıyla %36, %29 ve %29 oranında düşürülebilmektedir. Ayrıca Şekil 4.5'te hepsi röle düğüm olan bu sıcak noktaların bir omurgada röle düğüm ise diğer omurgada yaprak düğüm olmaları sayesinde enerji tüketiminin dengelendiği gözlemlenmektedir. Şekil 4.6.a'da röle düğüm olan 1, 2 ve 3 numaralı sıcak noktalar Şekil. 4.6.b'de görüldüğü üzere yaprak düğüm olmuşlardır.

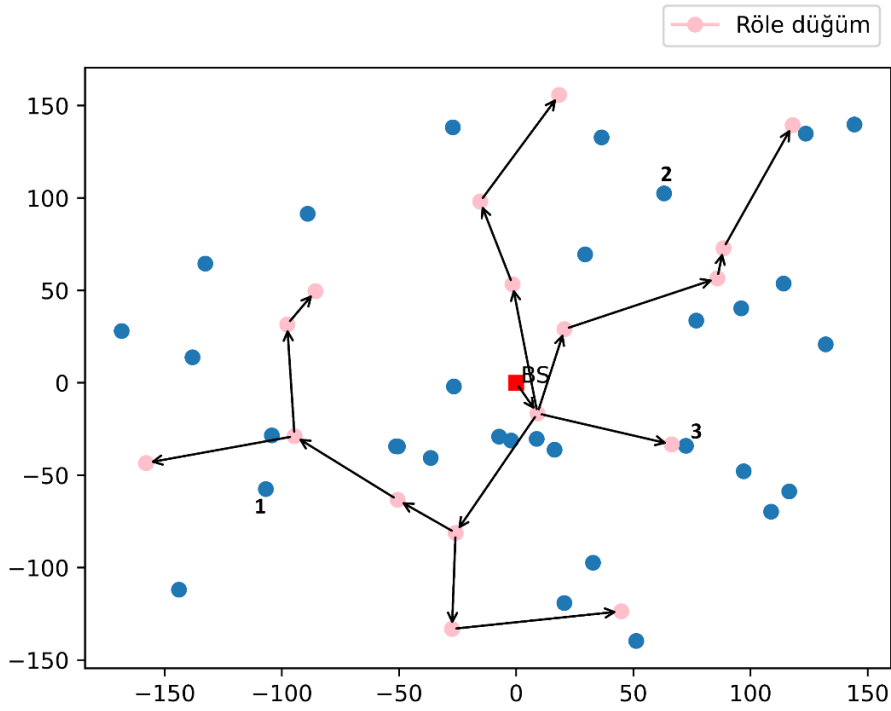


Şekil 4.5: 50 düğümlü bir ağ topolojisinin tek omurgalı durumda davranışı ($N_b = 1$, $s_1 = 1440$).

Ağda $M = 1440$ adet veri paketi tüm algılayıcılara iletilmektedir. $N_b = 1$ olduğu durumda ağdaki röle düğümleri bütün veri paketlerinin ağın geri kalanına iletiminde etkin görev almak durumundadırlar. Fakat $N_b = 2$ iken bu sıcak noktalar 1440 adet veri paketinin yaklaşık yarısını ($s_1 = 733$) iletirken geri kalanının ($s_2 = 707$) iletiği omurgada yaprak düğüm olarak yer almaktadırlar. Bu şekilde ağda bir süre röle düğüm görevi üstlenip bir süre yaprak düğüm olarak enerji sarfiyatları dengelenmiştir.



(a) Birinci omurga, $N_b = 2$, $s_1 = 733$



(b) İkinci omurga, $N_b = 2$, $s_2 = 707$

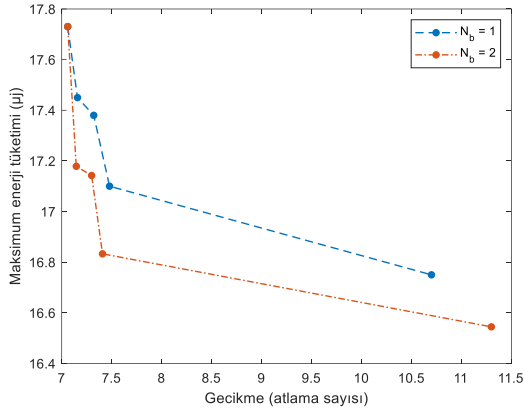
Şekil 4.6: 50 düğümlü bir ağ topolojisinin iki omurgalı durumda davranışı ($N_b = 2$, $s_1 = 733$, $s_2 = 707$).

4.5 Maksimum Enerji Tüketimi ve Uçtan Uca Gecikme Metrikleri Arasındaki Ödünleşimin Analizi

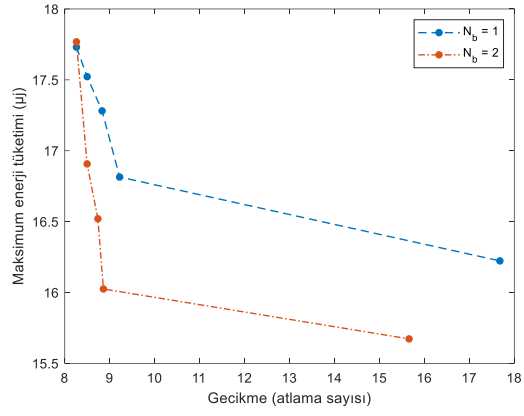
Bu bölümde birbirleriyle çelişen maksimum enerji tüketimi ve gecikme metriklerinin GP kullanılarak enküçüklenmesi ele alınmıştır. Bu metriklere $\gamma_i \in \{0; 0,25; 0,50; 0,75; 1\}$ için $\{\gamma_1, \gamma_2: \gamma_1 + \gamma_2 = 1\}$ olacak şekilde amaç fonksiyonunda $\{\gamma_1, \gamma_2\}$ ağırlıkları verilerek amaçlar arasındaki maksimum orantılı sapma enküçüklenmiştir. Sabit bir diske $|V| \in \{20, 30, 40, 50\}$ algılayıcının rastgele saçıldığı 50'şer örneklem ile belirtilen ağırlık kümesine göre kullanılacak omurga sayısının 1 ve 2 olduğu durumlarda maksimum enerji tüketimi ve gecikmenin değişimi Şekil 4.7.a, Şekil 4.7.b, Şekil 4.7.c ve Şekil 4.7.d'de gösterildiği gibidir.

Şekil 4.7 ağ boyutundan ve kullanılabilir azami omurga sayısından bağımsız olarak, γ_1 ağırlığı 0,75'ten fazla olduğunda toplam gecikmenin önemli ölçüde arttığını gösterir. $N_b = 1$ iken γ_1 ağırlığı 0'dan 0,75'e yükseltildiğinde, toplam gecikme %10 artarken maksimum enerji tüketimi %6 azalmaktadır. Ancak γ_1 0,75'ten 1'e çıkarıldığında gecikme ve E^{max} 'ta sırasıyla %108 artış ve %3 azalma gözlemlenmektedir. Benzer şekilde $N_b = 2$ iken γ_1 ağırlığı 0'dan 0,75'e yükseltildiğinde, toplam gecikme %6 artarken maksimum enerji tüketimi %11 azalmaktadır. Bununla birlikte γ_1 'in 0,75'ten 1'e çıkarılmasıyla enerjide yalnızca ortalama %2 verim elde edilmesi gecikmenin ortalama %90 artmasına yol açmıştır.

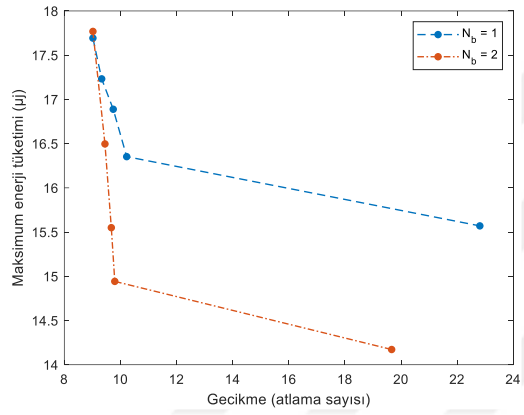
Öte yandan, γ_1 ağırlığı 0'dan 1'e çıkarıldığında, yani sadece gecikmenin enküçüklendiği durumdan maksimum enerji tüketiminin enküçüklendiği duruma geçildiğinde, tek omurgalı ağda maksimum enerji tüketimi %9 azalırken toplam gecikme %131 artmaktadır. Ancak $N_b = 2$ için, toplam gecikmede %101'lik bir artışa karşılık maksimum enerjide %13'lük bir düşüş gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, sadece maksimum enerjiyi en aza indirmeye kıyasla daha adil bir seçim olan $(\gamma_1; \gamma_2) = (0,75; 0,25)$ ortak oranı önerilmiştir. Bunun nedeni $N_b = 1$ için %3, $N_b = 2$ için %2 daha fazla enerji tüketimine karşılık; gecikme oranında $N_b = 1$ için %121, $N_b = 2$ için ise %95 düşüş sağlanmasıdır.



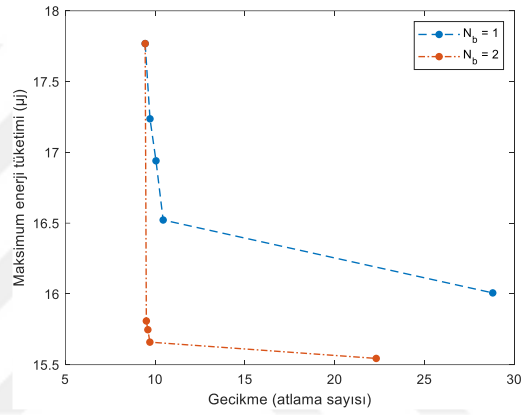
(a) $n = 20$



(b) $n = 30$



(c) $n = 40$

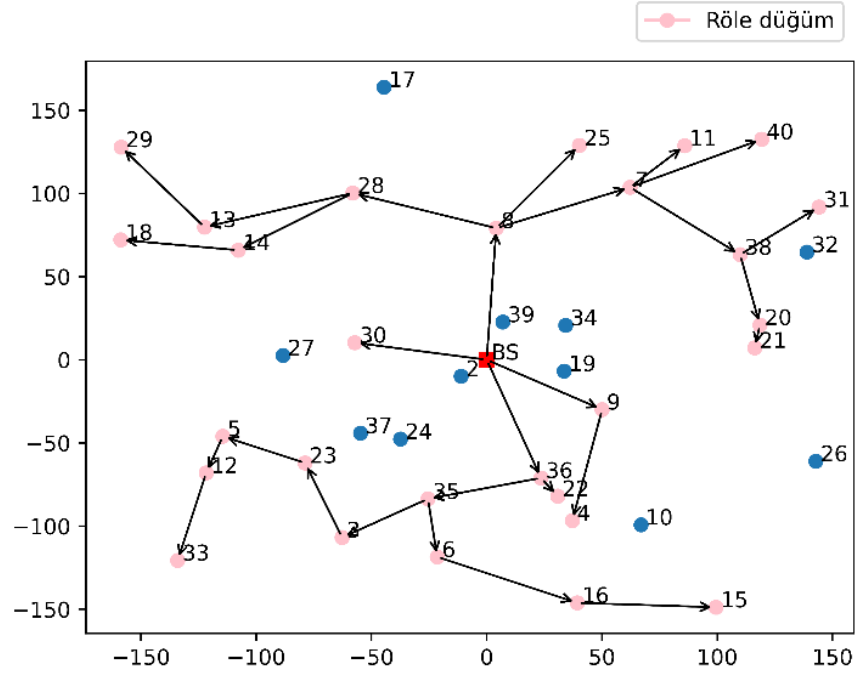


(d) $n = 50$

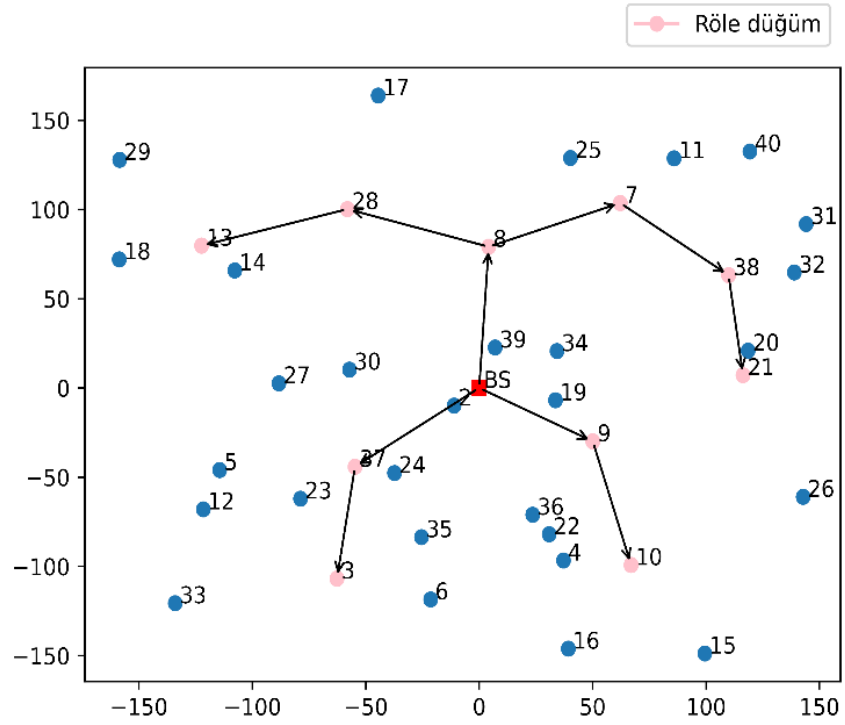
Şekil 4.7: (a) $n = 20$, (b) $n = 30$, (c) $n = 40$, (d) $n = 50$ ağ boyutlarında maksimum enerji tüketimi ve uçtan uca gecikmenin ödünleşmesi.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da, iki rastgele 40 düğümlü ağ örneğine dayalı olarak maksimum enerji tüketimini tek başına enküçülemek yerine GPM'yi $(\gamma_1; \gamma_2) = (0,75; 0,25)$ ile çözdüğümüzde omurganın nasıl değiştiği örneklendirilmiştir. Analışılır olması için her iki örnekte de tek omurga durumu sunulmuştur.

Şekil 4.8.a'da, G_1 'i yani maksimum enerji tüketimini en aza indiren optimal çözüm bulunmaktadır. Bu omurgada meydana gelen toplam gecikme 28, maksimum enerji tüketimi ise $14,9 \mu\text{J}$ 'dur. Bununla birlikte, ağırlıkların $(\gamma_1; \gamma_2) = (0,75; 0,25)$ olarak alındığı Şekil 4.8.b'de gecikme %64 ile 10'a düşerken, maksimum enerji tüketimi sadece %4 artarak $15,46 \mu\text{J}$ 'ye çıkmaktadır.



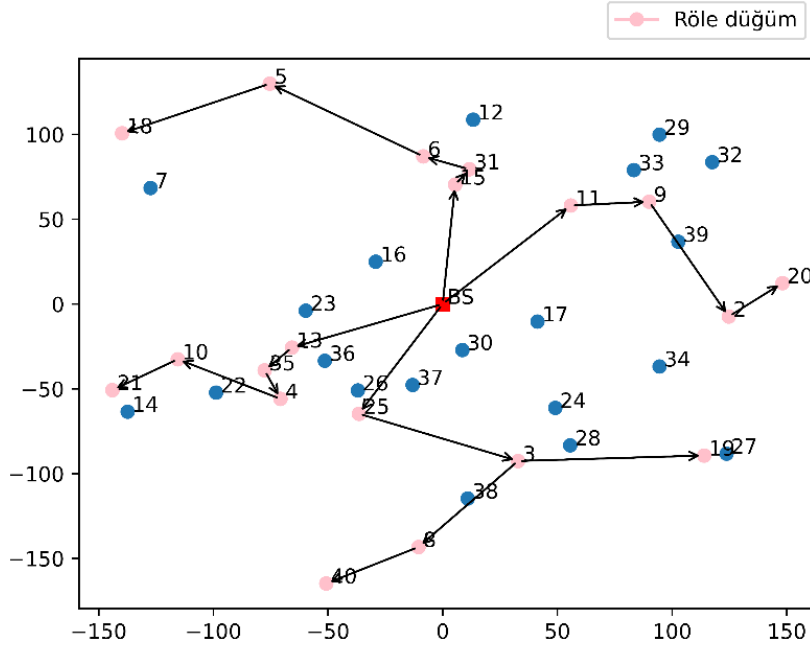
(a) $\gamma_1 = 1$



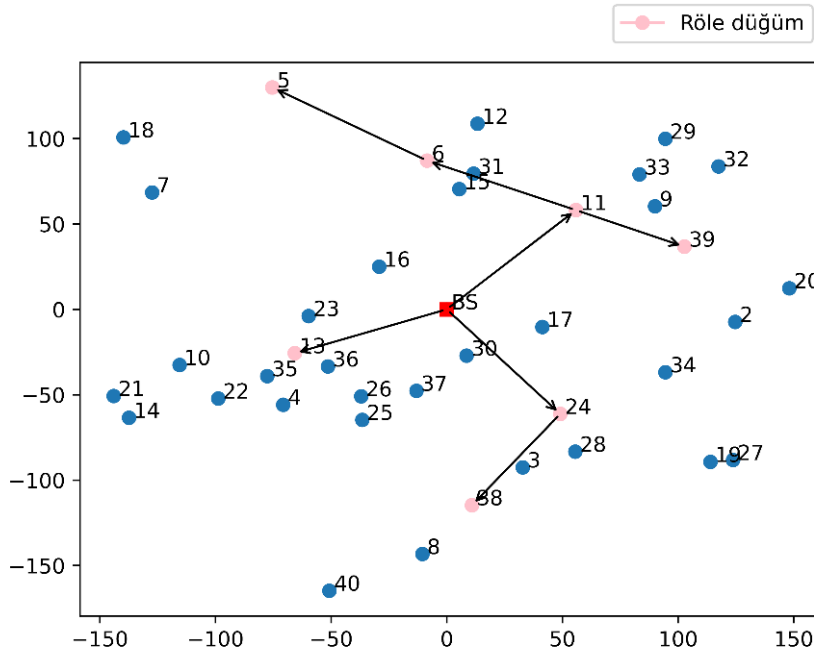
(b) $\gamma_1 = 0.75$

Şekil 4.8: Birinci örnek ($N_b = 1$ için $\gamma_1 = 1$ ve $\gamma_1 = 0.75$ ile elde edilen omurga yapıları).

Benzer şekilde Şekil 4.9.b'de toplam gecikme 20'den 7'ye %65 azalmasına rağmen, her iki omurgada maksimum enerji tüketimi 17,77 μJ 'dir.



(a) $\gamma_1 = 1$



(b) $\gamma_1 = 0.75$

Şekil 4.9: İkinci örnek ($N_b = 1$ için $\gamma_1 = 1$ ve $\gamma_1 = 0.75$ ile elde edilen omurga yapıları).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında uçtan uca gecikme ve maksimum enerji tüketimi metrikleri birlikte ve ayrı ayrı değerlendirilmiştir. İlk olarak, maksimum enerji tüketimini en aza indirmek için çoklu omurga üzerlerinden BS'nin tüme gönderim yapmasına izin verilen iki alternatif 0-1 MIP modeli önerilmiştir. NB formülasyonun ağ boyutuyla iyi ölçeklendiği gözlemlenmiştir. Ardından, birbiriyle çelişen toplam uçtan uca gecikme ve maksimum enerji kaybı metrikleri bir hedef programlama yaklaşımıyla eniyilenmiştir. Bu şekilde, sadece iki metrik arasındaki ödünleşimi gözlemlemekle kalmayıp, her iki metrik için de yeterince iyi çözümler sunulmuştur. Analizler çok sayıda testin sonuçlarına dayandırılarak değerlendirmelerin genelleştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın literatüre önemli katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Gerçek hayat uygulamalarına dayalı bir enerji modeli önerilmiştir. Bu amaçla yol kaybını ifade etmek adına veri paketlerinin Log-normal Gölgeleme Modeline göre iletildiği varsayılmıştır. Ayrıca algılayıcıların veri iletimi için en uygun güç seviyesini belirleyebilmesi amacıyla Mica2 model düğümlerin enerji dağıtım özelliklerine dayalı olarak enerji parametreleri belirlenmiştir.
- Kullandıkları karar detayı düzeyinde farklılık gösteren FB ve NB olmak üzere iki alternatif 0-1 MIP modeli oluşturulmuştur. NB'nin ağ boyutu ve izin verilen omurga sayısı ile daha iyi ölçeklendiği analiz edilmiştir.
- Toplam ve maksimum enerji tüketimini enküçüklemenin birbiriyle ilişkisi araştırılmıştır. Analizler, bunların eşdeğer problemler olmadığını göstermiştir. Maksimum enerji minimizasyonunun FSD ile ömür maksimizasyonu için daha güvenilir ve anlamlı bir çaba olduğu sonucuna varılmıştır.
- Çoklu omurga tasarımının ağ ömrüne katkısı araştırılmıştır. Böylece, BS bir yerine iki omurga üzerinden tüme gönderim yaptığı anda ağ ömrünün ortalama %7,91 arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, çoklu omurganın düğümler arasında dengeli enerji dağılımı sağlamasıdır. Ancak daha fazla omurga

kullanıldığında daha fazla iyileşme sağlanamadığından, iki omurga kullanımının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

- Hedef programlama çerçevesinde maksimum enerji tüketimi ve uçtan uca gecikme metrikleri arasındaki ödünleşim, bu metriklerin optimal değerlerinden maksimum ağırlıklı görel sapmasını en aza indirilerek değerlendirilir. Bunun için beş farklı ağırlık vektörü varsayılmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:
 - Uçtan uca gecikmeyi dikkate almadan maksimum enerji tüketimi enküçüklemesi ağda ciddi miktarda gecikme meydana getirerek enerji verimli çözümlere yol açar. Yani, ortalama gecikme değerleri, $N_b = 1$ ve $N_b = 2$ için optimal gecikme değerlerinden sırasıyla %131 ve %101 daha fazladır.
 - Toplam gecikmeyi enküçüklemek, sırasıyla $N_b = 1$ ve $N_b = 2$ için karşılık gelen optimal değerlerden sırasıyla %9 ve %13 daha yüksek maksimum enerji kaybı olan omurgalara yol açmıştır.
 - Maksimum enerji tüketimi enküçüklemesine 3 kat daha fazla öncelik verildiğinde, her iki metrikte de tatmin edici derecede iyi olan omurgalar elde edilmiştir.

Çalışmanın devamı olarak gelecekte ele alınabilecek konular ve öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Bu çalışmada kullanılan karasal ağ topolojileri yerine ortam değişikliği yapılarak su altı ağlarında uygulamalar yapılabilir.
- Ağ davranışını daha iyi incelemek için matematiksel simülasyon kullanılabilir.
- Tüme gönderim iletişim kurgusuna ek olarak çoğa gönderim ve tekli gönderim kurguları kullanılabilir.
- Daha büyük boyutlu ağları analiz etmek için sezgisel algoritmalar, makine öğrenmesi, derin öğrenme gibi yöntemler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D.** (2008). Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12), 2292-2330.
- [2] **Correll, J. T., & McNaughton, J. T.** (2004). Igloo white. *Air Force Magazine*, 87(11), 56-61.
- [3] **Kandris, D., Nakas, C., Vomvas, D., & Koulouras, G.** (2020). Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey. *Applied System Innovation*, 3(1), 14.
- [4] **Cayirpunar, O., Kadioglu-Urtis, E., & Tavli, B.** (2015). Optimal base station mobility patterns for wireless sensor network lifetime maximization. *IEEE Sensors Journal*, 15(11), 6592-6603.
- [5] **Altın-Kayhan, A., & Şendil, M.** (2016). Optimal path selection under different data: Redundancy policies for energy efficient wireless sensor networks. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 54(2), 121-146.
- [6] **Ekmen, M., & Altın-Kayhan, A.** (2017). Reliable and energy efficient wireless sensor network design via conditional multi-copying for multiple central nodes. *Computer Networks*, 126, 57-68.
- [7] **Yildiz, H. U., Kurt, S., & Tavli, B.** (2018). Comparative analysis of transmission power level and packet size optimization strategies for WSNs. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 2264-2274.
- [8] **Tekbiyik, N., & Uysal-Biyikoglu, E.** (2011). Energy efficient wireless unicast routing alternatives for machine-to-machine networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34(5), 1587-1614.
- [9] **Tavli, B.** (2006). Broadcast capacity of wireless networks. *IEEE Communications Letters*, 10(2), 68-69.
- [10] **Royer, E. M., & Toh, C. K.** (1999). A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE personal communications*, 6(2), 46-55.
- [11] **Durresti, A., Paruchuri, V. K., Iyengar, S. S., & Kannan, R.** (2005). Optimized broadcast protocol for sensor networks. *IEEE transactions on Computers*, 54(8), 1013-1024.
- [12] **Wieselthier, J. E., Nguyen, G. D., & Ephremides, A.** (2000, March). On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064) (Vol. 2, pp. 585-594)*. IEEE.

- [13] **Egecioglu, O., & Gonzalez, T.** (2001, August). Minimum-energy broadcast in simple graphs with limited node power. In Proceedings of IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS 2001) (Vol. 338).
- [14] **Kozat, U. C., Kondylis, G., Ryu, B., & Marina, M. K.** (2001, June). Virtual dynamic backbone for mobile ad hoc networks. In ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No. 01CH37240) (Vol. 1, pp. 250-255). IEEE.
- [15] **Čagalj, M., Hubaux, J. P., & Enz, C.** (2002, September). Minimum-energy broadcast in all-wireless networks: NP-completeness and distribution issues. In Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking (pp. 172-182).
- [16] **Cartigny, J., Simplot, D., & Stojmenovic, I.** (2003, March). Localized minimum-energy broadcasting in ad-hoc networks. In IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428) (Vol. 3, pp. 2210-2217). IEEE.
- [17] **Yuan, D., Bauer, J., & Haugland, D.** (2008). Minimum-energy broadcast and multicast in wireless networks: An integer programming approach and improved heuristic algorithms. *Ad Hoc Networks*, 6(5), 696-717.
- [18] **Montemanni, R., & Mahdabi, P.** (2011). A linear programming-based evolutionary algorithm for the minimum power broadcast problem in wireless sensor networks. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 10(2), 145-162.
- [19] **Wu, S., Niu, J., Chou, W., & Guizani, M.** (2016). Delay-aware energy optimization for flooding in duty-cycled wireless sensor networks. *IEEE transactions on wireless communications*, 15(12), 8449-8462.
- [20] **Breschi, K., & Bernard, J.** (2017, July). Construction of a minimum energy broadcast backbone with bounded delay in heterogeneous wireless sensor networks. In 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) (pp. 1306-1311). IEEE.
- [21] **Cheng, L., Niu, J., Luo, C., Shu, L., Kong, L., Zhao, Z., & Gu, Y.** (2018). Towards minimum-delay and energy-efficient flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks. *Computer Networks*, 134, 66-77.
- [22] **Shu, T., Liu, W., Wang, T., Deng, Q., Zhao, M., Xiong, N. N., ... & Liu, A.** (2019). Broadcast based code dissemination scheme for duty cycle based wireless sensor networks. *IEEE Access*, 7, 105258-105286.
- [23] **Cao, Z., Zheng, X., Ma, Q., & Miao, X.** (2021, July). COFlood: Concurrent Opportunistic Flooding in Asynchronous Duty Cycle Networks. In 2021 18th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON) (pp. 1-9). IEEE.
- [24] **Ferdous, C. N., Karimi, L., & Gaur, D. R.** (2022, January). Integer Programs for Contention Aware Connected Dominating Sets in Wireless Multi-Hop Networks. In WCNC (pp. 2142-2147).

- [25] **Zhang, W., Liang, J., & Liang, X.** (2021). On the computation of virtual backbones with fault tolerance in heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- [26] **Das, A. K., Marks, R. J., El-Sharkawi, M., Arabshahi, P., & Gray, A.** (2003, December). MDLT: a polynomial time optimal algorithm for maximization of time-to-first-failure in energy constrained wireless broadcast networks. In *GLOBECOM'03. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No. 03CH37489)* (Vol. 1, pp. 362-366). IEEE.
- [27] **Kang, I., & Poovendran, R.** (2003, May). Maximizing static network lifetime of wireless broadcast ad hoc networks. In *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03.* (Vol. 3, pp. 2256-2261). IEEE.
- [28] **Cheng, M. X., Sun, J., Min, M., & Du, D. Z.** (2003, April). Energy-efficient broadcast and multicast routing in ad hoc wireless networks. In *Conference Proceedings of the 2003 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2003.* (pp. 87-94). IEEE.
- [29] **Deng, G., & Gupta, S. K.** (2006, November). WSN19-1: Maximizing Broadcast Tree Lifetime in Wireless Ad Hoc Networks. In *IEEE Globecom 2006* (pp. 1-5). IEEE.
- [30] **Montemanni, R.** (2009, January). Maximum lifetime broadcasting topologies in wireless sensor networks: advanced mathematical programming models. In *2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 1-10). IEEE.
- [31] **Montemanni, R.** (2010). Integer programming formulations for maximum lifetime broadcasting problems in wireless sensor networks. *Wireless sensor network*, 2(12), 924.
- [32] **Sharma, A. S., & Kim, D. S.** (2021). Energy efficient multipath ant colony based routing algorithm for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 113, 102396.
- [33] **Yanbin, W., Zhuofei, W., Jing, Z., Zhijuan, L., & Xiaomin, M.** (2020). Analysis and adaptive optimization of vehicular safety message communications at intersections. *Ad Hoc Networks*, 107, 102241.
- [34] **Chen, Q., Cai, Z., Cheng, L., Gao, H., & Li, J.** (2021). Structure-free broadcast scheduling for duty-cycled multihop wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- [35] **Mchergui, A., & Moulahi, T.** (2021). A Novel Deep Reinforcement Learning Based Relay Selection for Broadcasting in Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Access*, 10, 112-121.
- [36] **Yu, D., Zou, Y., Yu, J., Wu, Y., Lv, W., Cheng, X., ... & Lau, F. C.** (2021). Distributed broadcasting in dynamic networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 29(5), 2142-2155.

- [37] **Yildiz, H. U., Tavli, B., & Yanikomeroglu, H.** (2015). Transmission power control for link-level handshaking in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 16(2), 561-576.
- [38] **Romero, C.** (2014). *Handbook of critical issues in goal programming*. Elsevier.
- [39] **Zeleny, M. (Ed.)**. (2012). *Multiple criteria decision making Kyoto 1975* (Vol. 123). Springer Science & Business Media.
- [40] **Velasquez, M., & Hester, P. T.** (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International journal of operations research*, 10(2), 56-66.

