

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

**AKILLI ŞEBEKELERDE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN OPTİMAL  
KULLANIM PLANLARININ GELİŞTİRİLMESİ**



**DOKTORA TEZİ**

**Elif Zeynep SERPER**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**AĞUSTOS 2022**





*Anneme ve Babama,*



## 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 Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Elif Zeynep SERPER



## ÖZET

Doktora Tezi

### AKILLI ŞEBEKELERDE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN OPTİMAL KULLANIM PLANLARININ GELİŞTİRİLMESİ

Elif Zeynep SERPER

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

Danışman Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Tarih: Ağustos 2022

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA'lar) düşük maliyetleri ve kurulum kolaylıkları ile birlikte sundukları gelişmiş iletişim yetenekleri sayesinde diğer pek çok alan gibi, hem Akıllı Şebeke (İng. Smart Grid – SG) hem Nesnelerin İnterneti (İng. Internet of Things – IoT) uygulamaları için önemli bir teknoloji olarak görülmektedirler. Bileşenleri arasında iki yönlü veri iletişimine olanak sağlayan, kendi kendini idare edebilen SG'ler geleneksel elektrik şebekesinin eksikliklerine bir çare olarak önerilmektedir. Bu çerçevede, istenen kapsama seviyesini korurken, uzun bir ağ ömrü elde etmek için enerji verimli iletişim protokolleri tasarlamak büyük önem arz etmektedir. Tez kapsamında öncelikle, herhangi bir anda sistemde canlı olarak bulunan sensör kümesi ile gerekli kapsama seviyesi ve baz istasyonuna (BS'ye) bağlantılılık sağlanabildiği sürece iletim yollarının topoloji değişikliklerine yeniden uyarlandığı bir senaryo incelenmektedir. Özgün bir 0-1 karma tamsayılı programlama (İng. Mixed Integer Programming – MIP) modeli önerilmekte ve enerji tüketimi vurgusu ile birlikte birim zaman ayrıştırmasında ağ davranışını optimize eden iki alternatif 0-1 MIP modeli sunulmaktadır. Çalışma, optimizasyon yöntemlerine dayalı bütünsel bir çözüm

çerçevesinde, enerji tükenmesi nedeniyle topoloji adaptasyonu içermesi açısından benzersizdir. Geleneksel bir ağ ömrü metriği olan ilk sensör ölünceye kadar geçen süre yerine önceden belirlenmiş kapsama seviyesi ve hayatta olan sensörlerle BS'ye bağlantı sağlanabildiği sürece KAA'nın optimal şekilde çalışmaya devam etmesine izin verilmekte ve tek seferlik bir yeniden düzenlemeden sonra bile ağ ömrünün önemli ölçüde artırılacağı gözlemlenmektedir. Ayrıca, önerilen modellerin çözümlerinin ağ ömrü ve kapsama seviyesi açısından nasıl farklılık gösterdiği analiz edilmektedir. Bir yan katkı olarak, klasik tek periyotlu problem için; ilk sensör ölene kadar geçen sürenin (İng. First Sensor Dies – FSD) maksimize edilmesinin, en çok enerji harcayan sensörün enerji tüketimini minimize etmeye eşdeğer olduğu gösterilmektedir ki bu durum herhangi bir topoloji değişikliği durumunda doğru olmak mecburiyetinde değildir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen çalışma ile kapsama ve bağlantı tabanlı hizmet kalitesi gereksinimleri altında, ağ ömrü için teorik üst sınır belirlemek amacıyla pratik bir araç sağlanmaktadır.

SG, akıllı ulaşım, akıllı evler, akıllı sağlık, akıllı izleme/görüntüleme uygulamalarının hepsi temelde uzun yıllardır hayatımızda olan sensörlerin daha akıllı kullanımına dayanmaktadır. Tüm bu sistemlerin ortak vizyonu sensörler sayesinde IoT çatısı altında bir araya gelmektedir. IoT uygulamaları; bağlantılılık, kapsama, düşük gecikme süreleri vb. başlıkları altında gruplandırılabilen ve uygulama alanının ihtiyaçları doğrultusunda şekillenmiş karakteristik hizmet kalitesi gereksinimlerine sahiptir. İlk bakışta bu gereksinimler; gecikme ve ağ ömrü ile ilgili hizmet kalitesi beklentileri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ölçütler doğaları gereği birbirleriyle ödünleşim içerisinde olduğundan aralarında bir denge kurulması pek çok açıdan kaliteli tasarımların yapılabilmesi için önem arz etmektedir. Dolayısıyla da etkin KAA tasarımı probleminin çok amaçlı perspektiften ve kapsama konsepti ile birlikte ele alınması anlamlı olmaktadır. Tez çalışması kapsamında bahsedilen problem için 0-1 MIP modeli tabanlı iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önerilmektedir. Bu amaçla maksimum gecikme, ortalama gecikme ve maksimum enerji tüketimi vurguları ile üç farklı model önerilerek ağ ömrü, veri gecikmesi ve kapsama arasındaki ödünleşim incelenmektedir. Böylece farklı uygulama alanlarındaki gereksinimlere dair bir iç görü sağlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** KAA, Akıllı şebeke, IoT, Kapsama, Ağ ömrü, Gecikme, Topoloji değişikliği, Çok periyotlu optimizasyon, Çok amaçlı optimizasyon, Tamsayılı programlama.



## ABSTRACT

Doctor of Philosophy

### DEVELOPING OPTIMAL USAGE PLANS FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS IN SMART GRID

Elif Zeynep SERPER

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Date: August 2022

Wireless Sensor Networks (WSNs) are an enabling technology for both Smart Grid (SG) and Internet of Things (IoT) applications, like many other fields, due to their low cost and ease of installation, as well as the advanced communication capabilities they offer. Self-sustaining SGs, which allow two-way data communication between their components, are proposed as a remedy for the shortcomings of the conventional electrical grid. In this framework, it is critical to design energy efficient communication protocols to achieve a long network lifetime while maintaining the desired coverage level. In this thesis, we consider the scenario where the transmission paths are re-adapted to topology changes as long as the current set of sensors with positive residual energy ensures the required coverage level and connectivity to the base station. To this end, we propose a novel 0-1 mixed integer programming (MIP) model and two alternative 0-1 MIP models that optimize network behavior in unit time decomposition with an emphasis on energy consumption. The study is unique since topology adaptation due to energy depletion is managed within a holistic solution framework based on optimization methods. To this end, we avoid the traditional

network lifetime metric, the time until the First Sensor Dies - FSD, and allow the WSN to operate optimally as long as a predetermined coverage level and connectivity to the BS can be maintained with the remaining sensors. Accordingly, we observe that network lifetime can be increased significantly even after a one-time reorganization. Besides, we also analyzed how the solutions of the proposed models differ in terms of network lifetime and the ensured coverage level. As a side contribution, for the classical one-period problem, we empirically show that maximizing the time until the first sensor dies is equivalent to minimizing the energy consumption of the most energy consuming sensor, which is not necessarily true in the case of any topology change. Hence, the study provides a practical tool to determine the theoretical upper bound on the network lifetime with coverage and connectivity-based QoS requirements.

SGs, smart transportation, smart homes, smart health, and smart monitoring/imaging applications are all based on the smarter use of sensors, which have been in our lives for many years. Thanks to sensors, the common vision of all these systems come together under the roof of IoT. Characteristic IoT quality of service requirements, based on criteria such as connectivity, coverage, and low latency, are mainly related to delay and network lifetime, and they can be tailored to the needs of the specific application area. Since they trade-off with each other, it is critical to balance them in order to develop quality designs in many respects. Therefore, it is meaningful to consider the effective WSN design problem from a multi-objective perspective considering coverage. In the second part of the thesis, we propose a 0-1 MIP based two-stage solution approach. For this purpose, we develop three different models, emphasizing maximum latency, average latency, and maximum energy consumption. Moreover, we examine the trade-off between network lifetime, data latency, and coverage. Therefore, we provide insight into the requirements of the different application areas.

**Keywords:** WSN, Smart grid, IoT, Coverage, Network lifetime, Delay, Topology change, Multi-period optimization, Multi-objective optimization, Integer programming.

## TEŞEKKÜR

Bugüne kadar karşılaştığım ve bir şekilde şu anki halimi şekillendirmiş olan tüm tanıdıklarına sevgilerimi ve sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Her birinin varlıklarına minnettarım.

Saygıdeğer tez danışmanım Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN, sadece akademik alanda değil hayatın her alanında en büyük yol göstericim ve rol modelim olmuştur. Yaptığı her işe emeği ile birlikte; sevgisini, neşesini ve mutluluğunu da katarak karşısındakini de motive etmesiyle; hiç sıradan olmayan, çok özel, anlamlı ve kalıcı sonuçların nasıl elde edilebileceği, kendisinden öğrendiğim sayısız değerın başında sayılabilir. Şu an aklıma gelen birçok sayıdaki ve çok kritik yol ayrımlarında bir hocadan öte; sevgisini, ilgisini ve emeğini esirgemeyen, adil ve şefkatli bir yol gösterici ve güven kaynağının varlığını hissedebilmek, sanmıyorum ki çok öğrenciye nasip olmuştur. Herhangi bir şeyi danışmam ya da paylaşmam gerektiğinde; her zaman yanına çok geniş bir bakış açısı kazanıp, yaşama sevinci dolu bir sohbet etme fırsatım olacağı sevinci ile gitmişimdir ve her daim huzur ile ayrılmışım yanından. Çok çok şanslı olduğumun bilinciyle, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum hocama layık olabilmek bundan sonraki yaşamımda motivasyonum olacaktır. Canım hocama sonsuz minnet ve sevgilerimle teşekkürlerimi sunuyorum.

Saygıdeğer bölüm başkanımız Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU, akademik başarıya giden yolda öncelikle sevgi, şefkat, birlik, beraberlik ve yapıcılığı aşılıyarak öncelikle bu konularda örnek olan ve her türlü başarının ancak özde mutlu olan bir insan ile taçlandırılabilceği gerçeğini bizzat içselleştirmiş olan saygıdeğer hocamdan çok şey öğrendim. Bölümümüzdeki birlikteliğe dayalı, huzur ve güven içerisindeki başarılı çalışma ortamımızın en büyük mimarlarından olan hocama sonsuz minnettarlıkla teşekkürlerimi sunuyorum.

Saygıdeğer Prof. Dr. Ömer SAATÇIOĞLU hocam, kendisini bu yıl 24 Nisan'da kaybetmiş olmanın derin üzüntüsü içerisindeyim. Ömer hocamı ilk kez 2006 yılında üniversite tercihi yapacağım dönemde TOBB ETÜ tanıtım günlerinde tanıdım. O

gün uzun keyifli bir sohbetimiz ve tercihimin şekillendiği özel bir gün olmuştu. Sonrasında önce öğrencisi, ardından asistanı olma şansına erişebildim. Emeklilik sonrası evinden çalıştığı günlerde de kendisinin yanında olabildiğim için çok şanslı olduğumu her daim hissettim şimdi ise çok daha derinden anlıyorum. Akademik anlamdaki şansımın ötesine; hayata, insana ve aileye dair öğrendiklerim her an aklımda olacaktır. Ömer hocamı; hem kararlı hem de uzlaşmacı yapısıyla, iletişimi hiçbir şekilde zaman kaybı olarak görmeden; her koşulda o anki tüm enerjisini ilgili durum ve karşısındaki kişiye vererek, sabırla gerçek bir iletişim kurma amacı güden yaklaşımıyla, kibar, nazik, gülümseyen şefkatli haliyle, sevgi saygı ve özlemle hatırlayacağım.. nurlarda olsun, her daim sonsuz sevgiyle..

Kıymetli hocam Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV, akademik hayatımın en başında ilk adımlarımı borçlu olduğum ve belki de çok acemi olduğum zamanlarımdaki kritik kararlarımda bana büyük destek olmuş olan hocamla geçirdiğimiz bu günleri her zaman büyük bir minnetle anarım. Keskin ve net görüşü ve bunları zamanında hızlı bir şekilde paylaşarak göstermiş olduğu destek ve rehberlik ile tüm akademik yolum için belirleyici olmuş olan, uzaktan da olsa ilgisini ve desteğini halen hissettiğim hocama gönülden sonsuz minnetle teşekkürlerimi sunuyorum.

Saygıdeğer hocam Prof. Dr. Bülent TAVLI, kendisinden çok şey öğrenmişimdir ancak beni en çok etkileyen özelliği mütevazılığı olmuştur. Başarıyı sadece akademik alandaki çalışmalarla yorumlamayıp insani boyuttaki değerlerine de yansıtıp yaşayabilen ve bana da hissettirmiş olan hocamla çalışma fırsatım olduğu için kendimi çok şanslı hissediyorum. Saygıdeğer hocama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Değerli hocam Doç. Dr. Eda YÜCEL, sadece gerçekleştirdiğimiz tez izleme komiteleri kapsamında değil her daim yardımlarını ve emeklerini esirgemediği büyük katkılarda bulunmuştur, kendisine gönülden teşekkürlerimi sunuyorum.

Sayın Doç. Dr. Mustafa Alp ERTEM hocam; desteğinizi, her zaman güler yüzle ve yapıcı bir şekilde gerçekleştirdiğiniz yorumlarınızı asla unutmam. Çok çok şanslıyım böyle hocalarım olduğu, sizlerle yolum kesiştiği için. Gönülden teşekkürlerimi sunuyorum.

Sayın Doç. Dr. Hüseyin Uğur YILDIZ hocam, çalışmayı tüm enerjisi ile eğlenceli ve motive edici hale getirmesi, her zaman yardıma açık olması ile çok büyük desteklerini

gördüğüm; tanıdığım için de çok şanslı olduğumu hissettiğim hocama gönülden teşekkürlerimi sunuyorum.

Lisans, yüksek lisans ve doktora sürecim boyunca kendilerinden ders alma fırsatım olan ve sadece bu dersler kapsamında değil her daim kapılarını çalıp önerileri ve yol göstericiliklerine başvurabildiğim, hiçbir zaman emeklerini esirgemeyen sayın hocalarım; Doç. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER, Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN, Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL, Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN ve Dr. Öğr. Üyesi Gültekin KUYUZU'ya tüm kalbimle teşekkürlerimi sunuyorum.

İnsanın ancak ailesinde yaşayabileceği sıcaklığı ve yakınlığı hissettirmiş olan TOBB ETÜ ailesine, ne zaman bir soru sormak bir konu hakkında danışmak istesem tüm özverisi ile yardımcı olan Fen Bilimleri enstitüsü müdürümüz Sayın Prof. Dr. Osman EROĞUL hocama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmalarımı 219M436 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Burada isimlerini saymamın mümkün olmadığı ancak sadece varlıklarıyla dahi yaşama güzellik katan; tüm dostlarım, akrabalarım, tanıdıklarım ve yolumun kesiştiklerine kalpten en derin teşekkürlerimi sunuyorum.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET.....	vii
ABSTRACT .....	ix
TEŞEKKÜR.....	xi
İÇİNDEKİLER .....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
KISALTMALAR.....	xxi
SEMBOLE LİSTESİ .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI.....</b>	<b>7</b>
2.1 KAA’larda Kapsama, Bağlantılılık ve Ağ Ömrü .....	7
2.2 KAA Uygulamalarında Gecikmenin Önemi .....	11
<b>3. KAA’LAR İÇİN SG UYGULAMARINDA TOPOLOJİ GÜNCELLEMESİ İLE BİRLİKTE KAPSAMA VE BAĞLANTI TABANLI AĞ ÖMRÜ ENBÜYÜKLEMESİ .....</b>	<b>15</b>
3.1 Problem Formülasyonu ve Motivasyon .....	15
3.1.1 Ağ yapısı .....	15
3.1.2 Matematiksel programlama modeli.....	17
3.1.2.1 Parametreler .....	18
3.1.2.2 Karar değişkenleri .....	20
3.1.3 Ağ ömrünü enbüyükleyen çok periyotlu $\alpha$ kapsama modeli (ÇP $\alpha$ KM) ..	21
3.1.4 Birim zaman ayrıştırmasına dayalı yaklaşım modelleri.....	22
3.2 Deneysel Çalışmalar .....	24
3.2.1 Veri kümesi .....	25
3.2.2 <i>MMaxE</i> ve <i>MSumE</i> için ağ ömrünün elde edilmesi .....	26
3.2.3 Planlama ufğunun belirlenmesi.....	27
3.2.4 Ağ ömrü analizi.....	29
3.2.4.1 <i>DÇP<math>\alpha</math>KM</i> ve <i>MMaxE</i> karşılaştırması .....	29
3.2.4.2 <i>MMaxE</i> ve <i>MSumE</i> karşılaştırması .....	30
3.3 Sonuçlar.....	34
<b>4. IoT TABANLI KAA UYGULAMALARINDA GECİKMEYE DUYARLI BAĞLANTILILIK ve <math>\alpha</math>-KAPSAMA İÇİN AĞ ÖMRÜ ENBÜYÜKLEMESİ..</b>	<b>37</b>
4.1 Problem Formülasyonu ve Motivasyon .....	37
4.1.1 Ağ yapısı .....	37
4.1.2 Matematiksel programlama modeli.....	37
4.1.2.1 Karar değişkenleri .....	38
4.1.3 Gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve $\alpha$ -kapsama temelli ağ ömrü enbüyüklemesi modeli ( <i>D<math>\alpha</math>TM</i> ).....	38
4.1.4 Gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve $\alpha$ -kapsama temelli maksimum enerji tüketiminin enküçüklenmesi ( <i>D<math>\alpha</math>EM</i> ) modeli .....	42

4.2 Deneysel Çalışmalar .....	43
4.2.1 Gecikme, ağ ömrü/enerji tüketimi ve kapsama arasındaki ödünleşim .....	43
4.2.1.1 Ağ ömrü – veri gecikmesi ödünleşimi .....	43
4.2.1.2 Ağ ömrü – kapsama ödünleşimi .....	45
4.3 Sonuçlar .....	46
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>51</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>59</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>65</b>





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: Hibrit rüzgar-güneş enerjisi çiftliği uygulaması için önerilen KAA modeli örneği .....	16
Şekil 3.2: Temel ızgara yapısı.....	25
Şekil 3.3: MMaxE veya MSumE çözümlerine göre optimal periyot sürelerinin belirlenmesi.....	27
Şekil 3.4: Ortalama ağ ömründeki değişim.....	28
Şekil 3.5: MSumE ve MMaxE için ortalama ağ ömrü değerleri.....	31
Şekil 3.6: Ağ ömründeki ortalama azalma oranları.....	31
Şekil 3.7: MMaxE & MSumE için ortalama kapsama seviyeleri.....	32
Şekil 3.8: Beklenen kapsama seviyesine göre ağ ömründeki değişim.....	33
Şekil 3.9: MMaxE & MSumE ile $T_{max} = 1$ & $T_{max} = 2$ için zaman ağırlıklı ortalama kapsama seviyeleri .....	34
Şekil 4.1: Ağ ömrü – Ortalama Gecikme Ödünleşimi.....	44
Şekil 4.2: Ağ Ömrü – Kapsama Ödünleşimi.....	46



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1: İkinci probleme dair literatür incelemesi .....	13
Çizelge 3.1: Kullanılan notasyon ve tanımları .....	19
Çizelge 3.2: Her güç seviyesi ( $l$ ) için Birim İletim Enerjisi ( $E(l)$ - nJ/bit) ve İletim Menzili ( $R_{maxl-m}$ ).....	20
Çizelge 3.3: Simülasyon parametre değerleri .....	26
Çizelge 4.1: Kullanılan ek notasyonlar ve tanımları.....	38



## KISALTMALAR

<b>BBK</b>	: Bağlantılı baskın küme
<b>BS</b>	: Baz istasyonu
<b>ÇP<math>\alpha</math>KM</b>	: Çok periyotlu $\alpha$ kapsama modeli
<b>DÇP<math>\alpha</math>KM</b>	: Doğrusal çok periyotlu $\alpha$ kapsama modeli
<b>D<math>\alpha</math>TM</b>	: Gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve $\alpha$ kapsama temelli ağ ömrü maksimizasyonu
<b>FSD</b>	: İlk sensör ölene kadar geçen süre (İng. First Sensor Dies)
<b>KAA</b>	: Kablosuz algılayıcı ağ
<b>MIP</b>	: Karma tamsayılı programlama (İng. Mixed Integer Programming)
<b>MEM</b>	: Gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve $\alpha$ kapsama temelli maksimum enerji tüketiminin minimizasyonu
<b>SG</b>	: Akıllı Şebeke (İng. Smart Grid)



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Sembol	Açıklama
$A$	Yönlü ayrıtlar kümesi
$N_0$	Sensörler kümesi
$N = N_0 \cup BS$	Düğüm kümesi
$G$	$(N, A)$ yönlü çizgesi
$C$	Hücreler kümesi
$L$	İletim gücü seviyeleri kümesi
$T = \{1, \dots, T^{max}\}$	Periyotlar kümesi
$n$	Izgara yapısındaki hedef bölgede yatay ve dikeydeki hücre sayısı
$N^{max}$	$n \times n$ boyutundaki ızgara topolojisinde bulunabilecek maksimum sensör sayısı
$b_c$	$c \in C$ hücresinden birim zamanda sezilen bit miktarı
$C_i$	$i \in N_0$ tarafından algılanabilen hücreler kümesi
$CN_c$	$c \in C$ hücresinin komşuluğu
$S_c$	$c \in C$ hücresini sezebilen sensörler kümesi
$r$	Bir sensörün algılama yarıçapı
$R$	Bir sensörün iletim menzili
$R_{max}(l)$	$l$ güç seviyesinin maksimum iletim menzili
$B_i$	$i \in N_0$ sensörünün başlangıç enerjisi
$d_{ij}$	$i \in N_0$ ve $j \in N_0$ arasındaki Öklid mesafesi
$E_{ij}(l)$	$(i, j) \in A$ üzerinde $l \in L$ güç seviyesinde birim veri iletim enerjisi
$PRX$	Birim veri alma enerjisi
$\Psi$	Birim veri algılama enerjisi
$\alpha$	KAA için istenen minimum kapsanma oranı eşik değeri
$\mu$	Bir sensör için bit iletim eşik sabiti
$\lambda$	Komşuluk kapsama oranı eşik değeri
$\rho$	Sensör oranı
$\Upsilon$	Bir sensörün algılayabileceği maksimum hücre sayısı
$L_k$	$T^{max} = k$ iken ortalama ağ ömrü
$\bar{T}^{n,\rho}(m)$	$m$ modeli için, $n \times n$ hedef bölge ve $\rho$ sensör yerleşim oranı ile ortalama ağ ömrü

$w^{n,\rho}(m)$

$m$  modeli,  $n \times n$  hedef bölge ve  $\rho$  sensör yerleşim oranı ile normalleştirilmiş zaman ağırlıklı kapsama oranı

$\bar{c}^{n,\rho}(m)$

$m$  modeli,  $n \times n$  hedef bölge ve  $\rho$  sensör yerleşim oranı ile ortalama kapsama seviyesi





## 1. GİRİŞ

4 Eylül 1882'de, Thomas Edison'un Edison Illuminating Company isimli şirketinin Pearl Street'teki elektrik santralının düğmesini çevirip Wall Street'i aydınlatmasıyla elektrik çağı başlamış oldu. 1886 yılında ise ilk merkezi AC güç şebekesi; güç iletiminin, elektrik dağıtımının ve talep odaklı kontrolün sağlanması amacıyla kuruldu. O zamandan beri talep dramatik bir şekilde artmaya devam etse de elektrik şebekesinin temel alt yapısı çok uzun yıllar neredeyse değişmeden kalmıştır. Fakat, geleneksel şebekenin otomatik analiz eksikliği, zayıf görünürlüğü, mekanik anahtarlar nedeniyle uzun yanıt süreleri vb. eksiklikleri nedeniyle modernizasyonu kaçınılmaz olmuştur (Güngör ve diğ, 2008).

Akıllı Şebeke (İng. Smart Grid – SG) teknolojilerinin gelişmesine; elektronik kontrol, ölçüm ve izleme girişimleri öncülük etmiştir. 1980'lerde otomatik sayaç okuma kullanıma girmiş, 1990'larda ise gelişmiş okuma yöntemleri ile kullanım alışkanlıklarına ait bilgiler de edinilmeye başlanmıştır. Akıllı sayaçlar sürekli iletişim sayesinde gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılmış ve talep yanıt programları ile akıllı soket kullanımının yolunu açmıştır. Sonuç olarak, sahip oldukları dijital teknoloji altyapısı sayesinde şebekenin bileşenleri arasında iki yönlü veri iletişimi sağlayarak, güç iletim ve dağıtım ağında güvenlik, güvenilirlik ve verimliliğin artırılmasına olanak sağlayan SG'lerin temelleri atılmıştır.

Küresel bazdaki güncel çevresel değişiklikler sürekli olmayan ve dağıtılmış yenilenebilir enerji kaynaklarının SG'lere entegrasyonunu gerekli kılmaktadır (Kriechbaum ve diğ, 2018; Rehmani ve diğ, 2018). Rüzgar türbinleri ve güneş panelleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklı dağıtık üreticilerin, dağıtık depolama birimleri ile birlikte kullanılmasıyla; güç sürekliliği, enerji dengesi ve talep yönetimine olanak sağlanması amaçlanmaktadır (Ma ve diğ, 2013). Dağıtık depolama birimleri yüksek talep karşısında enerji sağlama, talebin düşük olduğu zamanlarda ise fazla enerjiyi depolayabilme amacıyla kullanılmaktadırlar. Fakat yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanan gücün kalitesi ve kullanılabilirliği değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji tesislerinin sürekli izlenmesi, SG'lerin iletim kapasitesi

ve etkili gözlem gereksinimleri ile birlikte şebeke için kritik önem arz etmektedir (Ayadi, 2020; Durairaj, 2020).

SG'ler güç iletimi, dağıtımı ve tüketimi verilerinin gerçek zamanlı olarak toplanması ve analizi için kullanılmaktadır. Bu da genellikle çevrimiçi izleme ve tanımlama yoluyla daha etkin güç yönetimi sağlayabilmek adına çoğunlukla elektrik ağlarına entegre edilen veri iletim ağları aracılığıyla mümkün olmaktadır (Gao ve diğ, 2012; Güngör ve diğ, 2011). Son zamanlarda Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA'lar) SG'lerin kontrol ve yönetimi için; enerji verimli, güvenilir ve düşük maliyetli çözümler olarak karşımıza çıkmaktadır (Fadel ve diğ, 2015; Güngör ve diğ, 2010). KAA tabanlı SG uygulamalarının etkin işleyişinde elektrik güç sisteminin bileşenlerinin arasındaki iletişim kabiliyetleri önemli paya sahiptir. KAA'ların gelişmiş gözetim ve güvenilir veri dağıtım özellikleri; rüzgar ve güneş çiftliklerinin uzaktan kontrolü, arıza tespiti, hırsızlık girişimlerinden korunma ve sistem kararlılığı için güç kalitesinin izlenmesi konularında katkı sağlamaktadır (Fadel ve diğ, 2015; Güngör ve diğ, 2010). Dolayısıyla bu tür uygulamalarda enerji verimliliği, güvenilirlik ve maliyet göz önüne alınması gereken önemli metrikler olarak karşımıza çıkmaktadır (Tuna ve diğ, 2013).

KAA'lar kapsama alanları içerisinde bulunan fiziksel ve çevresel koşulları izleyen ve ilgili veriyi doğrudan ya da çok atlamalı yollar üzerinden bir veya birden fazla baz istasyonuna (İng. Base Station – BS) ileten, pille çalışan otonom sensörlerden oluşmaktadır. Sensörler, pillerinin tükenmesi, teknik arızalar, harici kötü niyetli müdahaleler vb. durumlar sonucunda işlevselliklerini kaybedebilirler. Bu durumda da ağın kullanılabilirliği ve performansı, hedef alan sezimi ve veri iletimi açısından kötüleşebilmektedir. Dolayısıyla da ağın fonksiyonelliğini koruduğu süreyi, bir diğer deyişle ağ ömrünü uzatmak için sensörlerin sahip oldukları sınırlı enerjilerinin verimli kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamla ilgili literatür oldukça geniştir ve sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ortak motivasyon her sensörden BS'ye nispeten daha enerji verimli iletim yolları belirlemek amacıyla algoritmalar geliştirilmesi yönündedir. Farklı algoritmalarla elde edilen çözümler birbirleriyle kıyaslanarak yöntemlerin performanslarının değerlendirilmesine çalışılır. Dolayısıyla, her ne kadar verimli algoritmalar iyi çözümler üretebilseler de mümkün olan en iyi yani optimal çözüme kıyasla ne derece etkin olduklarının açıkça değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca sezgisel yaklaşımlar uygulama aşamasında her bir sensörün tek tek programlanmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında,

asgari hedef bölge kapsama oranının altına düşülmeyecek şekilde ağ ömrünü en büyükleyecek rotaların belirlenmesi için özgün bir 0-1 karma tamsayı programlama (İng. Mixed Integer Programming – MIP) modeli geliştirilmiştir. Tasarım aşamasında KAA'dan beklenen hizmet kalitesi (İng. Quality of Service – QoS) seviyesi, ağ ömrü boyunca hedef alanın en az  $\% \alpha$  kadarının kapsanıyor olması ve sezilen tüm verinin BS'ye iletililebilir olmasıdır. Bu koşullar sağlanabildiği sürece KAA'da enerjisi tükenen sensörler olsa bile ağın işlevselliğini istenen seviyede koruyacağı varsayılmaktadır. Ağ davranışının birim zaman ayrıştırmasına dayalı iki adet 0-1 MIP yaklaşıklık modeli (İng. approximation model) önerilmiştir. Bu iki model birim zamanda harcanan enerjiyi azaltmaya çalışmaları açısından benzer olsa da amaç fonksiyonları açısından farklılık göstermektedirler.

KAA'lar için önemli performans göstergelerinden birisi olan ağ ömrü için literatürde tanımlanan çok çeşitli metrikler vardır. Ömür tanımı uygulamaya özel olmakla birlikte en genel ifadesi ağın beklenen hizmet kalitesini sağlayarak işlevselliğini koruduğu süredir ve temel motivasyon sınırlı enerjiye sahip sensörlerin enerjilerini ağın ömrünü enbüyüklemek için verimli bir şekilde kullanmaktır. Sonuç olarak literatürde önerilen tanımlar; aktif sensörlerin sayısına göre, hedef alanın kapsanma seviyesine göre ve bağlanabilirlik seviyesine göre olacak şekilde üç ana gruba ayrılabilir (Dietrich ve Dressler, 2009). Aktif sensör sayısı temelli metrikler arasından en yaygın kullanıma sahip olanı, ilk sensör ölene (İng. First Sensor Dies – FSD) kadar geçen süredir. FSD'de tek bir sensörün enerjisi tükense dahi tüm ağın işlevsiz hale geldiği varsayılmaktadır (Chang ve Tassiulas, 1999; Yetgin ve diğ., 2017). FSD topoloji değişikliğinin dikkate alınmasına gerek kalmadan modellenebilmesi nedeniyle özellikle matematiksel modelleme tabanlı çalışmalar için oldukça uygundur. Fakat genellikle çok sayıda sensörün olduğu bir KAA'da tek bir sensörün bütün ağın işlevselliğini bozacağı varsayımı gerçekçilikten uzak ve konservatif bir varsayım olarak kabul edilmektedir (Dietrich ve Dressler, 2009; Fei ve diğ., 2017; Madan ve diğ., 2006). Bu tez çalışmasında ele alınacak ilk problemde, ağdaki bazı sensörlerin enerjisi tükense bile ağın işlevselliğini sürdürebilmek adına yeniden uyarlandığı bir kurgu ele alınmaktadır. Bazı sensörlerin kullanılamaz olması KAA topolojisinin değişeceği anlamına geldiğinden iletim yollarının yeni topolojiye uyarlanması gerekecektir. Bu amaçla tez çalışmasının ilk bölümü kapsamında; topoloji değişikliği nedeniyle tamamlanan her periyodun sonunda iletim yollarının optimal şekilde uyarlanmasına

olanak sağlayacak özgün çok periyotlu bir 0-1 MIP modeli önerilmiştir. Dolayısıyla bazı sensörlerin enerjisi tükense bile diğer sensörlerin kalan enerjilerinin kullanımına olanak sağlayan modelimiz ile ağ ömrü periyot uzunluklarının toplamına eşit olacaktır.

Ağ ömrü sıklıkla aktif sensör sayısı ile ölçülse de (Altın-Kayhan ve Şendil (2016), Çotuk ve diğ. (2014), Ekmen ve Altın-Kayhan (2017), Kurt ve diğ. (2017), Uzun ve diğ. (2014)), KAA'ların kullanım amaçları göz önüne alındığında kapsama ve bağlanabilirlik gereksinimleri de göz ardı edilmemelidir. Bu amaçla, istenilen kapsama seviyesini sağlamak için sensör konumlarını ve çalışma döngülerini belirlemek adına çoğunlukla matematiksel modelleme teknikleri kullanılmaktadır (Altinel ve diğ, 2008; Güney ve diğ, 2010; Keskin ve diğ, 2016). Ancak, literatürde belirli sensör konumları için kapsama tabanlı hizmet kalitesi garantisi ile enerji verimli iletişim protokolleri tasarlamak için optimizasyon modellerinin kullanıldığı başka bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Tez çalışmasının ilk bölümü ile, literatürde mevcut olan sezgisel algoritma tabanlı yaklaşımlar için teorik bir kıyaslama sağlamak da amaçlanmaktadır. Çalışmanın içeriği herhangi bir KAA uygulamasına genişletilebilir olsa da KAA'lar çeşitli ortamlarda gerekli bilgi akışını uygun bir şekilde sürdürmek için SG'lerin temel bileşenleri olduğundan SG uygulamasının dikkate alması tercih edilmiştir (Fadel ve diğ, 2015; Güngör ve diğ, 2010; Kurt ve diğ, 2017). Bu bölümün hem teorik hem de metodolojik başlıca katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- İstenilen kapsama seviyesi kalan sensör kümesi ile sağlanabildiği sürece, sensör enerjisinin tükenmesi nedeniyle gerçekleşen topoloji değişiklikleri neticesinde veri iletim yollarının optimal olarak güncellendiği bir şema ve çözümü için çok periyotlu özgün bir 0-1 MIP modeli önerilmektedir.
- Enerji tüketimi açısından birim zaman kırımında ağ davranışını optimize etmeye odaklanan iki alternatif 0-1 MIP yaklaşımla modeli geliştirilmektedir.
- Çok periyotlu optimizasyon yoluyla ağ ömrünün artırılabilceğini nispeten küçük ağlar için bile ampirik olarak gösterilmektedir.
- Hedef bölgenin en az  $\alpha$ 'sının kapsanması gereken ve topoloji değiştiğinde kapsanan bölgelerin değişebileceği bir kapsama gereksinimi uygulanmakta ve bu sayede modellere tasarım esnekliği ve gerçekçilik katılmaktadır.

- Ağ ömründe en yüksek artışı elde etmek için dikkate alınması gereken anlamlı topoloji değişikliklerinin sayısı incelenmektedir.
- Tek periyotlu optimizasyon için; FSD'yi enbüyüklemek ile tüm sensörler içinde maksimum enerji tüketimini en küçüklemenin eşdeğer olduğu gösterilmektedir. Fakat bu durum çok periyotlu optimizasyon için doğru olmak mecburiyetinde değildir.
- Yaklaşım modellerinin optimal çözümlerinin ağ ömrü ve kapsama düzeyi açısından nasıl farklılık gösterdiği analiz edilmektedir.
- Yaklaşım modellerine dayalı olarak ağ ömrünün kapsama düzeyine duyarlılığı tartışılmaktadır.

SG'lerin yanı sıra; akıllı ulaşım, akıllı evler, akıllı sağlık, akıllı izleme/görüntüleme gibi çok çeşitli uygulamalar yaşam tarzımızı olumlu yönde geliştirmeye ve değiştirmeye devam etmektedir. Bunu mümkün kılan ise uzun yıllardır hayatımızda olan sensörlerin daha akıllı kullanımudur. Bu bağlamda tüm bu sistemlerin ortak vizyonu sensörler sayesinde nesnelerin interneti (İng. Internet of Things – IoT) çatısı altında bir araya gelmektedir.

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmeleri ile sensörler günden güne gelişmeye devam etmekte ve KAA'ları IoT uygulamaları için anahtar teknoloji haline getirmektedir. KAA'yı oluşturan sensör düğümleri; titreşim, ısı, nem, ışık, basınç vb. gibi fiziksel olayları algılamak için özel sensörlerle donatılmış olduklarından bu çok çeşitli alanların her birine özel olarak hitap edebilecek kapasiteyi bulundurmaktadırlar.

Tüm IoT uygulamaları; bağlantılılık, kapsama, düşük gecikme süreleri vb. başlıkları altında gruplandırılabilen ve uygulama alanının ihtiyaçları doğrultusunda şekillenmiş karakteristik hizmet kalitesi gereksinimlerine sahiptir. Kapsama kısıtları hedef alanın gerekli düzeyde kapsanmasını garanti ederken, bağlantılılık kısıtları BS'ye bağlılığı korumaktadır. Kısıtlı kaynaklara sahip olunan bir ortamda bu problem basit olmayan bir optimizasyon problemidir. Bununla birlikte, gün geçtikçe gelişen uygulama alanları düşük gecikme ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Özellikle; enerji dağıtım ve akıllı ulaşım sistemleri, endüstriyel süreç otomasyonu vb. uygulama alanlarında düşük gecikme süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin enerji dağıtımda sensörlerin güncel talep ile ilgili bilgiyi iletmesi sırasındaki gecikme ya da akıllı ulaşım sistemlerinde bir araca konumlandırılmış sensörün yaklaşan cisimleri

algılandığında tepkiyi oluşturacak mekanizmaya bilgiyi iletmesi sırasında gerçekleşen gecikme kritik performans kriterleridir. Dolayısıyla, gecikmeye dair hizmet kalitesi gereksinimleri daha belirleyici hale gelmektedir.

Kapsama alanına dair beklentiler özellikle herhangi bir ağ alt yapısının bulunmadığı veya mevcut altyapının kullanıma uygun olmadığı, geniş alana yayılan IoT güdümlü akıllı uygulamalarda daha da fazla uygulamaya bağımlı hale gelmektedir. Geniş bir alana konuşlandırılmış IoT cihazlarından verimli bir şekilde veri toplamak için hedef alanı ayrık bir alan ile eşleştirerek temsil etmek tercih edilen bir yaklaşımdır (Liang ve diğ., 2020). Böylece hem sisteme dair yapılacak analizler çeşitlendirilebilmekte hem de fiziksel sistemin etkin yönetimi mümkün olmaktadır. Özellikle geniş alan uygulamalarında, daha kısa süre tam kapsama yerine, daha uzun süre kısmi kapsama hedef bölgeden anlamlı miktarda veri alınabildiği sürece tercih edilebilir bir yaklaşımdır. Dolayısıyla uygulama alanı sürekli olarak tam kapsamayı şart koşan yüksek güvenlik gereksinimli bir alan değilse,  $\alpha$  kapsama yaklaşımı sensörlerin sınırlı enerjiye sahip pillerinin verimli kullanılması anlamında daha gerçekçi sonuçlar sağlamaktadır. Gentili ve Raiconi (2013)'ün önerdiği bu kapsama yaklaşımı zaman içerisinde farklı versiyonlar ve çözüm yaklaşımları çerçevesinde de ele alınmıştır (Curry ve Smith, 2016; Charr ve diğ., 2020; Cerulli ve diğ., 2022, Serper ve Altın-Kayhan, 2022). Bölüm 2'de tez çalışmasında ele alınacak problemin literatürden nasıl farklılaştığı açıkça ifade edilmektedir.

Tez çalışmasının ileriki bölümleri şu şekildedir: Bölüm 2'de, literatür taraması sunulmakta, Bölüm 3'te ele alınan ilk problem olan; KAA'lar için SG uygulamalarında topoloji güncellemesi ile birlikte kapsama ve bağlantı tabanlı ağ ömrü enbüyüklemesine dair çalışma bütünüyle anlatılmaktadır. Benzer şekilde Bölüm 4'te tez çalışması kapsamında ele alınmış ikinci problem olan; IoT tabanlı KAA'larda bağlantılılık ve  $\alpha$ -Kapsama için gecikmeye duyarlı ağ ömrü enbüyükleme problemi sunulmaktadır. Bölüm 5'te sonuç ve öneriler ile tez çalışması sonlandırılmaktadır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1 KAA'larda Kapsama, Bağlantılılık ve Ağ Ömrü

Bu bölümde ilk olarak, statik KAA'lar için alan kapsama (İng. area coverage) ve ağ ömrü eniyileme ile ilgili literatürdeki çalışmalardan bahsedilecektir. KAA'lar için kapsama problemi esas olarak hedef bölgenin belli bir kalite ile izlenmesini ele alır. Her ne kadar uygulama alanına bağlı olarak farklı kapsama tanımları olsa da en genel sınıflandırma; *alan kapsama* ve *kısmi kapsama* şeklindedir. Kısmi kapsama da kendi içinde; *hedef kapsama* ve *bariyer kapsama* olarak iki gruba ayrılabilir (Amutha ve diğ., 2020). Alan kapsamada KAA'nın ömrü boyunca hedef bölgenin tamamen izlenmesi istenmektedir. Bu aşamada eğer hedef bölge ayırık hedef noktaları kümesi şeklinde ifade ediliyorsa problem *hedef kapsama* kategorisine girmektedir. Diğer yandan *bariyer kapsama* ise hedef bölgede hareket eden bir nesnenin algılanması ile ilgilidir. Tez çalışmasında hedeflerin statik olduğu varsayıldığından ilgili literatüre bu bölümde yer verilmemektedir.

Sensörler pille çalışan sınırlı enerjiye sahip cihazlar olduklarından, ağ ömrünü uzatmada enerji verimliliği en temel etmendir. Bu amaçla, tüm sensörler arasında dengeli enerji tüketiminin sağlanması, ağ bütünlüğünü daha uzun bir süre boyunca korumak için kritik olarak kabul edilmektedir (Chang ve Tassiulas, 1999; Wang ve diğ., 2005). Kapsama tabanlı hizmet kalitesi gereksinimleri ile birlikte enerji açısından verimli bir rotalama protokolü tasarlamak ağ bağlantılılığını da gerektirmektedir. KAA'ların varoluş nedenleri dikkate alındığında, sensörler tarafından kapsanan bölgeden sezilen verinin aynı zamanda BS'ye iletilebilir de olmasının garanti edilmesi gerektiği açıktır. Dolayısıyla sensör konumlarının bilindiği durumda *bağlı kapsama* (İng. *connected coverage*), algılanan verinin ne kadarının BS'ye iletilebileceğini gösterdiğinden daha anlamlı bir kalite ölçütüdür (Sevgi ve Koçyiğit, 2014).

Kapsama probleminin tanımı sensör yerleşiminin deterministik veya rastgele olmasına bağlı olarak değişmektedir. Deterministik yerleşimde, bir sensörün nereye konumlandırılacağı seçilmekte dolayısıyla, minimum sayıda sensörle ya da en az maliyetli şekilde istenen kapsama seviyesini sağlamak için *sensör yer seçimi problemi*

(Altınel ve diğ.,2008; Boubrima ve diğ.,2017; Chakrabarty ve diğ., 2002; Kabakulak, 2019; Kar ve Banerjee, 2003) veya kullanılan sensör sayısını azaltacak şekilde *yerleşim optimizasyonu problemi* (Meguerdichian ve Potkonjak (2003), Rebain ve diğ. (2015)) ele alınmaktadır.

Altınel ve diğ. (2008) minimum maliyetli hedef kapsama problemi için değişken algılama kalitesi ve maliyetine sahip sensörlerin ızgara ağ yapısına yerleşimi için öncelikle bir doğrusal 0-1 tamsayılı programlama (İng. Integer Programming – IP) modeli önermiş ve modelin çözümü için yaklaşıklık algoritmaları ile sezgiseller geliştirmişlerdir.

Boubrima ve diğ. (2017) düşük maliyetli kablosuz sensörler ile hava kirliliğinin izlenmesi için minimum maliyetli sensör yerleştirme problemini ele almışlardır. Hem zamanla değişen hava koşulları altında kirliliğin kapsamını yani etkilediği alanı, hem de altyapının bağlanabilirliğini göz önüne alan sensör yerleşimi için doğrusal IP modelleri önermişlerdir.

Kabakulak (2019) bir KAA'nın sınırlı enerji ve bütçe ile beklenen görevleri gerçekleştirebildiği zaman periyotlarının sayısını enbüyüklemek amacıyla bir MIP modeli geliştirmiştir. Model sonlu bir planlama ufku boyunca sensör ve BS'lerin konumlarını, sensörlerin aktivite çizelgelerini ve aktif olan her bir sensörden atanmış olduğu BS'ye veri akış yollarını eşzamanlı olarak belirlemeyi hedefleyen ilk çalışmadır. Problemin çözümü için etkin sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir.

Kar ve Banerjee (2003) KAA'larda bağlı kapsama problemi için sensör yerleşimi kararına iki farklı senaryo ile çözüm aramışlardır. İlk senaryoda belirli bir veya bir dizi bölge için ikinci senaryoda ise belirli bir  $n$  nokta kümesi için bağlı kapsama sağlanmaktadır. Bu çalışmada, optimale oldukça yakın çözümler sağladığı gösterilen algoritmalar geliştirilmiştir.

Öte yandan, rastgele yerleşim durumunda sensör kümesini her bir alt küme ile istenen bağlı kapsama seviyesini sağlayacak şekilde alt kümelere ayırmak enerji verimliliği açısından yaygın bir tekniktir. Sonuç olarak, temel durumda problem, her bir kapsar küme için aktivasyon süresinin belirlenmesine ve dolayısıyla her bir sensör alt kümesinin her periyotta açık/kapalı durumunun çizelgelenmesine indirgenmektedir (Cardei ve diğ, 2005; Cardei ve Wu, 2006; Gentili ve Raiconi, 2013; Kabakulak, 2019; Keskin ve diğ, 2014, Rizvi ve diğ. 2012).



Cardei ve diğ. (2005) ağ ömrünü uzatmak için yalnızca mevcut aktif kümedeki sensörlerin hedef bölgeden toplanan verilerin iletilmesinden sorumlu olduğu diğerlerinin ise düşük enerjili uyku modunda buldukları bir kurguda sensörleri maksimum sayıda kapsar kümeye ayırıp bu kümeleri art arda etkinleştiren bir yöntem önermişlerdir. Alt kümelerin verimli bir şekilde belirlenmesi için doğrusal programlama ve açgözlü bir yaklaşıma dayanan iki sezgisel yöntem tasarlamışlardır.

Cardei ve Wu (2006) statik KAA'lar için; kapsanacak alanın yapısına (bölge veya ayrık noktalar), sensör yerleştirme mekanizmasına (rastgele veya deterministik), bağlantılılık ve minimum enerji tüketimi gibi çeşitli KAA özelliklerine dayalı olarak geliştirilmiş olan farklı kapsama formülasyonlarını, bunların varsayımlarını ve önerilen çözüm yöntemlerini incelemişlerdir.

Gentili ve Raiconi (2013) her bir kapsar kümenin hedeflerin belirli bir bölümünün ihmal edilmesine izin vererek, hedef bölgenin; %100, %85, %75 ve %50'sinin kapsıyor olduğu senaryolarda maksimum ağ ömrü probleminin bir varyantını ele alarak kapsama hedefinden ufak bir tolerans ile ağ ömrünün büyük ölçüde iyileştirilebileceğini göstermişlerdir.

Keskin ve diğ. (2014) sensör yer seçimi, aktivite çizelgeleri, veri rotaları ve mobil BS'lerin güzergah kararlarını içeren bir matematiksel model ve çözümü için iki sezgisel yöntem sunmuşlardır. Her ne kadar bu çalışma mobil KAA'lara dair olsa da çok periyotlu bir çizelgeleme içermesi bakımından tez çalışması ile ilgilidir.

Bağlantılı baskın küme (BBK) tabanlı topoloji kontrol tekniğinde ağdaki herhangi bir rastgele düğüm çifti arasında iletişime izin veren sanal bir omurga oluşturulmaktadır. Rizvi ve diğ. (2012) enerji verimli bir sanal omurga oluşturan BBK tabanlı bir topoloji kontrol algoritması önermişler ve geliştirdikleri algoritmanın performansını üç diğer algoritma ile kıyaslayarak daha iyi kapsama ve bağlantılılık sağladığını göstermişlerdir.

Kapsama problemi üzerine yapılan ilk çalışmalarda çoğunlukla algoritmik çözüm yöntemlerine başvurulmaktadır (Cardei ve Wu, 2006; Dhillon ve diğ. 2002; Dhillon ve Chakrabarty, 2003; Slijepcevic ve Potkonjak, 2001; Wang ve Zhong, 2006). Örneğin, Slijepcevic ve Potkonjak (2001) her bir kümedeki sensörlerin izlenecek alanı tamamen kapsayabildiği, etkinlik sürelerinin tüm kümeler için aynı olup herhangi bir zamanda kümelerden yalnızca birinin aktif durumda olduğu ayrışık sensör kümelerini

belirleyen bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Deneysel sonuçları yalnızca bir sensör alt kümesi kullanımı ile tam kapsamayı koruyarak önemli bir enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir. Dhillon ve diğ. (2002) sensörlerin minimum miktarda algılanan veri ilettikleri minimalist bir kurgu için sensör sayısı ve yerlerine karar veren bir algoritma sunmuşlardır. Dhillon ve Chakrabarty (2003) sensör sayısı ve yer seçimi problemine, en savunmasız alanların yanı sıra ortalama bir kapsamayı da sağlamayı amaçlayan algoritmalar önererek tercihlili kapsama konusunu ele almışlardır. Wang ve Zhong (2006) farklı algılama kapasiteleri ve maliyetlere sahip sensörlerin bulunduğu bir kurguda, kapsama kriterleri de göz önüne alınarak minimum maliyetli sensör yerleşimi problemi için bir yaklaşıklık algoritması geliştirmişlerdir.

Diğer taraftan, Chakrabarty ve diğ. (2002) hedef bölgenin ızgara topoloji şeklindeki temsili üzerinde, iki tip sensör için düşük maliyetli sensör yer seçimi problemini ele almışlar ve öncelikle doğrusal olmayan bir 0-1 IP modeli önerip ardından doğrusallaştırmışlardır. Ayrıca, hedef kapsama problemi ilk kez Meguerdichian ve Potkonjak (2003) tarafından 0-1 IP modeli olarak formüle edilmiştir. O zamandan beri, optimizasyon teknikleri büyük ilgi görmektedir (Altinel ve diğ, 2008; Cardei ve diğ, 2005; Gentili ve Raiconi, 2013; Kabakulak, 2019; Rebain ve diğ, 2015; Sengupta ve diğ. 2013).

Kapsama problemi için en yaygın tasarım hedefleri; toplam sensör maliyetini en aza indirmek (Altinel ve diğ, 2008; Chakrabarty ve diğ, 2002; Boubrima ve diğ, 2017), yerleştirilen sensör sayısını en aza indirmek (Meguerdichian ve Potkonjak, 2003; Rebain ve diğ, 2015) ve ağ ömrünü enbüyüklemektir. Sonuncusu, ilk veya son sensör ölene kadar geçen süreyi enbüyüklemek için doğrudan amaç fonksiyonuna dahil edilebilmektedir (Madan ve diğ, 2006; Sengupta ve diğ, 2013). Bir KAA'daki sensör kümesinin birlikte çalıştıklarında istenen hizmet kalitesi ile ağın işleyişine devam etmesini sağlayan her bir alt kümesine *kaplama* (İng. *cover*) denir. Literatürde, enerji verimliliği sağlayabilmek ve dolayısıyla ağ ömrünü artırabilmek için kaplamaların aktivasyon sürelerinin çizelgelenmesi genellikle tercih edilen bir yöntemdir (Cardei ve diğ, 2005; Cardei ve Wu, 2006; Gentili ve Raiconi, 2013). Burada ağ ömrü tüm kaplamaların aktivasyon sürelerinin toplamıdır.

Kaplama tabanlı çalışmalarda, ağ ömrü, her periyotta bir kaplama aktif olacak şekilde periyotlara bölünmektedir. Her kaplamanın aktivasyon süresinin sonunda başka bir kaplamadaki sensörler aktif hale gelmektedir. Ancak aynı kaplamada yer alan

sensörler arasında dengeli enerji tüketimi her zaman ayrı bir şekilde ele alınmamaktadır. Bu nedenle, bir kaplamanın faaliyet süresi sona erdiğinde, o kaplamada pozitif kalan enerjiye sahip tüm sensörlerin öldüğü varsayılmaktadır. Diğer taraftan, bu tez çalışmasında her periyotta enerjisi olan tüm sensörler aktif kabul edilmekte ve ilgili periyotta ilk sensör ölene kadar geçen süre optimize edilmektedir. Bu nedenle her sensörün kullanılmayan enerjisi sonraki periyoda aktarılmaktadır. Ayrıca bu tez çalışması optimizasyon çerçevesinde enerji tükenmesi nedeniyle topoloji değişikliğine adaptasyonu sağlayan ilk çalışmadır. Ek olarak, ağ üzerinde belirli bir bölgeye kümelenmemek kaydıyla kapsanacak hedef bölgeler periyottan periyoda değişebildiğinden kapsama tanımı klasik kapsama tanımlarından farklıdır. Son olarak, kullanılan enerji modeli çalışmanın gerçek hayatla ilişkisini artıran Mica2 mote karakteristiklerine dayanmaktadır.

## 2.2 KAA Uygulamalarında Gecikmenin Önemi

IoT uygulamalarında KAA'ların kullanımı yaygınlaştıkça; protokoller ile sensör ve ağ gereksinimleri de ihtiyaçlar doğrultusunda gelişmektedir. İlk bakışta bu gereksinimler; *gecikme* (Roy ve diğ, 2018; Ferrari ve diğ, 2018; Huan ve Kim, 2019; Liang ve diğ, 2020; Sankayya ve diğ, 2020; Althoubi ve diğ, 2021) ve *ağ ömrü* (Kabakulak, 2019; Charr ve diğ, 2020; Cerulli ve diğ, 2021) gereksinimleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu noktada belirtmek gerekir ki, gecikmeye dair hizmet kalitesi beklentisi ile ağ ömrünün enerji verimliliği ile artırılması çabası ödünleşim içerisindedir.

Gecikmeyi azaltan ideal yaklaşım, sensörlerin tek atlamalı (İng. single hop) yollar üzerinden BS'ye iletim yapmalarıdır. Fakat bu durum BS'ye uzak olan sensörlerin enerji tüketimlerini önemli şekilde arttırarak pillerini erken tüketmelerine neden olabilmektedir. Öte yandan, veriler çok atlamalı yollar üzerinden BS'ye gönderildiğinde; sadece gecikmenin en aza indirilmesi, BS'ye yakın konumdaki sensörlerin veri iletiminde daha yoğun bir şekilde kullanılmalarına ve dolayısıyla da enerjilerini daha hızlı tüketecek hotspot'lar haline gelmelerine neden olmaktadır. Tüm bu nedenlerle enerji verimliliği ve gecikme arasında bir denge kurulması gerekmektedir (Thangaramya ve diğ, 2019; Krug ve O'Nils, 2019; Paul, 2020; Jaiswal ve Anand 2021; Patel ve diğ, 2021; Rahman ve diğ, 2021; Rishiwal ve Singh, 2021; Senthil ve diğ, 2021; Tripathi, 2021; Shukla ve diğ, 2022). Literatürde ağ ömrü ve gecikme problemlerini kapsama konsepti ile birleştirip algılama/kapsama kararlarını

da göze almış olan çalışmalar mevcuttur (Faheem ve Güngör, 2018; Chen ve Shen, 2018; Chouhan ve Jain, 2020; Preeth ve diğ, 2020; Shah ve diğ, 2020; Vaiyapuri ve diğ, 2021).

Bahsedilen problem, birbirleriyle çelişen farklı kriterlerin en iyilenmesini gerektirdiğinden çok amaçlı optimizasyon araçlarının kullanımına uygundur (Dhumane ve Prasad, 2018; Alarif ve Tolba, 2019; Liu ve diğ, 2019; Xiang ve diğ, 2019; Sujanthi ve Kalyani, 2020; Jeske ve diğ, 2020). Ancak bu çalışmalarda kapsama kriterleri dikkate alınmamış ve problemler için IP modelleri yerine sezgisel yöntemler önerilmiştir. Diğer yandan Calvete ve diğ. (2018) yine kapsama kriterinin göz önüne alınmadığı, yukarıda bahsedilen çalışmalarda ele alınan problemlere benzer bir problemi, sadece modelleme ve kesin çözüm yöntemleri kullanarak çözmüştür. Ayrıca, ağ ömrü enbüyüklemesi algoritmaları (Curry ve Smith, 2016), enerji verimli rotalama protokolleri (Guleria ve Verma, 2019; Nakas ve diğ, 2020) ve güvenilirlik temelli sorunlar için (Moore ve diğ, 2020) birkaç nispeten güncel inceleme makalesi de mevcuttur.

Literatürdeki çalışmalara dair ayrıntılı bir karşılaştırma Çizelge 2.1'de verilmiştir. Çalışmalar; ağ ömrü/enerji verimliliği, gecikme süresi, kapsama alanı, bağlanabilirlik, rotalama kararları, matematiksel model geliştirilip geliştirilmediği, çözüm yöntemi (sezgisel algoritmalar veya optimal çözümü garanti eden kesin çözüm yöntemleri) ve optimizasyon yapısına göre (çok amaçlı ya da değil) kategorize edilmiştir.

Çizelge 2.1: İkinci probleme dair literatür incelemesi.

Makale	Mat. Mod.	Opt.	Ağ Ömrü	Gecik.	Kap.	Bağ.	Rota.	Çok Amaçlı
Dhumane ve Prasad, 2018	X	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Faheem ve Güngör, 2018	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
Roy ve diğ., 2018	X	X	X	✓	✓	✓	✓	X
Ferrari ve diğ., 2018	X	X	X	✓	X	✓	✓	X
Kabakulak, 2019	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	X
Calvete ve diğ., 2018	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Chen ve Shen, 2018	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
Alarif ve Tolba, 2019	X	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Thangaramya ve diğ., 2019	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Huan ve Kim, 2019	X	X	X	✓	X	✓	✓	X
Krug ve O'Nils, 2019	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Liu ve diğ., 2019	X	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Xiang ve diğ., 2019	X	X	✓	✓	X	X	✓	✓
Chouhan ve Jain, 2020	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
Paul, 2020	✓	X	✓	✓	X	X	X	X
Preeth ve diğ., 2020	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
Shah ve diğ., 2020	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
Sujanthi ve Kalyani, 2020	X	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Charr ve diğ., 2020	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	X
Liang ve diğ., 2020	X	X	X	✓	✓	✓	✓	X
Sankayya ve diğ., 2020	X	X	X	✓	X	X	✓	X
Jeske ve diğ., 2020	✓	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Jaiswal ve Anand, 2021	✓	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Patel ve diğ., 2021	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Rahman ve diğ., 2021	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Rishiwal ve Singh, 2021	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Senthil ve diğ., 2021	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Tripathi, 2021	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Vaiyapuri ve diğ., 2021	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
Althoubi ve diğ., 2021	X	X	X	✓	X	✓	✓	X
Cerulli ve diğ., 2022	X	X	✓	X	✓	X	X	X
Shukla ve diğ., 2022	X	X	✓	✓	X	X	✓	X
Tez çalışması	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓



### **3. KAA'LAR İÇİN SG UYGULAMARINDA TOPOLOJİ GÜNCELLEMESİ İLE BİRLİKTE KAPSAMA VE BAĞLANTI TABANLI AĞ ÖMRÜ ENBÜYÜKLEMESİ**

Bu bölümde tez kapsamında ele alınmış ilk problem olan; KAA'lar için SG uygulamalarında topoloji güncellemesi ile birlikte kapsama ve bağlantı tabanlı ağ ömrü enbüyüklemesi, kapsamında gerçekleştirilmiş olan çalışmalar sunulmaktadır.

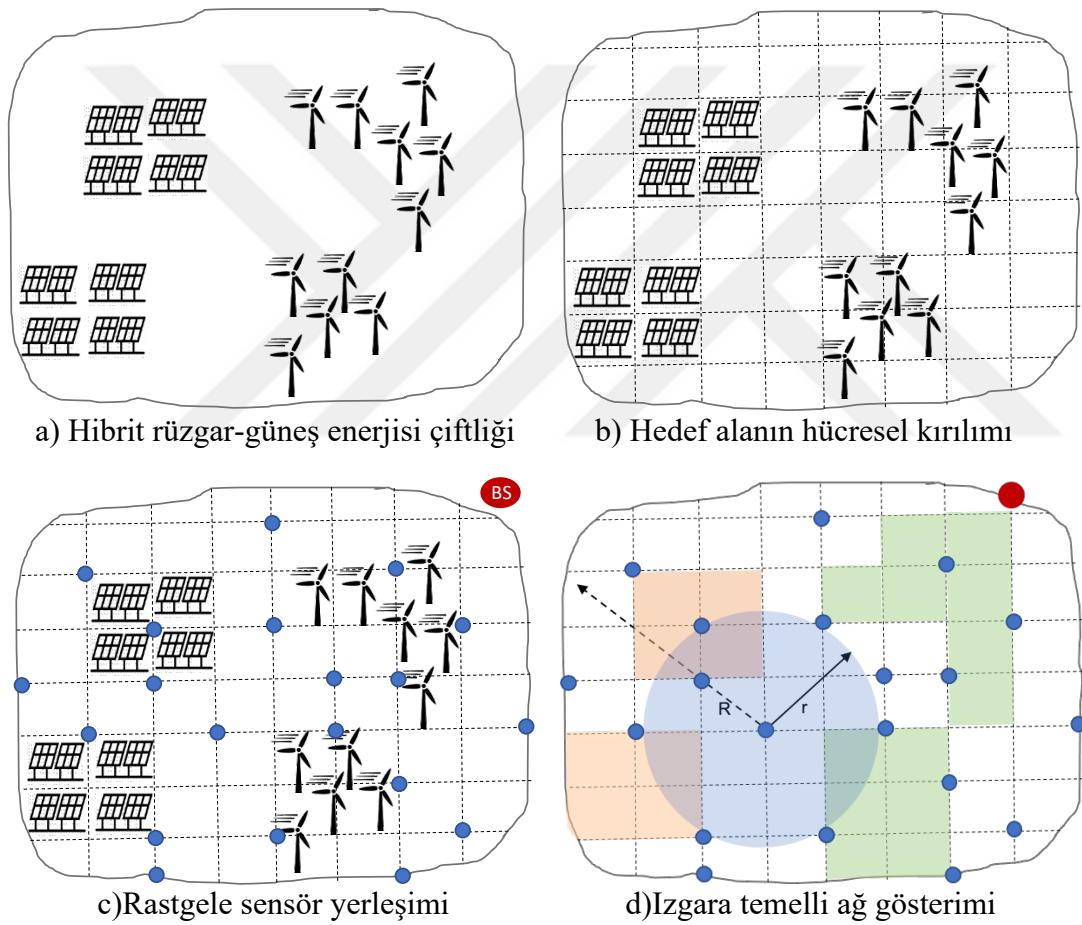
#### **3.1 Problem Formülasyonu ve Motivasyon**

Bu bölümde topoloji değişikliklerine uyum sağlayarak KAA'nın optimal şekilde çalışmaya devam etmesine izin veren çok dönemli bir 0-1 MIP modeli sunulmaktadır. Ele alınan yapı herhangi bir KAA uygulamasına kullanılabilecek kadar geneldir. Ancak hem KAA'ların etkili veri iletişimi sağlayan kilit bir teknoloji olarak kabul edilmesi hem de ilgili literatürün nispeten kısıtlı olması nedeniyle SG uygulaması üzerine yoğunlaşmıştır (Fadel ve diğ, 2015; Güngör ve diğ, 2010). Çalışmanın motivasyonu SG bünyesindeki enerji üretim sistemlerini izlemek için KAA'nın en verimli şekilde çalışmasını sağlayabilmektir. Ancak, bu tür sistemlerin SG'ye entegrasyonu bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Bölümün geri kalanında, SG uygulaması için potansiyel bir KAA'yı daha iyi örneklemek adına ilk olarak ağ yapısı tanımlanmakta ardından matematiksel model sunulmaktadır.

##### **3.1.1 Ağ yapısı**

Şebeke modeli Şekil 3.1a'daki hibrit rüzgar-güneş enerjisi çiftliği örneğine dayanarak açıklanmaktadır. Amaç, çiftliği gerekli/istenen kapsama seviyesini sağlayarak mümkün olduğu kadar uzun süre izleyebilen, enerji açısından verimli bir KAA uygulaması tasarlamaktır. Hedef bölgenin Şekil 3.1b'deki gibi birim hücrelere bölündüğü varsayılmaktadır. Bu yaklaşım hücre boyutundan bağımsız olduğundan ve bunun yanı sıra herhangi bir hücre kırılımında da geçerli olacağından dolayı kısıtlayıcı değildir. Önceden belirlenmiş sayıda sensörün köşe noktalarının bazılarında rastgele dağıldığı ve Şek. 3.1c'deki gibi ızgaranın sağ üst köşesinde tek bir statik BS'nin bulunduğu varsayılmaktadır. Güneş panelleri ve rüzgar türbinlerinin buldukları

hücrelerin renklendirildiği Şek. 3.1'deki ızgara tabanlı ağ temsili için matematiksel model oluşturulmuştur. Herhangi bir enerji çiftliğinde fiziksel kısıtlamalar nedeniyle paneller ve türbinler hedef bölgeye eşit olarak yayılmamış olabilir. Bazı durumlarda, hedef bölgeden dağınık bir şekilde toplanan veriler (örn. sıcaklık, rüzgar, nem, vb.), ancak hedef bölgenin çevresel koşullar açısından benzer sayılabileceği uygulamalarda yeterince temsil edici olabilmektedir. Diğer bazı durumlarda ise, hedef alanın bazı bölümleri daha kritik veya sorunlu oldukları için daha iyi gözetim gerektirebilmektedir. Sonuç olarak, özellikle de bu tarz durumlarda, % $\alpha$  kapsama, tam kapsamadan daha anlamlı ve makul bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.1: Hibrit rüzgar-güneş enerjisi çiftliği uygulaması için önerilen KAA modeli örneği

Özdeş sensörlerin olduğu durumda kapsama ve iletim menzilleri sırasıyla  $r$  ve  $R$  iken, sensörlerden BS'ye çok atlamalı yollar üzerinden veri iletimi mümkündür. Her sensörün çok yönlü bir anteni olduğu ve bu nedenle sensörün kendisi merkezinde olmak üzere  $r$  yarıçaplı bir disk gözlemleyebileceği varsayılmaktadır. Buna göre, bir



sensörün herhangi bir hücre merkezi ile arasındaki Öklid mesafesi  $r$ 'den fazla değilse o sensörün bu hücreyi gözlemleyebileceği kabul edilmektedir. Ayrıca herhangi bir periyotta bir hücre en fazla bir sensör tarafından algılanabilmektedir. Böylece fazladan veri trafiğinin önüne geçilebilmektedir. Önerilen kurguda herhangi bir çizelgeleme açık olarak uygulanmamakta ve her sensörün canlı olduğu, yani henüz pili bitmemiş olduğu müddetçe veri toplama, alma ve iletme işlevlerini yerine getirebileceği kabul edilmektedir.

Bilinen sensör konumları için, mümkün olan en uzun süre boyunca, tanımlanmış hizmet kalitesi seviyesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Kapsama seviyesi  $\alpha$ 'dan az olmadığı ve canlı sensörler tarafından algılanan tüm veriler BS'ye iletilebildiği sürece, bazı sensörler pillerini tüketse bile KAA'nın hayatta kalmaya devam edebileceği bilinmektedir. Bunu modellemek için, her periyotta optimal iletim yollarını belirleyen özgün bir, çok periyotlu 0-1 MIP modeli sunulmaktadır. Her periyot, o periyodun başında canlı olan en az bir sensörün pili bitince sona ermektedir. Bu, bazı sensörler ve dolayısıyla bağlantılar artık mevcut olmayacağı için bir topoloji değişikliği anlamına gelmektedir. Yeni topolojiye ilişkin iletim yollarının güncellenmesi, enerjisi tükenen sensörler olsa bile KAA'nın işlevsel kalmaya devam etmesini sağlamaktadır.

### 3.1.2 Matematiksel programlama modeli

Modelin amacı, periyot sürelerinin toplamına eşit olan işlevsel ağ ömrünü enbüyüklemektir. Periyotlar eşit olmayan uzunluklarda olabilmektedir. Periyot sayısına yani KAA'nın en fazla kaç tane topoloji değişikliğine uyarlanacağına önceden karar verilmektedir. Etkili topoloji değişikliği sayısı hakkında ayrıntılı bir tartışma Bölüm 3.2.3'te sunulmaktadır.

Enerji verimliliğinin yanı sıra, ağ güvenilirliği de göz önünde bulundurularak modele bazı kısıtlamalar getirilmiştir. İlk olarak, hiçbir sensörün herhangi bir periyotta belirli sayıda hücreden fazlasını algılaması istenmemektedir. Benzer şekilde, her sensörden geçen toplam veri miktarı da yukarıdan sınırlandırılmaktadır. Buradaki motivasyon, herhangi bir sensörün veri trafiğinin bariz kritik noktası olmasını engellemektir. Son olarak her periyotta tekli atama kuralı uygulanmaktadır. Buna göre bir hücre bir sensöre atanmışsa ilgili periyodun sonuna kadar bu durum değişmez. Her periyotta tüm hücrelerin en az  $\alpha$ 'sının kapsandığı kısmi kapsama ( $\alpha$ -Kapsama) uygulanmaktadır. Aynı zamanda, bu  $\alpha$ 'nın hedef bölgeye düzgün bir şekilde

yayılması, daha geniş bir alandan veri almak adına anlamlı olduğundan, algılanan hücrelerin belirli bir alanda kümelenmesini önlemek amacıyla her periyotta her hücrenin komşuluğu için minimum kapsama düzeyi gereksinimi tanımlanmaktadır.

0-1 MIP modelinde,  $N_0$  kümesi sınırlı enerjiye sahip sensörler kümesini ifade etmektedir. Statik olduğu varsayılan BS ise sınırsız enerjiye sahiptir. Bu durumda,  $N = N_0 \cup \{BS\}$  olacak şekilde  $A = \{(i, j): i \in N_0, j \in N \setminus \{i\}, d_{ij} \leq R\}$  sensör çiftleri arasındaki yönlü doğrudan bağlantıların kümesidir. Dolayısıyla KAA,  $G = (N, A)$  yönlü çizgesi ile temsil edilmektedir.  $C$  kümesi  $n \times n$ 'lik ızgara yapısındaki hedef bölgeyi oluşturan hücrelerden oluşmaktadır. Bir sensörün yalnızca merkezleri kapsama alanı içerisinde bulunan hücrelerin verilerini sezebildiği kabulü yapılmaktadır. Buna göre her bir  $i \in N_0$  sensörünün algılayabildiği hücrelerin kümesi  $C_i$ 'dir. Başlangıçta sensörler  $\cup_{i \in N_0} C_i = C$  olacak şekilde yerleştirilmiştir yani en başta bütün hedef bölge tamamen kapsanabilir durumdadır. Spesifik tanımlı uygulamaya bağlı olan her bir  $c \in C$  hücrenin komşuluğu  $CN_c$  ile gösterilmektedir. Bir diğer deyişle,  $c \in C$  hücresi için komşuluk;  $c$  ile belirli bir etkileşim sağlayan hücrelerin oluşturduğu  $CN_c$  kümesidir. Örneğin, Şekil 3.1d'deki ağ yapısında, her  $c \in C$  için,  $CN_c$  komşuluğunun  $c$ 'yi ve sınırları  $c$  ile en az bir kesişme noktasına sahip diğer tüm hücreleri içerdiği varsayılmaktadır. Dolayısıyla Şekil 3.1d'de  $|CN_c| \leq 9 \forall c \in C$  olduğu kabul edilmektedir. Benzer şekilde;  $S_c$ ,  $c \in C$  hücrelerini sezebilen sensörlerin kümesidir. Son olarak, dikkate alınması gereken maksimum topoloji değişikliği sayısını ifade eden ve bilinen  $T^{max}$  için,  $T = \{1, \dots, T^{max}\}$  her biri en az bir sensörün enerjisinin tükenmesi ile sonlanan periyotların kümesidir. Çalışma boyunca kullanılan notasyon Çizelge 3.1'de sunulmaktadır.

### 3.1.2.1 Parametreler

Her sensör başlangıçta  $B_i$  birim enerjiye sahiptir. Sensörlerin bir birim veriyi algılamak ( $\mathcal{P}$ ), almak ( $PRX$ ), ve göndermek ( $E_{ij}$ ) için harcadıkları enerji miktarı bilinmektedir. Her  $j \in N_0$  sensörü ancak  $c \in C_j$  hücrelerini algılayabilir ve ancak  $(i, j) \in A$  olan  $i \in N_0$  sensöründen gelen veriyi alabilir.  $j \in N_0$ 'dan  $i \in N_0 \setminus \{j\}$ 'ye veri gönderebilmek için  $(j, i) \in A$  olmalıdır. Veri iletiminde harcanan enerji miktarını hesaplamak için Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi "Mica2 mote" karakteristikleri kullanılmıştır. Buna göre  $l$  güç seviyesinde maksimum iletim menzili  $R_{max}(l)$  ve bir bit veri iletmek için harcanan enerji  $E(l)$ 'dir.  $(i, j) \in A$  üzerindeki birim bit iletim

enerjisi ( $E_{ij}$ ); sensörler arasındaki Öklid mesafesine ( $d_{ij}$ ) ve bu mesafede veri iletimini sağlamak için gereken güç seviyesine ( $l$ ) bağlıdır.  $d_{ij}$  mesafesinde iletim için optimal güç seviyesi  $l_{opt-ij} = \operatorname{argmin}_{l \in S_l, d_{ij} \leq R_{\max}(l)} (E(l))$  ve dolayısıyla  $E_{ij} = E(l_{opt-ij}) \forall (i, j) \in A$ 'dır. Örneğin, bir  $(i, j) \in A$  için  $d_{ij} = 23 \text{ m}$  ise  $l_{opt-ij} = 5$  ve  $E_{ij} = 710.94 \text{ nJ/bit}$  olacaktır.

Çizelge 3.1: Kullanılan notasyon ve tanımları.

<b>Kümeler:</b>		<b>Parametreler:</b>	
$N$	Düğümmler	$T^{\max}$	Maksimum sayıda topoloji değişikliği
$N_0$	Sensörler	$r$	Bir sensörün algılama yarıçapı
$A$	Bağlantılar	$R$	Bir sensörün iletim menzili
$C$	Hücreler	$\alpha$	Beklenen kapsama seviyesi
$C_i$	$i \in N_0$ tarafından algılanabilen hücreler	$\lambda$	Komşuluk için kapsama seviyesi
$S_c$	$c \in C$ 'yi sezebilen sensörler	$B_i$	$i \in N_0$ sensörünün başlangıç enerjisi
$T$	Periyotlar	$\Psi$	Birim veri algılama enerjisi
<b>Karar değişkenleri:</b>		$PRX$	Birim veri alım enerjisi
$x_{ci}^t$	1 eğer $t \in T$ periyodunda $c \in C$ hücresi $i \in S_c$ sensörü tarafından algılanıyorsa	$l$	Güç seviyesi
$f_{ij}^{kt}$	$t \in T$ periyodunda $k \in N_0$ tarafından algılanıp $(i, j) \in A$ üzerinde iletilen bit miktarı	$d_{ij}$	$i \in N_0$ ve $j \in N_0$ arasındaki Öklid mesafesi
$h_{it}$	1 eğer $i \in N_0$ sensörü $t \in T$ periyodunda hayattaysa	$R_{\max}(l)$	$l$ güç seviyesi ile maksimum iletim menzili
$D^t$	1 eğer $t \in T$ periyodunda KAA işlevsel durumdaysa	$E(l)$	$l$ güç seviyesinde birim veri iletim enerjisi
$P_i^t$	$t \in T$ periyodu başında $i \in N_0$ sensörünün başlangıç enerjisi	$E_{ij}$	$i$ 'den $j$ 'ye birim veri iletim enerjisi
$L_i^t$	$t \in T$ periyodu sonunda $i \in N_0$ sensörünün kalan enerjisi	$b_c$	$c$ hücresinden birim zamanda sezilen veri miktarı
$T^t$	$t \in T$ periyodunun uzunluğu	$\mu$	Bir sensör için veri iletim eşiği sabiti

Birim zamanda  $c \in C$  hücresinden algılanacak veri miktarı  $b_c$ 'dir. Daha önce de belirtildiği gibi, her sensörün algılayabileceği hücre sayısı bir güvenilirlik gereksinimi olarak sınırlandırılmaktadır. Bu amaçla her bir  $j \in N_0$  sensörünün  $C_j$ 'deki en fazla  $\Upsilon$  hücreden gelen verileri algılamasına izin verilmektedir.  $\mu$ , bir periyotta kaynaklardan toplanıp BS'ye iletilecek olan verinin tek bir sensör üzerinden geçebilecek maksimum oranıdır ( $0 < \mu < 1$ ). Son olarak  $\lambda$ , her sensörün komşuluğu için gerekli minimum kapsama oranını temsil etmektedir ( $0 < \lambda < 100$ ).

Çizelge 3.2: Her güç seviyesi ( $l$ ) için Birim İletim Enerjisi ( $E(l)$ - nJ/bit) ve İletim Menzili ( $R_{max}(l)$ -m)

$l$	$E(l)$	$R_{max}(l)$	$l$	$E(l)$	$R_{max}(l)$
1	671,88	19,30	14	843,75	41,19
2	687,50	20,46	15	867,19	43,67
3	703,13	21,69	16	1078,13	46,29
4	705,73	22,69	17	1132,81	49,07
5	710,94	24,38	18	1135,42	52,01
6	723,96	25,84	19	1179,69	55,13
7	726,56	27,39	20	1234,38	58,44
8	742,19	29,03	21	1312,50	61,95
9	757,81	30,78	22	1343,75	65,67
10	773,44	32,62	23	1445,31	69,61
11	789,06	34,58	24	1500,01	73,79
12	812,50	36,66	25	1664,06	78,22
13	828,13	38,86	26	1984,38	82,92

### 3.1.2.2 Karar değişkenleri

Verilmesi istenen ana kararlar her periyotta, hücrelerin sensörlere nasıl atanacağı ve verilerin sensörlerden BS'ye çok atlamalı yollar üzerinden nasıl yönlendirileceğidir. Bu amaçla ikili atama karar değişkeni  $x_{ci}^t$ ;  $t \in T$  periyodunda,  $c \in C$  hücresi,  $i \in S_c$  sensörü tarafından algılanıyorsa 1, değilse 0 değerini almaktadır.  $f_{ij}^{kt}$  ise  $t \in T$  periyodunda  $k \in N_0$  sensörü tarafından algılanıp  $(i, j) \in A$  üzerinde iletilen veri miktarını gösteren sürekli akış değişkenidir. Ayrıca her periyotta her bir sensör ve genel ağ için gösterge değişkenleri mevcuttur. Dolayısıyla, eğer  $i \in N_0$  sensörü  $t \in T$  periyodunda hayattaysa, yani  $t \in T$  başlangıcında pozitif pil gücüne sahipse  $h_{it}=1$  ve  $t \in T$  periyodunda ağ işlevsel durumdaysa  $D^t=1$ 'dir. Ayrıca, her  $t \in T$  periyodunun başında ve sonunda her bir  $i \in N_0$  sensörü için başlangıç ve kalan enerji miktarlarını gösteren sürekli karar değişkenleri  $P_i^t$  ve  $L_i^t$  tanımlanmıştır. Son olarak  $\forall t \in T$  için periyot süresi  $T^t$  ile ifade edilmektedir.

### 3.1.3 Ağ ömrünü enbüyükleyen çok periyotlu $\alpha$ kapsama modeli (ÇP $\alpha$ KM)

$\alpha$ -kapsama ve ağ güvenilirliği gereksinimlerini sağlayarak ağın işlevsel kadığı sürenin enbüyüklenmesinin amaçlandığı ilk 0-1 MIP modeli (ÇP $\alpha$ KM) aşağıdaki gibidir:

$$Max \quad \sum_{t \in T} T^t$$

öyle ki:

$$\sum_{i \in S_c} x_{ci}^t \leq 1 \quad \forall c \in C, t \in T \quad (3.1)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^{kt} - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}^{kt} = \begin{cases} T^t \sum_{c \in C_i} x_{ci}^t b_c & \text{eğer } i = k \\ 0 & i \in N_0 \setminus \{k\} \end{cases} \quad \forall i, k \in N_0, t \in T \quad (3.2)$$

$$\sum_{(j,BS) \in A} f_{jBS}^{kt} = T^t \sum_{c \in C_k} x_{ck}^t b_c \quad \forall k \in N_0, t \in T \quad (3.3)$$

$$\sum_{k \in N_0} \left( \sum_{(j,i) \in A} PRX f_{ji}^{kt} + \sum_{(i,j) \in A} E_{ij} f_{ij}^{kt} \right) + \Psi T^t \sum_{c \in C_i} x_{ci}^t b_c + L_i^t = P_i^t \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.4)$$

$$P_i^t = L_i^{t-1} \quad \forall t \in \{2..T\}, i \in N_0 \quad (3.5)$$

$$P_i^1 = B_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.6)$$

$$\sum_{c \in C_i} x_{ci}^t \leq \Upsilon h_i^t \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in N_0} h_i^t \leq \sum_{i \in N_0} h_i^{t-1} - 1 \quad \forall t \in \{2..T\} \quad (3.8)$$

$$h_i^1 = 1 \quad \forall i \in N_0 \quad (3.9)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^{kt} \leq \mu T^t \sum_{i \in N_0} \sum_{c \in C} x_{ci}^t b_c \quad \forall j \in N_0, t \in T \quad (3.10)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in S_c} x_{ci}^t \geq \lceil 0,01\alpha |C| D^t \rceil \quad \forall t \in T \quad (3.11)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in S_c} x_{ci}^t \leq |C| D^t \quad \forall t \in T \quad (3.12)$$

$$h_i^t \leq P_i^t \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.13)$$

$$P_i^t \geq B_i (h_i^t - 1) + 1 \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.14)$$

$$\sum_{h \in CN_c} \sum_{i \in S_c} x_{hi}^t \geq \lceil 0,01\lambda |CN_c| \rceil \quad \forall c \in C, t \in T \quad (3.15)$$

$$f_{ij}^{kt} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N_0, t \in T \quad (3.16)$$

$$x_{ci}^t \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in S_c, t \in T \quad (3.17)$$

$$h_i^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.18)$$

$$D^t \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (3.19)$$

$$L_i^t, P_i^t \geq 0 \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.20)$$

$$T^t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (3.21)$$

ÇPαKM'nin amaç fonksiyonunda periyot uzunluklarının toplamı; yani, ağın hayatta kaldığı toplam süre önceden belirlenmiş hizmet kalitesi standartları altında enbüyüklenmektedir. Her hücrenin her periyotta en fazla bir sensöre atanması (3.1) ile sağlanır. Akış dengesi kısıtları (3.2) ve (3.3) birlikte, bir periyotta hedef bölgeden algılanan tüm verinin aynı periyotta BS'ye ulaşmasını garanti etmektedir. (3.4); her periyodun sonunda, her bir sensörün kalan enerjisinin, periyodun başlangıcındaki pil seviyesine ve o periyottaki enerji tüketimine göre belirlendiği enerji dengesi kısıtıdır.  $i \in N_0$  sensörünün  $t \in T$  periyodundaki başlangıç enerjisi, bir önceki periyottan kalan enerjisine (3.5) ve (3.6) ile eşitlenmektedir. Her sensörün her periyotta algılayabildiği hücre sayısı (3.7)'deki gibi sınırlandırılmıştır. Bir periyottan diğerine geçişin en az bir sensör enerjisinin tükenmesi ile gerçekleşeceği (3.8)'de ve ilk periyodun başlangıcında tüm sensörlerin canlı olduğu (3.9)'da ifade edilmektedir. (3.10) sayesinde bir sensör, bir periyotta algılanan toplam verinin en fazla  $\mu$ 'sünü iletebilir. İstenen hizmet kalitesi seviyesi ile ilgili olarak; (3.11) hücrelerin en az  $\alpha$ 'sı kapsanabiliyorsa KAA'yı canlı olarak tanımlar ve (3.12) ağ ömrü sona erdiğinde hiçbir hücrenin algınamayacağını ifade etmektedir. (3.13) ve (3.14), her periyot için her sensörün başlangıç enerjisini canlı olup olmama durumuyla ilişkilendirmektedir. Her hücrenin komşuluğu için  $\lambda$  minimum kapsama gereksinimi (3.15) ile garanti edilmektedir. Son olarak, (3.16)–(3.21) karar değişkenleri için işaret kısıtlarıdır.

ÇPαKM; (3.2)-(3.4) ve (3.10)'da yer alan  $T^t x_{ci}^t$  terimlerinden dolayı doğrusal değildir.

Ancak bu model  $Y_{ic}^t = T^t x_{ci}^t$  ikamesi ile doğrusallaştırılabilir. Bunun için;

$$Y_{ic}^t \leq T^t \quad \forall c \in C, i \in S_c, t \in T \quad (3.22)$$

$$Y_{ic}^t \geq T^t - M(1 - x_{ci}^t) \quad \forall c \in C, i \in S_c, t \in T \quad (3.23)$$

$$Y_{ic}^t \leq Mx_{ci}^t \quad \forall c \in C, i \in S_c, t \in T \quad (3.24)$$

$$Y_{ic}^t \geq 0 \quad \forall c \in C, i \in S_c, t \in T \quad (3.25)$$

kısıtları doğrusallaştırılmış DÇPαKM modelini elde etmek için ÇPαKM'ye eklenmelidir.

### 3.1.4 Birim zaman ayrıştırmasına dayalı yaklaşım modelleri

DÇPαKM'deki değişkenlerin ve kısıtların sayıları  $O(n^6 T^{max})$  boyutunda olup orta büyüklükteki  $n \times n$  ağlar için dahi hızla artmaktadır. Dolayısıyla modelin makul sürelerde çözümü küçük örnekler için bile oldukça zor hale gelmektedir. Çözüm olarak, iki farklı amaç fonksiyonu ile KAA'nın birim zaman davranışını eniyileyen

nispeten daha küçük modellerden faydalanılması düşünülmüştür. Bu aşamada yapılan dönüşümlerde KAA'nın işlevselliğini koruduğu herhangi bir  $t \in T$ 'de  $T^t > 0$  olduğu çıkarımı kullanılmaktadır (Ye ve Ordóñez, 2008). Bu nedenle;  $t \in T$  periyodunda birim zamanda  $k \in K$  kaynağından çıkıp,  $(i, j) \in A$  üzerinde iletilen akış miktarını ifade eden; yeni, negatif olmayan, sürekli bir karar değişkeni  $g_{ij}^{kt} = \frac{f_{ij}^k}{T^t} \forall (i, j) \in A, k \in N_0, t \in T$  tanımlanmıştır. Sonuç olarak (3.2)-(3.4) ve (3.10) yerine doğrusal modele

$$\sum_{(i,j) \in A} g_{ij}^{kt} - \sum_{(j,i) \in A} g_{ji}^{kt} = \begin{cases} \sum_{c \in C_i} x_{ci}^t b_c & \text{eğer } i = k \\ 0 & i \in N_0 \setminus \{k\} \end{cases} \quad \forall k, i \in N_0, t \in T \quad (3.26)$$

$$\sum_{(j,BS) \in A} g_{jBS}^{kt} = \sum_{c \in C_k} x_{ck}^t b_c \quad \forall k \in N_0, t \in T \quad (3.27)$$

$$\sum_{k \in N_0} \left( \sum_{(j,i) \in A} PRX g_{ji}^{kt} + \sum_{(i,j) \in A} E_{ij} g_{ij}^{kt} \right) + \Psi \sum_{c \in C_i} x_{ci}^t b_c + \beta_i^t = \gamma_i^t \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.28)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{(i,j) \in A} g_{ij}^{kt} \leq \mu \sum_{i \in N_0} \sum_{c \in C_i} x_{ci}^t b_c \quad \forall j \in N_0, t \in T \quad (3.29)$$

eklenmelidir. Burada,  $i \in N_0$  ve  $t \in T$  periyodundaki her birim zaman için  $\gamma_i^t = \frac{P_i^t}{T^t}$  kullanılabilecek enerji miktarını ve  $\beta_i^t = \frac{L_i^t}{T^t}$  birim zaman sonunda kalan enerji miktarını göstermektedir. Ayrıca (3.5), (3.6), (3.13), (3.14) ve işaret kısıtları da aşağıdaki gibi değiştirilmelidir:

$$\gamma_i^t = \beta_i^{t-1} \quad \forall t \in \{2..T\}, i \in N_0 \quad (3.30)$$

$$\gamma_i^1 = B_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.31)$$

$$h_i^t \leq \gamma_i^t \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.32)$$

$$\gamma_i^t \geq B_i(h_i^t - 1) + 1 \quad \forall i \in N_0, t \in T \quad (3.33)$$

$$g_{ij}^{kt} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in N_0, t \in T \quad (3.34)$$

$$\beta_i^t, \gamma_i^t \geq 0 \quad \forall i \in N_0, t \in T. \quad (3.35)$$

Bu dönüşüm, sistem davranışını her periyot için birim zaman ayrıştırmasında eniyilememizi sağlamaktadır. Ancak bu dönüşümden sonra ağ ömrünü ifade eden  $T^t$  karar değişkeni modelden kaldırıldığından amaç fonksiyonun da bu çerçevede güncellenmesi gerekmiş ve birim zaman enerji tüketimini temel alan iki farklı amaç fonksiyonu önerilmiştir. Bunlardan ilki ( $MaxE$ ) tüm periyotların toplam maksimum

birim zaman enerji tüketimini enküçükleme ve ikincisi (*SumE*) de tüm periyotlarda bütün sensörlerin toplam birim zaman enerji tüketimini enküçükleme.

*ÇPaKM* de her periyot, o periyottaki aktif sensörlerden en az birinin pili bittiği zaman sona ermektedir. Tek bir periyot olduğunda ve tüm sensörler aynı enerji seviyesi ile başladığında, ilk ölen sensör maksimum enerji tüketimine sahip sensör olacaktır. *MaxE* amaç fonksiyonu bu gözlemden doğmuştur. Sonuç olarak,  $i \in N_0$  sensörünün  $t \in T$  periyodundaki enerji tüketimi  $\gamma_i^t - \beta_i^t$  ve  $t \in T$ 'deki maksimum tüketim miktarı  $G^t = \max_{i \in N_0} \{\gamma_i^t - \beta_i^t\}$  olmak üzere *MaxE* amaç fonksiyonunun kullanıldığı model aşağıdaki gibidir:

<b><i>MMaxE</i>:</b>	$min \sum_{t \in T} G^t$	
öyle ki:	$G^t \geq \gamma_i^t - \beta_i^t$	$\forall i \in N_0, t \in T$ (3.36)
	(3.1), (3.7), (3.8), (3.9), (3.11), (3.12), (3.15), (3.17)-(3.19), (3.26)-(3.35).	

Diğer yandan, ikinci modelde *SumE* amaç fonksiyonu ile sensörlerin toplam enerji tüketimi enküçüklemektedir:

<b><i>MSumE</i>:</b>	$min \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_0} \gamma_i^t$
	öyle ki: (3.1), (3.7), (3.8), (3.9), (3.11), (3.12), (3.15), (3.17)-(3.19), (3.26)-(3.35).

Enerji dengesi kısıtları (3.28) ve canlı sensörlere hücre ataması gerçekleştirilmesini sağlayan (3.7) ve (3.32) kısıtları ile *MMaxE* ve *MSumE* modellerinde en az bir sensör ölümü bir periyodun sonunu ifade etmektedir. Yani; eğer  $j^* \in N_0$  sensörünün enerjisi  $t^*$  periyodunda biterse,  $h_i^{t^*+1} = 0$  ve dolayısıyla  $x_{ci}^{t^*+1} = 0 \forall c \in C_{i^*}, t \in T: t \geq t^* + 1$  olacaktır. Bu da iletim yollarında bir güncelleme yapılmasının gerekeceği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak iki model *DÇPaKM* ile karşılaştırılabilir durumdadır. Bölüm 3.2'de *DÇPaKM*'nin birim zaman ayrıştırması ile elde edilen *MMaxE* ve *MSumE*'ye dayalı kapsamlı sonuçlar sunulmaktadır.

### 3.2 Deneysel Çalışmalar

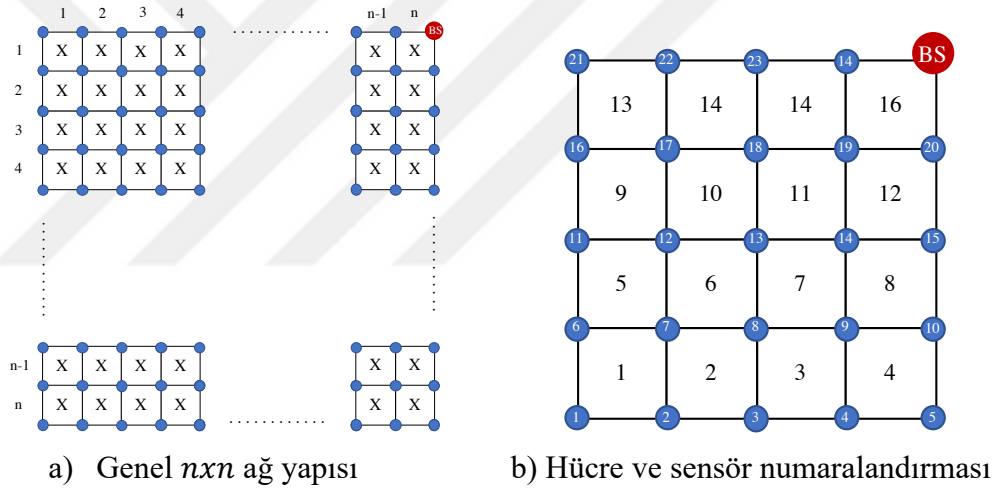
Analizlerin ana motivasyonu; bazı sensörlerin tüm enerjilerini tüketmesi neticesinde ağ topolojisi değişse dahi, kapsama seviyesi ve bağlantırlık gereksinimlerinden ödün vermeden ağ ömrünün nasıl uzatılabileceğini incelemektir. Bu amaçla; KAA'nın en fazla  $T^{max} - 1$  kez topoloji değişikliğine uyarlandığı, çok periyotlu MIP modeli *DÇPaKM* ile onun birim zaman ayrışımına dayalı *MMaxE* ve *MSumE* modelleri



incelenmiştir. Bölüm 3.2.1'de deneysel çalışma için oluşturulan farklı simülasyon topolojileri ve başlangıç parametreleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir. Ayrıca,  $MMaxE$  ve  $MsumE$ 'deki birim zaman ayrışımı nedeniyle ilgili çözüme karşılık gelen ömür değerlerini elde etmek için uygulanması gereken prosedür Bölüm 3.2.2'de açıklanmaktadır. Bölüm 3.2.3'teki duyarlılık analizine dayanarak makul bir  $T^{max}$  değeri belirlenmektedir. Sonuç olarak, Bölüm 3.2.4'te ağ ömrü ve kapsama düzeyi açısından üç modelin her birinin nasıl performans gösterdiği değerlendirilmektedir.

### 3.2.1 Veri kümesi

Deneysel analizler dört farklı büyüklükteki ızgara ağ topolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Açıklamayı kolaylaştırmak için, Şekil 3.2'a da gösterildiği gibi yan yana yerleştirilmiş  $n$  – hücre dizisi içeren ağ yapısından; test ortamında  $n \in \{4,6,8,10\}$  olan  $n \times n$  ağ olarak bahsedilmektedir.



Şekil 3.2: Temel ızgara yapısı.

Bir  $n \times n$  ızgarasında  $n^2$  hücre vardır ve her köşe noktasında bir sensör yerleştirildiğinde ilgili ağda en fazla  $N^{max} = (n + 1)^2 - 1$  sensör bulunabilmektedir. Bununla birlikte, sensörlerin çok yakın yerleştirilmesi; artan gürültü, tekrarlama gibi çeşitli aksaklıklara yol açacağından, gerçek uygulamalarda böyle yoğun bir yerleştirme stratejisi genellikle tercih edilmemektedir. Bu nedenle,  $\rho \in \{0,25; 0,5; 0,75\}$  olduğu  $|N_0| = \rho N^{max}$  sensöre sahip KAA'lar için rastgele örnekler oluşturulmuştur. Temel gösterim, Şekil 3.2'b'deki gibidir. Bütün analizlerde  $|N_0|$  tane sensör ile hedef bölgenin başlangıçta tamamen kapsanabilir olduğu ve sensörlerin ızgara köşelerine rastgele saçıldığı örnekler dikkate alınmıştır. Gösterim kolaylığı için,

BS'nin ızgaranın sağ üst köşesinde bulunduğu varsayılmaktadır. Ön sonuçlarımız; BS konumunun modellerimizin göreceli performanslarını etkilemediğini gösterdiğinden, genelliği kaybetmeden böyle bir varsayım yapılabilmektedir. Octave 5.1 kullanarak örnekler oluşturulmuş ve her örnek için her modelin Cplex 12.6 ile çözümünde azami süre 10800 CPU saniye olarak tanımlanmıştır. Tüm deneyler Intel Core i7, 4.00 Ghz işlemci ve 32 GB RAM'e sahip bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Son olarak; simülasyon parametre değerleri Çizelge 3.3'te gösterilmiş olup, burada Bölüm 3.2.3'teki analizlere dayalı olarak en makul  $T^{max}$  değeri belirlenmiştir. Ayrıca Çizelge 3.2 ve ilgili açıklamalara göre  $E_{ij}$  değerleri hesaplanmıştır.

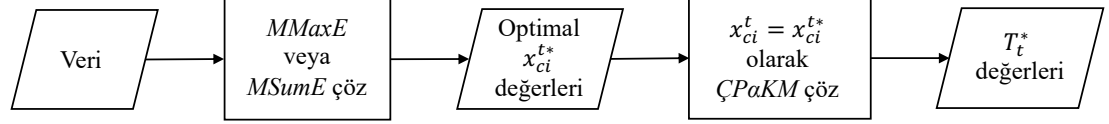
Çizelge 3.3: Simülasyon parametre değerleri.

<b>Parametereler:</b>		
$T^{max}$	Max sayıda farklı topoloji	Bölüm 3.2.3
$r$	Bir sensörün algılama yarıçapı	43 m
$R$	Bir sensörün iletim menzili	83 m
$\alpha$	İstenen kapsama seviyesi eşik değeri	%35
$\lambda$	Komşuluk kapsama seviyesi eşik değeri	%12,5
$B_i$	$i \in N_0$ için başlangıç enerjisi	100 KJ
$\Psi$	Birim veri algılama enerjisi	50 nJ/bit
$PRX$	Birim veri alım enerjisi	50 nJ/bit
$E_{ij}$	$i$ 'den $j$ 'ye bit gönderim enerjisi	Çizelge 3.2
$b_c$	Birim zamanda $c$ hücresinden algılanan veri miktarı	1bps
$\mu$	Bir sensör için veri iletim oranı eşik değeri	0.15

### 3.2.2 $MMaxE$ ve $MSumE$ için ağ ömrünün elde edilmesi

$D\mathcal{C}P\alpha KM$ 'nin iki ayrı amaç fonksiyonu ile birim zaman ayırımı  $MMaxE$  ve  $MSumE$ 'yi ortaya çıkarmıştır. Bu iki model çözüldüğünde doğrudan periyot süreleri elde edilememektedir. Dolayısıyla, bu iki modelle ele edilen optimal birim zaman enerji sarfiyatlarına bakarak optimal periyot sürelerini ( $T_t^*$ ) bulmak için bir ara adım gereklidir. Bu amaçla, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi,  $MMaxE$  ve  $MSumE$ 'den elde edilen optimal hücre-sensör atamaları ( $x_{ci}^{t*}$ ) sabitlenerek  $\mathcal{C}P\alpha KM$  çözülmektedir. Bu aşamada atama değişkenleri optimal  $x_{ci}^{t*}$  değerlerine sabitlendiğinde  $\mathcal{C}P\alpha KM$  doğrusal olmakta ve Cplex gibi ticari çözücüler vasıtasıyla çözülebilmektedir. Şekil 3.3'te her

periyotta optimal hücre sensör atamalarını kullanarak periyot sürelerine ulaşmak için uygulanan metodolojinin adımları gösterilmektedir. Prosedür  $MMaxE$  ve  $MSumE$  için aynı olup, optimal hücre sensör atamalarına dayalı olarak optimal periyot sürelerini ( $T_t^*$ ) vermektedir. Bu metodoloji, çalışmanın geri kalanında sunulan yaşam süresi temelli analizler için kullanılmaktadır.



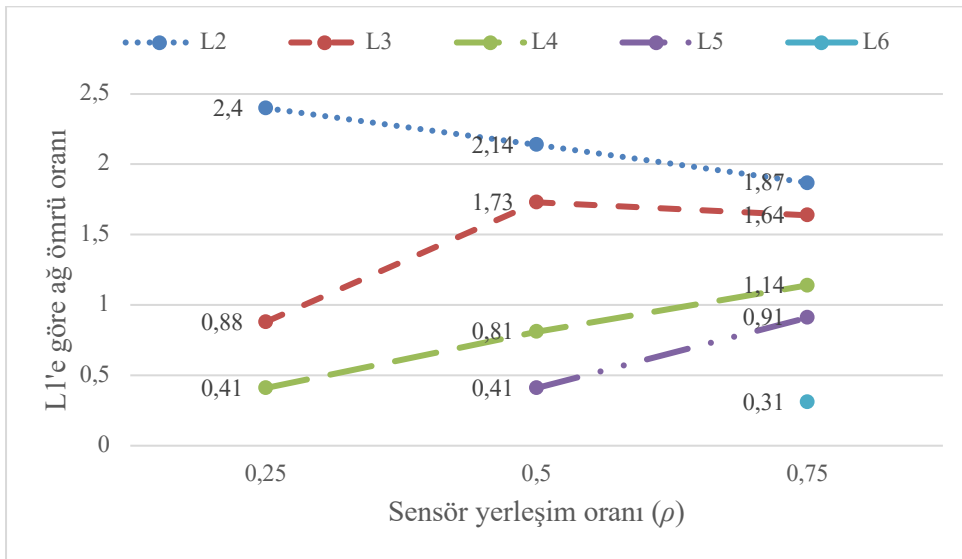
Şekil 3.3:  $MMaxE$  veya  $MSumE$  çözümlerine göre optimal periyot sürelerinin belirlenmesi.

### 3.2.3 Planlama ufkunun belirlenmesi

Bu bölümün motivasyonu, çok periyotlu optimizasyon yaklaşımının ağ ömrü açısından katkısını incelemektir. Yani,  $T^{max}$  üzerinde duyarlılık analizi yapılarak KAA'nın uyarlanması beklenen azami topoloji değişikliği sayısı  $T^{max}$  için makul bir değer belirlenecektir. Bu amaçla tez kapsamında planlama ufku olarak da bahsedilen  $T^{max}$  değeri birer birer artırılarak ağ ömründeki marjinal değişimler incelenmektedir. Problem tanımına göre; periyotların uzunluklarının eşit olmaması mümkündür ve her periyot, o periyotta en az bir sensörün pil enerjisi tükendiğinde sona ermektedir. Dolayısıyla,  $T^{max} = 1$  olduğunda problem, kapsama gereksinimleri altında *ilk sensör ölene kadar geçen süreyi enbüyüklemeye eşdeğerdir*. Öte yandan,  $T^{max} \geq 2$  olduğunda toplam ağ ömrü; ağın işlevselliğini sürdürdüğü ve beklenen hizmet kalitesini sağlamaya devam ettiği tüm periyotların uzunlukları toplamına eşit olmaktadır. Böylelikle, çok periyotlu modelin geleneksel yaşam süresi tanımına kıyasla sağladığı iyileştirmenin kapsamı değerlendirilebilmektedir.  $T^{max} = 2$  için  $DÇPaKM$  çözüm süresi nispeten uzun olduğundan ve ön test sonuçları  $MSumE$ 'nin çok periyotluluğun katkısını daha tatmin edici bir şekilde yansıttığını gösterdiğinden bu bölümdeki sonuçlar  $MSumE$ 'ye dayanmaktadır. Uygun bir değer belirlemek için  $T^{max} = 1$  ile başlayıp, tek periyotlu duruma kıyasla ağ ömründeki değişimin anlamsız/önemsiz hale geldiği  $T^{max} = 6$  değerine kadar  $T^{max}$  değeri birer birer artırılmıştır. Burada  $T^{max} = k$  olduğunda, topoloji değişikliklerine uyum sağlamak için yapılan rota güncellemelerinin sayısı  $k - 1$ 'dir. Bu bölümdeki analizlerin amacı, çözüm süresi ve ağ ömrüne katkı bakımlarından makul bir  $T^{max}$  değeri belirlemek

olduğundan,  $4 \times 4$  ağ örneklemi dikkate alınmıştır. Analizlerde; %25 ve %50 oranlarında sensör yerleştirilmiş olan ağlarda 10, oldukça yoğun bir yerleşim olan  $|N_0| = 0,75N^{max}$  için ise yeterince temsil edici olduğundan beş rastgele topoloji değerlendirilmiştir. Fakat, sonraki bölümlerde farklı ağ boyutlarına sahip daha büyük bir test kümesi kullanılmaktadır.

Çok periyotlu optimizasyon modelinin katkısını tartışmak için; ağ ömrünün, ilk sensör ölene kadar geçen süre olan  $L_1$ 'e kıyasla nasıl değiştiği Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Burada  $L_k$ ;  $T^{max} = k$  olduğunda ağın ortalama ömrünü göstermek üzere,  $T^{max} \in \{2,3,4,5,6\}$  için sonuçlar verilmektedir. Bu amaçla, test ortamındaki her rastgele  $I$  örneği için  $MSumE$  modeli çözülmekte ve Şekil 3.3'teki prosedür kullanılarak  $T_t^*$ ,  $\forall t = 1, \dots, k$  değerleri hesaplanmaktadır. Bu durumda,  $L(I) = \sum_{t \in T} T_t^*$  toplam ağ ömrünü ifade etmektedir. Sonrasında, ortalama ağ ömrü ( $L_k$   $\rho \in \{0,25; 0,5\}$  için  $L_k = \sum_{I=1}^{10} L(I)/10$  ve  $\rho = 0,75$  için  $L_k = \sum_{I=1}^5 L(I)/5$  şeklinde) belirlenmekte ve karşılaştırmalar bu değerlere göre yapılmaktadır. Grafikteki her bir veri noktası ilgili sensör dağılımı için  $L_k/L_1$  oranını ifade etmektedir. Son olarak belirtmek gerekir ki; planlama ufku arttıkça, seyrek topolojiler için az sayıda sensörle istenen kapsama seviyesini sağlamak daha zor hale gelmektedir. Örneğin;  $|N_0| = 0,25N^{max}$  iken  $T^{max} = 3$  ve  $T^{max} = 4$  durumlarında sırasıyla 5 ve 9 örneklem olursuzdur.  $T^{max}$  daha da büyüdüğünde;  $|N_0| = 0,5N^{max}$  ve  $T^{max} = 5$  iken yalnızca bir örnek için olurlu çözüm mevcuttur. Dolayısıyla, bu örnekler ortalamaya dahil edilmemiştir.



Şekil 3.4: Ortalama ağ ömründeki değişim.

En uzun ortalama yaşam süresi, planlama ufku iki periyot olduğunda ortaya çıkmaktadır. Saçılan sensör oranı büyüdükçe, bir periyotlu duruma kıyasla görece iyileşme miktarı azalış gösterse de tek bir topoloji değişikliğine bile izin vermenin ortalama katkısı iki kat olmaktadır. Özetlemek gerekirse; istenen kapsama seviyesi, konuşlandırılan sensör sayısı ve hedef alanın büyüklüğü ile orantılı olarak ulaşılabilir seviyede olduğu sürece, ağ ömrü; *MSumE*'de çok periyotlu planlama ile geleneksel *ilk sensör ölünceye kadar geçen süre* metriğine kıyasla önemli ölçüde artırılabilir. Bu nedenle, çalışmanın geri kalanında  $T^{max} = 2$  kullanılmasının makul olacağı değerlendirilmiştir.

### 3.2.4 Ağ ömrü analizi

Bu bölümde;

- Çok periyotluluğun ağ ömrüne katkısını, yani ağ ömrünün  $T^{max}$  ile nasıl değiştiğini;
- *MMaxE* ve *MSumE* çözümlerinin kalitesini;
- *MMaxE* ve *MSumE* çözümlerinin kapsama eğilimleri açısından nasıl farklılık gösterdiklerini ve
- *MMaxE* ve *MSumE*'nin gerekli kapsama seviyesine ( $\alpha$ ) duyarlılığını

araştırmak için *DÇPaKM*, *MMaxE* ve *MSumE* için test sonuçları sunulmaktadır. Bu amaçla, test ortamında  $n \in \{4,6,8,10\}$  ve  $\rho \in \{0,25; 0,5; 0,75\}$  ile rastgele örnekler oluşturulmuştur.

#### 3.2.4.1 *DÇPaKM* ve *MMaxE* karşılaştırması

Ağ ömrünün çok periyotluluk ile uzatılıp uzatılamayacağını ve yaklaşım modellerinin ne kadar iyi performans gösterdiklerini incelemek için *DÇPaKM* sonuçları dikkate alınmaktadır. Her durumda *MSumE*'den daha uzun bir kullanım ömrü sağladığından burada yalnızca *MMaxE*'ye ait sonuçlar sunulmaktadır. Ayrıca, *DÇPaKM*; sadece  $T^{max} = 1$  iken,  $\rho = 0,25$  olan  $4 \times 4$  ve  $6 \times 6$  ağlar için optimal olarak çözülebilmektedir.  $T^{max} = 2$  için ise sadece  $4 \times 4$  ağlarda alt sınır sağlayabilmektedir. Dolayısıyla; buradaki tüm değerlendirmeler, bu örnek kümesi için iki modelin sonuçlarına dayanmaktadır.

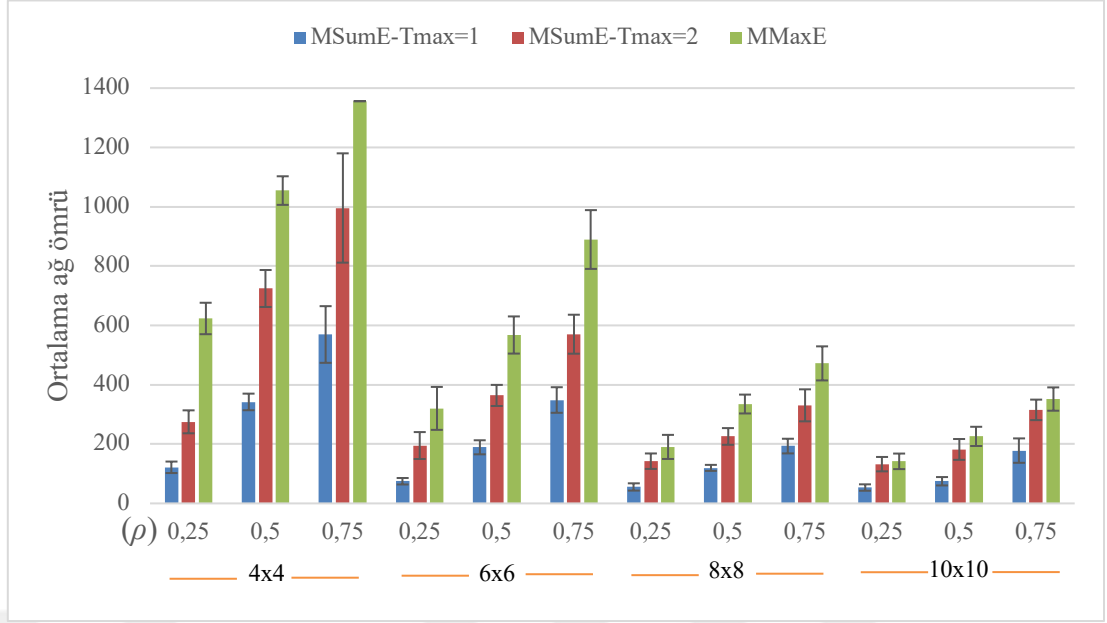
İlk olarak;  $T^{max} = 1$  iken,  $MMaxE$  ve  $DÇPαKM$  sonuçları aynıdır. Yani; maksimum birim zaman enerji tüketimini enküçükleme, değişen topolojiye uyarlanma beklenmediğinde ilk sensör ölene kadar geçen süreyi enbüyüklemeye eşdeğerdir. Öte yandan,  $T^{max} = 2$  iken;  $DÇPαKM$  ile optimal çözüm yalnızca  $4x4$  ve  $\rho = 0,25$  örneklem kümesindeki tek bir örnekte elde edilebilmiştir. Bu tek örnekte, ağ ömrü %9,3 artırılabilmiştir. Kalan örnekler için de her zaman bir iyileşme mevcuttur; 3 saatlik zaman sınırı içinde bulunan en iyi çözümlere dayalı iyileşme %5,4'dir. Dolayısıyla, nispeten küçük bir ağ için bile çok periyotluluğun katkısı belirgindir.  $DÇPαKM$ 'nin uzun çözüm süreleri, hem  $MMaxE$  hem de  $MSumE$  çok daha hızlı çözülebildiğinden, yaklaşıklık modellerine olan ihtiyacı açıkça göstermektedir. Bununla birlikte,  $MMaxE$  için çok dönemliliğin getirdiği kazanç, ortalama %4'lük bir artışla yalnızca iki örnekte gözlemlenmiştir. Diğer tüm durumlarda  $MMaxE$ ,  $T^{max} = 1$  durumu ile aynı sonuçları vermiştir. Sonuç olarak,  $MMaxE$  genel ağ ömrü için iyi alt sınırlar sağlamaktadır, ancak  $MSumE$  çok önemli optimizasyon sayesinde elde edilen kazancı çok daha açık bir şekilde yansıtabilmektedir.

#### 3.2.4.2 $MMaxE$ ve $MSumE$ karşılaştırması

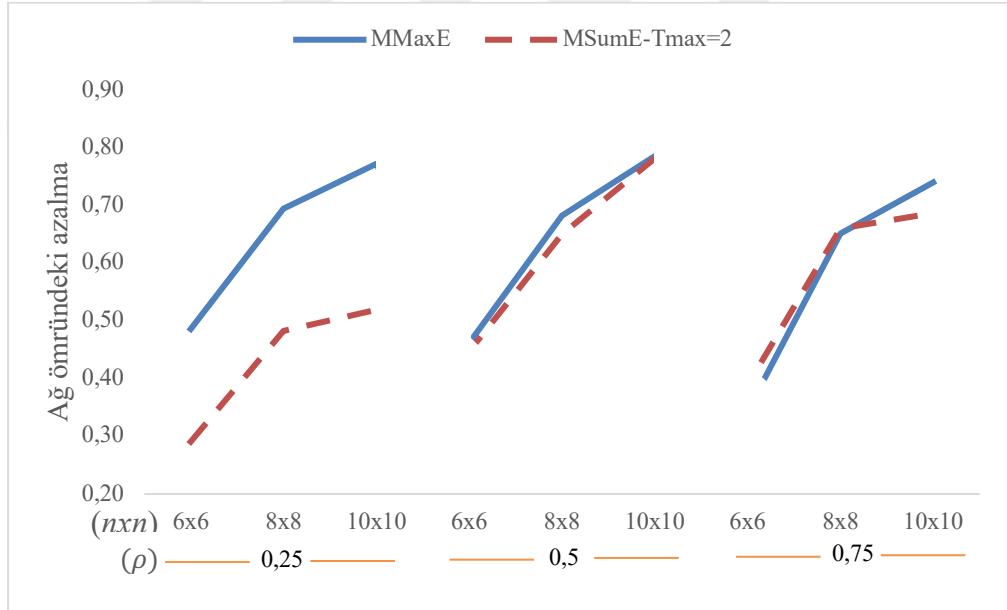
Bu bölümde,  $MMaxE$  ve  $MSumE$  modelleri öncelikle ağ ömrü açısından karşılaştırılmaktadır.  $DÇPαKM$ 'nin aksine  $MMaxE$  ve  $MSumE$  ile  $T^{max} = 1$  ve  $T^{max} = 2$  için tüm örnekler optimal olarak çözülebilmektedir. Şekil 3.5'te, her bir test düzeneği için %95 güven aralığı ile birlikte ortalama ağ ömrü değerleri gösterilmektedir.

$MMaxE$  ile,  $T^{max} = 1$  ve  $T^{max} = 2$  için 100 örnekten yalnızca ikisinde ömür değerleri farklı olduğundan  $MMaxE$  için tek bir veri serisi bulunmaktadır. Ağ boyutu arttıkça veya sensör oranı azaldıkça ortalama ömrün azaldığı grafikten görülmektedir.  $MMaxE$ , tüm örneklerde en yüksek yaşam süresi değerlerini verirken, performansı çoğunlukta  $MSumE$ 'den daha değişkendir. Öte yandan, çok periyotluluk  $MSumE$  modeli ile neredeyse iki kat daha uzun bir ömür sağlamaktadır.

Şekil 3.6'da,  $4x4$  ağda tüm sensör yerleşim oranlarında ortalama yaşam süresindeki azalma oranları gösterilmektedir.  $MMaxE$  ağ ömrü, özellikle seyrek ağlarda daha hızlı azalırken;  $MSumE$ , aynı sensör yerleşim oranı için daha büyük ağlarda daha iyi ölçeklenmektedir.



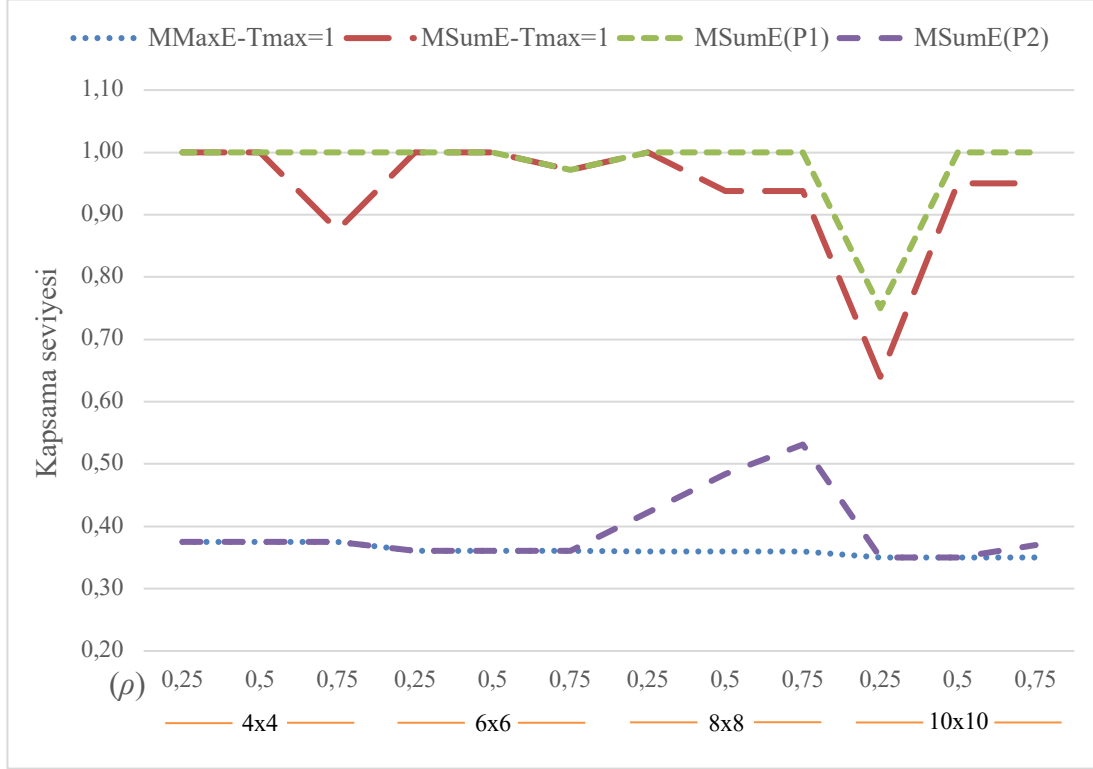
Şekil 3.5: MSumE ve MMaxE için ortalama ağ ömrü değerleri.



Şekil 3.6: Ağ ömründeki ortalama azalma oranları.

Minimum kapsama eşik değeri  $\alpha = 0,35$  olacak şekilde *MMaxE* ve *MSumE* ile sağlanan kapsama seviyeleri Şekil 3.7’de sunulmaktadır. *MMaxE* ile kapsama seviyesi sensör yerleşim oranından bağımsız olarak tüm ağ boyutlarında hemen hemen aynı olup eşik değerin hemen üzerindedir. Genel ortalaması %36’dır. *MSumE* için ise

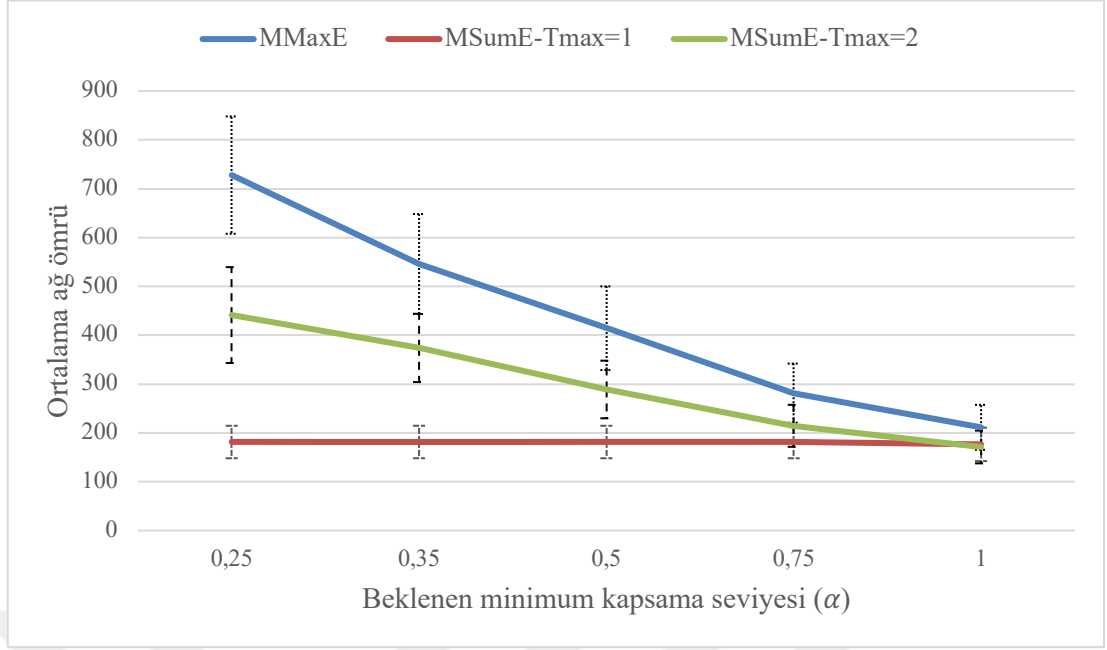
durum daha farklıdır. Örneğin  $T^{max} = 1$  iken ortalama kapsama seviyesi %94'tür. Ayrıca,  $T^{max} = 2$  olduğunda  $MSumE(P1)$  ve  $MSumE(P2)$  olarak gösterilen her periyot için ortalama kapsama yüzdeleri sırasıyla %98 ve %39'dur.



Şekil 3.7:  $MMaxE$  &  $MSumE$  için ortalama kapsama seviyeleri.

Ayrıca, ağ ömrünün asgari kapsama oranı eşik değerine ( $\alpha$ ) duyarlılığı  $MMaxE$  ve  $MSumE$ 'de  $T^{max} \in \{1,2\}$  için analiz edilmiştir. Şekil 3.8'de  $\rho = 0,5$ ,  $n \in \{4,6,8,10\}$  ve  $\alpha \in \{0,25; 0,35; 0,5; 0,75; 1\}$  olacak şekilde tüm deney kümeleri için ortalama değerlerin yanı sıra %95 güven aralıkları da gösterilmektedir.  $MSumE$ 'nin tüm durumlarda  $\alpha$  değerine kayıtsızlık gösterip neredeyse tam kapsama sağladığı ve bu durumun da Şekil 3.7 ile tutarlı olduğu görülmektedir. Öte yandan,  $MmaxE$  sonuçları  $\alpha$ 'ya duyarlıdır ve  $\alpha = \%25$  ile ortalama ağ ömrü tam kapsama durumuna kıyasla 3,4 kat daha yüksektir. Benzer şekilde;  $MSumE$ ,  $T^{max} = 2$  için de ağ ömrü  $\alpha$ 'nın değişmesinden etkilenmektedir ve bahsi geçen oran bu durumda 2,58'dir. Son olarak; her iki model için de  $\alpha$  arttıkça, güven aralıklarının daraldığı görülmektedir.





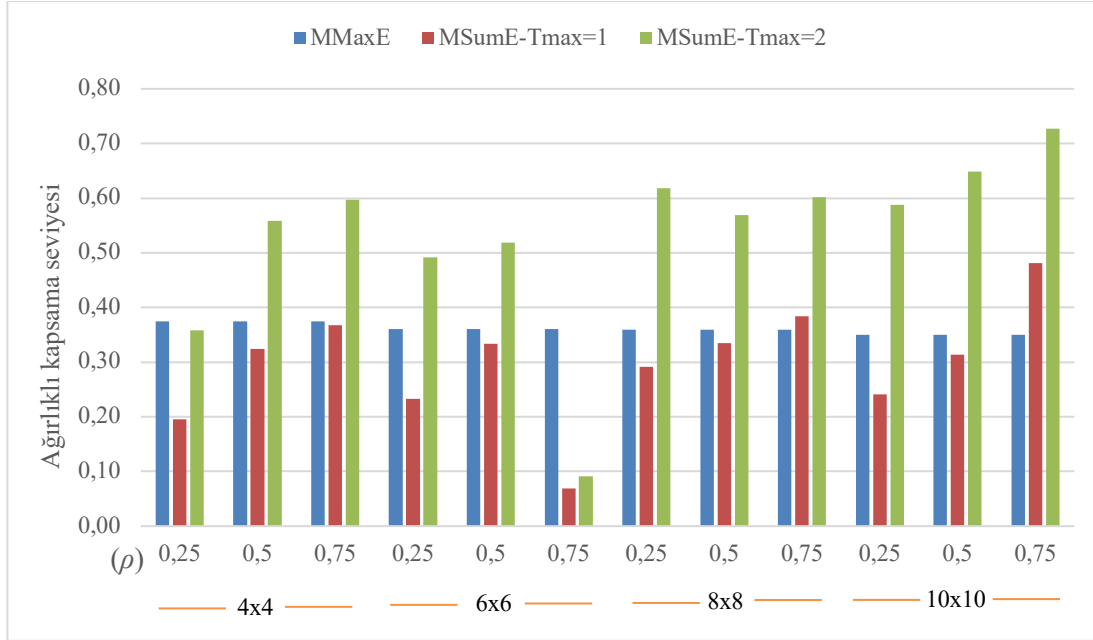
Şekil 3.8: Beklenen kapsama seviyesine göre ağ ömründeki değişim.

Yukarıda gösterilen sonuçlar  $MMaxE$  ve  $MSumE$  sonuçlarının ağ ömrü ve kapsanan alan bakımlarından farklılaştıklarını göstermektedir. Bu iki modelin ortak bir metriğe göre karşılaştırılabilmesi amacıyla *zaman ağırlıklı kapsama seviyeleri* incelenmiştir. Her modelin kapsama oranı ve normalize edilmiş ağ ömrünün çarpımı olan zaman ağırlıklı kapsama seviyeleri Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Burada  $\bar{c}^{n,\rho}(m)$ ;  $m$  modeli için  $n \times n$  ağ ve  $\rho$  sensör yerleşim oranı ile elde edilen ortalama kapsama seviyesini ve  $\bar{T}^{n,\rho}(m)$  ise; karşılık gelen ortalama ağ ömrünü göstermektedir. Dolayısıyla;  $\forall n \in \{4,6,8,10\}$ ,  $\rho \in \{0,25; 0,5; 0,75\}$  ve  $m \in \{MMaxE, MSumE(T^{max} = 1), MSumE(T^{max} = 2)\}$  için normalleştirilmiş zaman ağırlıklı kapsama oranı:

$$w^{n,\rho}(m) = \bar{c}^{n,\rho}(m) \times \frac{\bar{T}^{n,\rho}(m)}{\bar{T}^{n,\rho}(MMaxE)}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Böylece; kapsama seviyesi ve ağ ömrüne dayalı birleşik bir ölçüt kullanılarak, üç modelin sonuçları karşılaştırılabilecektir. Herhangi bir model ile ideal durum; bir örnek için tam kapsama sağlanırkenki ağ ömrünün,  $MmaxE$  ile elde edilen ömre eşit olmasıdır. Sonuç olarak  $w^{n,\rho}(m)$  en fazla bir değerini alabilmektedir. Daha kısa bir süre için daha geniş bir bölgeyi algılamak, daha küçük bir bölgeyi daha uzun bir süre algılamaya benzer şekilde değerlendirildiğinde;

$M\text{Sum}E$ ,  $T^{\text{max}} = 2$  'nin, tüm örneklerin %83,3'ünde üstün durumda olduğu görülmektedir.



Şekil 3.9:  $M\text{Max}E$  &  $M\text{Sum}E$  ile  $T^{\text{max}} = 1$  &  $T^{\text{max}} = 2$  için zaman ağırlıklı ortalama kapsama seviyeleri

### 3.3 Sonuçlar

KAA'lar için mevcut ömür optimizasyonu çabaları çoğunlukla topoloji değişikliklerine uyarlanmayı gerektirmeyen tek periyotlu yaklaşımlara dayanmaktadır. Fakat bu durumda tüm sensörlerin birlikte çalışma süresinin uzatılması amaçlanırken, bu süre sonunda hala çalışabilir durumda olan sensörler ile ağın devamlılığının sağlanabileceği göz ardı edilmektedir. Uygulamada ise ağ kaynaklarından azami seviyede yararlanmak için sensörlerde artı kalan enerjilerin de mümkün olduğunca kullanılmaya çalışılması daha anlamlıdır. Çalışmanın ana motivasyonu bu düşünceden yola çıkarak, bazı sensörler pillerini tükettiğinde iletim yollarının topoloji değişikliklerine yeniden uyarlandığı bir kurgunun eniyileme yöntemleri ile ele alınmasıdır. KAA'ların gelişmiş iletişim yetenekleri sunduğuna dair ortak görüşten esinlenerek, KAA tasarım problemini bir SG uygulaması olarak incelemek tercih edilmiştir. Bununla birlikte; geliştirilen tasarım kurulumu ve

modeller, herhangi bir alanda KAA verimliliğini eniyilemek için uygulanabilir niteliktedir.

Tezin bu bölümünde yapılan çalışma ile literatüre yapılan başlıca özgün katkılar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çok periyotlu bir optimizasyon çerçevesinde; ağ topolojisindeki bir değişiklikten sonra ağın yeniden düzenlenmesine izin verilen, kapsama ve bağlantı gereksinimlerinin dikkate alındığı çok periyotlu bir tasarım yaklaşımı sunulmuştur.
- Özgün bir 0–1 MIP modeli ve iki yaklaşıklık modeli geliştirilmiştir. Ağ özelliklerinin ağ ömrünü nasıl etkilediğine dair kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Buna göre;
- Göreceli olarak küçük ağlar için dahi ağ ömrünün çok periyotlu optimizasyon ile uzatılabildiği,
- Tek periyotlu durum için ağ ömrünü enbüyüklemek ile en fazla enerji tüketen sensörün enerji tüketimini enküçüklemenin eşdeğer olduğu gözlemlenmiştir. Bu çıkarım çok periyotlu bir planlama ufku söz konusu olduğunda geçerli değildir,
- Ampirik olarak; iki periyotlu bir planlama ufkunun, yani topoloji değişikliği nedeniyle bir kez yeniden yapılanmanın, her periyottaki maksimum enerji tüketimlerin toplamından ziyade tüm periyotlardaki toplam enerji tüketimi minimize edildiğinde en etkili seçim olduğu gösterilmiştir. Ağ ömründe neredeyse iki kat artış gözlemlenmiştir,
- İki yaklaşıklık modeli kapsama düzeyi ve ağ ömrüne dayalı olarak karşılaştırılmıştır. KAA davranışının iki ayrı durumda önemli ölçüde farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Maksimum tüketimi enküçüklemek, daha uzun bir ağ ömrü değeri ve dolayısıyla kapsama seviyesini en düşük seviyede tutarak orijinal model için daha iyi bir alt sınır sağlamaktadır. Öte yandan, toplam enerji tüketimini enküçüklemek, neredeyse tam kapsama sağlamakta ve büyüyen ağ boyutuyla daha iyi ölçeklenmektedir.

Sonuç olarak, tez çalışmasının bu kısmında yapılan çalışmalar ile varsayılan kapsama ve bağlantı gereksinimleri altında ağ ömrüne ilişkin teorik st sınırlar ve ilgili literatüre tam bir referans sağlanmaktadır.



#### **4. IoT TABANLI KAA UYGULAMALARINDA GECİKMEME DUYARLI BAĞLANTILILIK ve $\alpha$ -KAPSAMA İÇİN AĞ ÖMRÜ ENBÜYÜKLEMESİ**

Bu bölümde tez kapsamında ele alınmış ikinci problem olan; IoT tabanlı KAA uygulamalarında gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve  $\alpha$ -kapsama için ağ ömrü enbüyüklemesi, kapsamında gerçekleştirilmiş olan çalışmalar sunulmaktadır.

##### **4.1 Problem Formülasyonu ve Motivasyon**

Bu bölümde gecikmeye duyarlı, bağlantılılık ve  $\alpha$  kapsama temelli ağ ömrü enbüyüklemesi modeli ele alınmaktadır. Kurgulanan yapı herhangi bir KAA uygulama alanında kullanılabilir kadar genel olmakla birlikte özellikle gecikmeye dayalı hizmet kalitesi gereksinimlerine duyulan ihtiyaçtan dolayı IoT uygulamaları üzerine yoğunlaşmıştır. Bölümün geri kalanında öncelikle ağ yapısı açıklanmakta sonrasında geliştirilen özgün 0-1 MIP modelleri sunulmaktadır.

##### **4.1.1 Ağ yapısı**

Şebeke modeli Bölüm 3.1.1'de verilmiş olan ve Şekil 3.1.d'de gösterilen yapıyla özdeşdir. Amaç; gecikmeye duyarlı, gerekli/istenen kapsama seviyesini sağlayan ve hedef bölgeyi mümkün olduğu kadar uzun süre izleyebilen, enerji açısından verimli bir IoT tabanlı KAA uygulaması tasarlamaktır.

##### **4.1.2 Matematiksel programlama modeli**

Bu bölümde sunulacak 0-1 MIP modelinde Bölüm 3.1.2.1 ve Bölüm 3.1.2.2'de anlatılıp Çizelge 3.1'de özetlenen tanımlar geçerlidir. Ayrıca iletim enerjisi için de yine Çizelge 3.2'de gösterilen enerji modeli kullanılmaktadır. Bununla beraber, Bölüm 3'ten farklı olarak bu kısımda tek periyotlu bir tasarım ele alınmaktadır. Bu aşamada; enerji verimli iletim yollarının, sensörlerin verilerinin iletimine dair gecikme dikkate alınarak, FSD ile tanımlanan ağ ömrü enbüyüklenmesi istendiğinden, karar değişkenlerinde ve modelde önemli farklılıklar yapılmıştır. Bu bölümde öncelikle Bölüm 4'e özel ek değişken tanımları yapılacak ve geliştirilen 0-1 MIP modeli sunulacaktır.

#### 4.1.2.1 Karar değişkenleri

Problemin ana kararları, hücrelerin sensörlere nasıl atanacağı ve verilerin sensörlerden BS'ye çok atlamalı olarak tekli yollar (İng. single path) üzerinden nasıl yönlendirileceğidir. Bu amaçla ikili atama karar değişkeni  $x_{ci}$ ;  $c \in C$  hücresi,  $i \in S_c$  sensörü tarafından algılanıyorsa 1; değilse 0 değerini almaktadır. Yine ikili karar değişkeni  $f_{ij}^k$ ;  $k \in N_0$  sensörü tarafından algılanan veri  $(i, j) \in A$  üzerinde iletiliyorsa 1; değilse 0 değerini almaktadır. Dolayısıyla bu bölümde her sensörün verisinin bölünmeden tek bir yol üzerinden BS'ye iletilmesi istenmektedir. Bu koşulun nedeni, kaynaktan BS'ye olan gecikmenin kullanılan yol üzerindeki atlama sayısı ile ölçülüyor olmasıdır. Bunun için tanımlanan  $r_{kj}$  ikili değişkeni;  $k \in N_0$  kaynaklı veri,  $j \in N$  sensörüne uğruyorsa 1; değilse 0 değerini almaktadır. Yani;  $k \in N_0$  kaynaklı verinin gecikmesi,  $d_k = \sum_{j \in N} r_{kj}$  şeklinde tanımlanırken  $d_{max}$ ; ortaya çıkan maksimum gecikmeyi ifade etmektedir. Birinci bölümden farklılaşan notasyonlar ve tanımları Çizelge 4.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1: Kullanılan ek notasyonlar ve tanımları.

<b>Karar değişkenleri:</b>	
$f_{ij}^k$	1 eğer $k \in N_0$ tarafından algılanıp $(i, j) \in A$ üzerinde iletiliyorsa
$r_{kj}$	1 eğer $k \in N_0$ tarafından algılanan veri $j \in N$ 'e uğruyorsa
$d_k$	$k \in N_0$ kaynaklı verinin gecikmesi
$d_{max}$	$\max_{k \in N_0} \{d_k\}$ maksimum gecikme

#### 4.1.3 Gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve $\alpha$ -kapsama temelli ağ ömrü enbüyüklemesi modeli ( $D\alpha TM$ )

Gecikmeye duyarlı, bağlantılılık ve  $\alpha$ -kapsama gereksinimleri altında ağ ömrünü enbüyüklemeyi amaçlayan ilk model ( $D\alpha TM$ ) aşağıdaki gibidir:

$$\text{Max } T$$

öyle ki:

$$\sum_{i \in S_c} x_{ci} \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (4.1)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}^k = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i = k \\ 0 & \text{eğer } i \in N_0 \setminus \{k\} \end{cases} \quad \forall i, k \in N_0 \quad (4.2)$$

$$\sum_{(j,BS) \in A} f_{jBS}^k = 1 \quad \forall k \in N_0 \quad (4.3)$$

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{c \in C_k} T x_{ck} b_c \left[ \sum_{(j,i) \in A} PRX f_{ji}^k + \sum_{(i,j) \in A} E_{ij} f_{ij}^k \right] + \Psi T \sum_{c \in C_i} x_{ci} b_c \leq \epsilon_i \quad \forall i \in N_0 \quad (4.4)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in S_c} x_{ci} \geq \lceil 0,01 \alpha |C| \rceil \quad (4.5)$$

$$f_{ij}^k \leq r_{kj} \quad \forall k \in N_0, (i,j) \in A \quad (4.6)$$

$$d_k = \sum_{j \in N} r_{kj} \quad \forall k \in N_0 \quad (4.7)$$

$$d_{max} \geq d_k \quad \forall k \in N_0 \quad (4.8)$$

$$\sum_{(k,j) \in A} f_{kj}^k \leq \sum_{c \in C_k} x_{ck} \quad \forall k \in N_0 \quad (4.9)$$

$$\sum_{h \in CN_c} \sum_{i \in S_c} x_{hi} \geq \lceil 0,01 \lambda |CN_c| \rceil \quad \forall c \in C \quad (4.10)$$

$$f_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, k \in N_0 \quad (4.11)$$

$$x_{ci} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in S_c \quad (4.12)$$

$$r_{kj} \in \{0,1\} \quad \forall k \in N_0, j \in N \quad (4.13)$$

$$d_k \geq 0 \quad \forall k \in N_0 \quad (4.14)$$

$$T \geq 0 \quad (4.15)$$

$D\alpha TM$ 'de amaçlanan, önceden belirlenmiş hizmet kalitesi standartlarına göre ağ ömrünü enbüyüklemektir. Her hücrenin en fazla bir sensöre atanması (4.1) ile, akış dengesi (4.2) ve (4.3) ile, hiçbir sensörün sahip olduğundan fazla enerji harcamaması (4.4) ile sağlanmaktadır. Ağdaki hücrelerin en az  $\% \alpha$ 'sının kapsanmasının gerektiği  $\alpha$ -kapsama kuralı (4.5) ile belirtilmektedir. Her  $k \in N_0$  kaynağı için BS'ye veri iletilirken kullanılan ayrıtlara göre yoldaki röle görevi gören sensör sayısı arasındaki ilişki (4.6)'da tanımlanmaktadır. Sonuç olarak her kaynağa ait toplam gecikme (4.7) ile hesaplanırken, (4.8) ağdaki azami gecikmeyi gösterir. (4.9) her kaynaktan en fazla kendisine atanan hücre sayısı kadar yol çıkabileceğini belirtmektedir. Her hücrenin komşuluğu için  $\% \lambda$  minimum kapsama gereksinimi (4.10) ile garanti edilmektedir. Son olarak, (4.11)–(4.15) karar değişkenleri için işaret kısıtlarıdır.

$D\alpha TM$  modelinde gecikme eniyilemesi doğrudan yapılmamakla beraber her hangi bir kaynak için olabilecek azami gecikme limitini ifade eden  $d_{max}$  parametresinin değeri

$$\{ \min d_{max} : (4.2), (4.3), (4.6)-(4.8), (4.11), (4.13), (4.14) \}$$

çözülerek belirlenmektedir. Bu sayede, sensörlerin sınırsız enerjiye sahip oldukları durumda akışlarını en az atlamalı tekli yollar üzerinden iletecekleri durum için azami gecikme değeri belirlenmektedir. Daha sonra bu değer ana modellerde kullanıldığında:

azami gecikme değerini ideal duruma göre kötüleştirmeden, ağ ömrünü en iyileyen sonuçlar bulunmaktadır.

Enerji kısıtları (4.4)'te yer alan  $Tx_{ck}$  çarpımından dolayı  $D\alpha TM$  doğrusal değildir. Bu aşamada denk bir doğrusal model elde etmek için iki alternatif yöntem uygulanmıştır. Bunlardan ilkinde;

$$\begin{aligned} y_{ijc}^k &= f_{ij}^k x_{ck} & \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \\ F_{ijc}^k &= y_{ijc}^k T & \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \\ g_{ck} &= x_{ck} T & \forall k \in N_0, c \in C \end{aligned}$$

şeklinde yeni değişkenler tanımlanmaktadır. Buna göre  $y_{ijc}^k$ ; eğer  $c \in C$  hücresi,  $k \in N_0$  sensörüne atandıysa ve ilgili veri  $(i, j) \in A$  ayrıtı üzerinden iletildiyse 1 değerini almaktadır. Ayrıca bu durumda da  $F_{ijc}^k = T$  diğer durumda  $F_{ijc}^k = 0$  olmaktadır. Son olarak; eğer  $c \in C$  hücresi,  $k \in N_0$  sensörüne atandıysa,  $g_{ck} = T$  diğer durumda  $g_{ck} = 0$  olmaktadır. Bu değişkenler  $D\alpha TM$ 'de gerekli şekilde yerleştirilip, aşağıdaki kısıtlar eklenerek birinci doğrusal IP modeli ( $L - D\alpha TM1$ ) elde edilmektedir. Dolayısıyla;

$$y_{ijc}^k \leq f_{ij}^k \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.16)$$

$$y_{ijc}^k \leq x_{ck} \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.17)$$

$$y_{ijc}^k \geq f_{ij}^k + x_{ck} - 1 \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.18)$$

$$y_{ijc}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.19)$$

$$F_{ijc}^k \leq T \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.20)$$

$$F_{ijc}^k \leq M y_{ijc}^k \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.21)$$

$$F_{ijc}^k \geq T - M(1 - y_{ijc}^k) \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.22)$$

$$F_{ijc}^k \geq 0 \quad \forall k \in N_0, (i, j) \in A, c \in C \quad (4.23)$$

$$g_{ci} \leq T \quad \forall i \in N_0, c \in C \quad (4.24)$$

$$g_{ci} \leq M x_{ci} \quad \forall i \in N_0, c \in C \quad (4.25)$$

$$g_{ci} \geq T - M(1 - x_{ci}) \quad \forall i \in N_0, c \in C \quad (4.26)$$

$$g_{ci} \geq 0 \quad \forall i \in N_0, c \in C \quad (4.27)$$

$D\alpha TM$ 'e eklenip (4.4);



$$\sum_{k \in N_0} \sum_{c \in C_k} b_c \left[ \sum_{(j,i) \in A} PRX F_{jic}^k + \sum_{(i,j) \in A} E_{ij} F_{ijc}^k \right] + \Psi \sum_{c \in C_i} g_{ci} b_c \leq \epsilon_i \quad \forall i \in N_0 \quad (4.28)$$

şeklinde güncellendiğinde, önerilen ilk doğrusal model olan  $L - D\alpha TM1$ ;  $\{ \max T: (4.1)-(4.3), (4.5)-(4.28) \}$  olmaktadır.

İkinci doğrusallaştırma yönteminde ise yukarıda tanımlanan  $g_{ci}$  'ye ek olarak;

$$H_{ijc}^k = g_{ck} f_{ij}^k \quad \forall k \in N_0, (i,j) \in A, c \in C$$

değişkeni tanımlanmaktadır. Buna göre; eğer  $(i,j) \in A$  ayrıtı,  $k \in N_0$  kaynağının verisinin iletilmesinde kullanılıyorsa;  $H_{ijc}^k = g_{ck}$  aksi takdirde  $H_{ijc}^k = 0$  olmaktadır. Dolayısıyla,  $H_{ijc}^k$  ve  $g_{ck}$  değişkenleri  $D\alpha TM$ 'de gerekli şekilde yerleştirilip aşağıdaki kısıtlar eklenerek ikinci doğrusal IP modeli ( $L - D\alpha TM2$ ) elde edilmektedir:

$$H_{ijc}^k \leq M f_{ij}^k \quad \forall k \in N_0, (i,j) \in A, c \in C \quad (4.29)$$

$$H_{ijc}^k \leq g_{ck} \quad \forall k \in N_0, (i,j) \in A, c \in C \quad (4.30)$$

$$H_{ijc}^k \geq g_{ck} - M(1 - f_{ij}^k) \quad \forall k \in N_0, (i,j) \in A, c \in C \quad (4.31)$$

$$H_{ijc}^k \geq 0 \quad \forall k \in N_0, (i,j) \in A, c \in C. \quad (4.32)$$

Bu durumda ise enerji kısıtı (4.4);

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{c \in C_k} b_c \left[ \sum_{(j,i) \in A} PRX H_{jic}^k + \sum_{(i,j) \in A} E_{ij} H_{ijc}^k \right] + \Psi \sum_{c \in C_i} g_{ci} b_c \leq \epsilon_i \quad \forall i \in N_0 \quad (4.33)$$

olarak güncellenmektedir. Sonuç olarak ikinci doğrusallaştırma yöntemi neticesinde elde edilen doğrusal  $L - D\alpha TM2$  modeli  $\{ \max T: (4.1)-(4.3), (4.5)-(4.25), (4.29)-(4.33) \}$  olmaktadır. Her iki modelle yapılan testler sonucunda  $L - D\alpha TM2$ 'nin önemli ölçüde daha iyi çözüm sürelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar doğrusallaştırma sonucunda modellerdeki değişken ve kısıt sayıları büyük ölçüde artsa da doğrusal olmayan modellerin aksine doğrusal modeller belli seviyede çözülebilir hale gelmişlerdir.

KAA'yı meydana getiren sensörlerin başlangıç enerjileri aynı olduğunda FSD metriğine göre ağın ömrü en çok enerji tüketen sensör tarafından belirlenmektedir. Dolayısıyla sensörlerin başlangıç enerji seviyelerinin bilindiği durumda enerji tüketimlerine bakarak FSD değerinin belirlenmesi mümkündür. Bu bakış açısıyla

önerdiğimiz ve daha ölçeklenebilir bir modele ulaşmamızı sağlayan enerji tüketimi tabanlı doğrusallaştırma işlemleri bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

#### 4.1.4 Gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve $\alpha$ -kapsama temelli maksimum enerji tüketiminin enküçüklenmesi ( $D\alpha EM$ ) modeli

Yukarıda da belirtildiği üzere doğrullaştırma işlemlerini azaltarak çözüm süresinin kısaltılması mümkündür. KAA işlevselliğini koruduğu sürece  $T > 0$  olacağını kabul etmek doğaldır (Ye ve Ordóñez, 2008). Aynı zamanda tüm sensörlerin başlangıç enerjilerinin aynı olduğu durumda en fazla enerji harcayan sensör ağ ömrünü belirleyeceğinden, maksimum enerji tüketiminin enküçüklenmesi ile ağ ömrünün enbüyüklenmesi amaçları örtüşmektedir. Bu bağlamda  $\gamma_i = i \in N_0$  sensörünün enerji tüketimi ve  $\gamma_{max} = \max\{\gamma_i\}$  için  $D\alpha EM$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\text{Min } \gamma_{max}$$

öyle ki: (4.1)-(4.3), (4.5)-(4.14)

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{c \in C_k} x_{ck} b_c \left[ \sum_{(j,i) \in A} PRX f_{ji}^k + \sum_{(i,j) \in A} E_{ij} f_{ij}^k \right] + \Psi \sum_{c \in C_i} x_{ci} b_c \leq \gamma_i \quad \forall i \in N_0 \quad (4.34)$$

$$\gamma_{max} \geq \gamma_i \quad \forall i \in N_0 \quad (4.35)$$

$$\gamma_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0 \quad (4.36)$$

Son olarak, (4.34)'ü doğrusallaştırmak için daha önce tanımlanmış olan  $y_{ijc}^k = f_{ij}^k x_{ck}$ ,  $\forall k \in N_0, (i,j) \in A, c \in C$  değişkenleri kullanıldığında;

$$\sum_{k \in N_0} \sum_{c \in C_k} b_c \left[ \sum_{(j,i) \in A} PRX y_{jic}^k + \sum_{(i,j) \in A} E_{ij} y_{ijc}^k \right] + \Psi \sum_{c \in C_i} x_{ci} b_c \leq \gamma_i \quad \forall i \in N_0 \quad (4.37)$$

elde edilir. Böylelikle  $D\alpha EM$  modeli  $\{\min \gamma^{max}: (4.1)-(4.3), (4.5)-(4.14), (4.16)-(4.19), (4.35)-(4.37)\}$  halini almaktadır. İleriki bölümde kapsamlı deneysel sonuçlar verilmektedir.

## 4.2 Deneysel Çalışmalar

Analizlerin ana motivasyonu; bir hizmet kalitesi gereksinimi olarak gecikmenin önemli olduğu uygulamalarda, ağ ömrü ile gecikme arasındaki ödünleşimin incelenmesidir. Bu bölümdeki testlerde Bölüm 3.2.1’de açıklanan veri kümeleri ve parametreler kullanılmıştır. Ancak gecikmenin hesaplanması açısından daha anlamlı olacağından BS’nin ağın ortasına konumlandırıldığı varsayılmakta ve sensörlerin BS’ye çok atlamalı tekli yollar üzerinden veri iletmelerine izin verilmektedir. Diğer yandan (4.8)’de kullanılan ve tolere edilecek azami gecikmeyi ifade eden  $d_{max}$  parametresinin değeri her örnek durum için Bölüm 4.1.3’te bahsedilen model çözülerek belirlenmektedir. Gecikme ve ağ ömrü ödünleşiminin KAA’lar için bir diğer anahtar performans göstergesi olan kapsama ile ilişkisinin incelenmesine olanak sağlayan analizler ise Bölüm 4.2.1’de sunulmaktadır.

### 4.2.1 Gecikme, ağ ömrü/enerji tüketimi ve kapsama arasındaki ödünleşim

Bu aşamada üç farklı modelden elde edilen sonuçlar kıyaslanmaktadır. Gösterim kolaylığı bakımından;

- Model 1 ( $M1$ ): Bölüm 9.1’de açıklanan maksimum gecikme ( $d_{max}$ ) kısıtı altında *maksimum enerji tüketiminin* en küçüklendiği  $DaEM$ .
- Model 2 ( $M2$ ): *ortalama gecikmenin* en küçüklendiği

$$\min \left\{ \sum_{k \in N_0} \frac{d_k}{|N|} : (4.1) - (4.3), (4.5) - (4.7), (4.9) - (4.14), (4.35) - (4.37) \right\}.$$

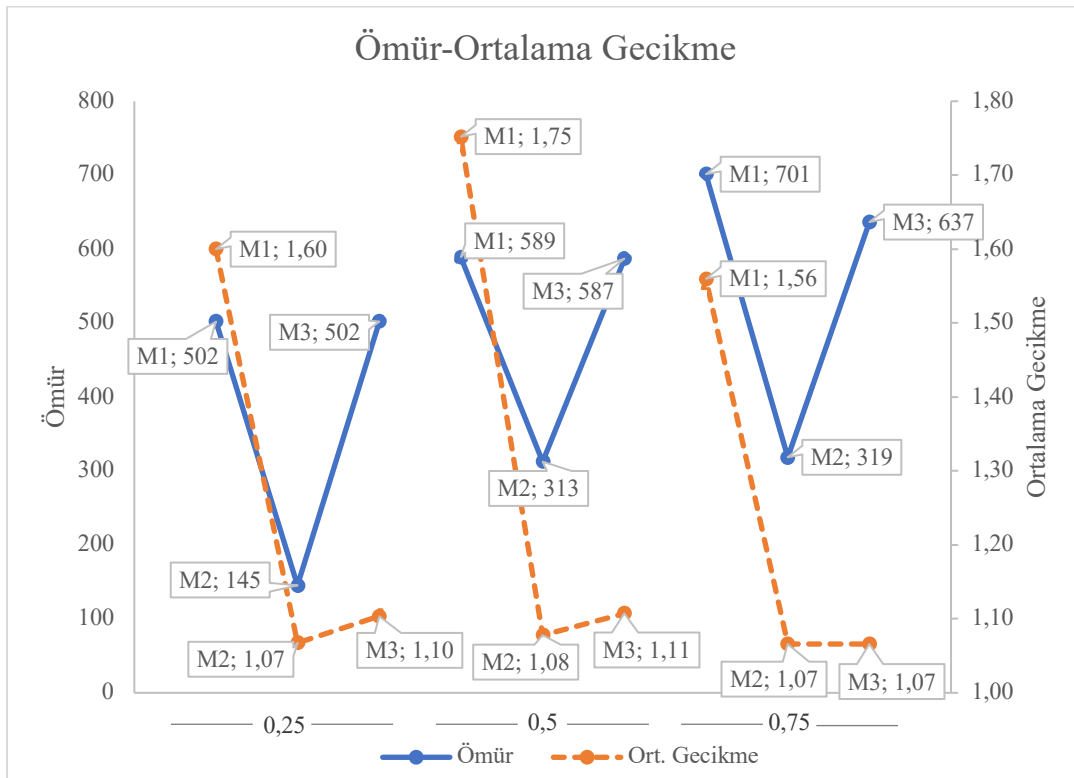
- Model 3 ( $M3$ ):  $M2$ ’ye  $M1$ ’in optimal amaç fonksiyonu değeri  $\gamma_{max}^*$  dikkate alınarak  $\gamma_{max} \leq \gamma_{max}^*$  kısıtının eklenmesiyle elde edilen *ortalama gecikmenin* enküçüklendiği

modeldir. Bu aşamada  $6 \times 6$ ’lık ağda  $\rho \in \{0,25; 0,5\}$  sensör yerleşim oranlarında 20’şer,  $\rho = 0,75$  ise sıkı bir yerleşim olduğundan 10 rastgele örnek oluşturulmuştur. Bu örnekler ile elde edilen sonuçlara dayanarak yapılan çeşitli analizler ileriki bölümlerde sunulmaktadır.

#### 4.2.1.1 Ağ ömrü – veri gecikmesi ödünleşimi

$M1$ ,  $M2$  ve  $M3$  modellerinden elde edilen ömür ve ortalama gecikme değerlerinin ortalamaları Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Tüm yerleşim stratejilerinde  $M1$  ve  $M3$ , ağ ömrü süreleri birbirlerine yakın ve  $M2$ ’ye kıyasla oldukça yüksektirler. Burada tekrar

hatırlatılması gereken  $M1$ 'de doğrudan enerji tüketimi en küçüklenirken  $M3$ 'te azami enerji tüketiminin  $M1$ 'in optimal çözümü ile sınırlandırıldığı, ortalama gecikme süresi en küçüklenmektedir. Dolayısıyla her iki modelde de doğrudan veya dolaylı olarak azami enerji tüketimi dikkate alınmaktadır. Fakat  $M2$ 'de enerji tüketimine dair herhangi bir sınır tanımlanmamaktadır. Dolayısıyla  $M2$  ağ ömrünün diğerlerine göre daha kısa olması beklentiyle uyumludur. Bu noktada, sensör yoğunluk oranı  $\rho \in \{0,5; 0,75\}$  iken,  $M1$  ve  $M3$  ile elde edilen ağ ömrü  $M2$ 'nin iki katı,  $\rho = 0,25$  için ise 3,5 katı kadar uzun olmaktadır.  $M1$ 'de amaç, *maksimum enerji tüketiminin enküçüklenmesi* yani *ağ ömrünün enbüyüklenmesidir*. Ancak bu amacı gerçekleştirmeye çalışırken aynı zamanda herhangi bir kaynaktan çıkan verinin BS'ye en fazla kaç atlama ile ulaşabileceği  $d_{max}$  değeri ile üstten sınırlandırılmaktadır.  $M1$ 'den elde edilen maksimum enerji tüketim bilgisi  $M3$ 'te bir sensörün birim zamanda harcayabileceği azami enerji miktarını üstten sınırlandırmak için kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi  $M3$ 'te amaç, tüm kaynaklar tarafından toplanan verinin BS'ye iletilmesi esnasında oluşacak olan *ortalama gecikmenin enküçüklenmesidir*. Yani;  $M1$ 'de amaç fonksiyonu vasıtasıyla,  $M3$ 'te ise kısıtlar ile enerji tüketiminin azaltılması amacı güdüldüğünden bu iki model  $M2$ 'den daha uzun ağ ömrü sağlayabilmektedir.



Şekil 4.1: Ağ ömrü – Ortalama Gecikme Ödünleşimi.

Ayrıca,  $\rho \in \{0,25; 0,5\}$  için  $M1$  ve  $M3$  ömür değerleri arasındaki fark önemsiz sayılabilecek kadar küçük iken  $\rho = 0,75$  olduğunda fark daha belirgin hale gelmekte ve enerji tüketiminin amaç fonksiyonunda eniyilendiği  $M1$  daha uzun ağ ömrü sağlayabilmektedir. Sensör sayısı bakımından daha yoğun bir yerleşim olan  $\rho = 0,75$  durumunda ortalama gecikme odaklı olan  $M3$  modelinin artan sensör sayısı karşısında enerji tüketimi odaklı olan  $M1$  kadar uzun bir ortalama ömür sağlayamaması beklenen bir durumdur. Diğer yandan sadece gecikmeye odaklanan  $M2$ , tüm yerleşimlerde en düşük ortalama gecikme değerini sunmaktadır. Bununla birlikte en yoğun sensör yerleşim stratejisinde  $M3$  de  $M2$  ile aynı ortalama gecikmeyi sağlayabilmektedir. Yani, sensör yoğunluğunun artması enerji tüketimi veya gecikme bakımlarından yapılabilecek iyileştirmelerin etkisini nispeten sınırlandırmaktadır.

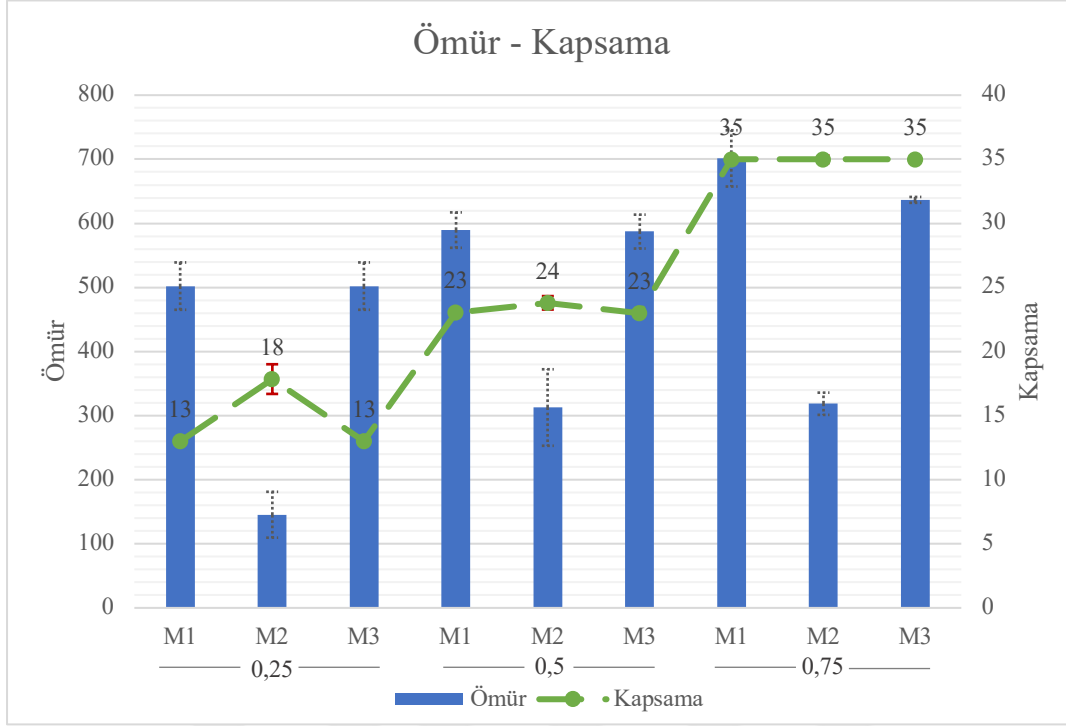
Üç model için ticari çözücü Cplex ile elde edilen çözüm süreleri  $M2$  ve  $M3$  için ortalama 30 saniye iken,  $M1$  için ortalama 75 dakikadır. Bu bağlamda  $M3$  modeli; hem ömür hem gecikme eniyileme açısından, bu gereksinimlerin yalnızca biri için en iyi olan  $M1$  ve  $M2$  modellerine çok yakın kalitede sonuçları kısa sürede sunmaktadır.

#### 4.2.1.2 Ağ ömrü – kapsama ödünleşimi

Problem tanımında belirtildiği üzere ağın işlevselliğinin devam ediyor olabilmesi için hedef bölgenin en az  $\% \alpha$  oranında kapsanıyor olması gerekmektedir. Bu bölümde üç modelin farklı sensör yoğunlukları için, ağ ömrü ve sağlanan kapsama seviyeleri karşılaştırılacaktır. İlgili ortalama sonuçlar Şekil 4.2’de özetlenmektedir.

Öncelikle; hedef alana yerleştirilen sensör sayısı arttıkça, yani  $\rho$  değeri büyüdükçe, tüm modellerin kapsama eğilimlerinin arttığı görülmektedir ki artan sensör sayısı ile daha geniş bir alanın kapsanabilir olması beklenti ile uyumludur. Öyle ki,  $\rho = 0,75$  iken neredeyse tüm modellerde tam kapsama sağlanmaktadır. Diğer yandan, birbirine yakın ömür değerleri veren  $M1$  ve  $M3$ ’ün kapsama eğilimleri de benzerdir.

Genel olarak  $M2$ , ortalama gecikmeyi birim zamandaki azami enerji tüketimini kısıtlamadan en küçüklemediği için daha geniş kapsama ve daha düşük ortalama gecikme için ağ ömründen ne kadar feragat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu ödünleşim en belirgin olarak  $\rho = 0,25$  durumunda karşımıza çıkmaktadır; kapsamada yaklaşık  $\%38$  artışın (aynı zamanda ortalama gecikmede  $\%3$ ’lük bir azalma ile birlikte) ömrü  $\%70$  azaltacağı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2: Ağ Ömrü – Kapsama Ödünleşimi.

### 4.3 Sonuçlar

Benzer kapsama seviyelerine sahip *M1* ve *M3* sonuçlarını ortalama gecikme ve ağ ömrü açısından karşılaştırdığımızda; ortalama gecikmede %33'lük bir azalma için ağ ömründe %9'luk bir düşüşün göze alınması gerektiği, ortalama gecikme değerleri bakımından benzer olan *M2* ve *M3* modelleri kıyaslandığında ise kapsama seviyesinde %21'lik bir artış için ağ ömründen %59 feragat edilmesi gerektiği görülmektedir.

Çalışmanın bu bölümünün amacı, çeşitli KAA uygulama alanlarına göre öncelikleri değişebilen temel hizmet kalitesi metriklerinden; ağ ömrü, gecikme ve kapsama arasındaki ödünleşimi incelenip, gecikmeyi göz önüne alarak mümkün olan en uzun ağ ömrünü makul çözüm sürelerinde sunabilmektir. Bu amaçla tezin bu bölümünde, yakından ilişkili olan hizmet kalitesi gereksinimleri, çok amaçlı yapılarını yansıttak ve makul çözüm sürelerine sahip olacak şekilde ele alınmıştır.

Bu bağlamda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Diğer KAA uygulama alanları içerisinde veri gecikmesinin büyük öneme sahip olduğu IoT uygulamaları için bir 0-1 MIP modeli önerilmiş,

- Bu modelin doğrusallaştırılması için iki farklı yaklaşım önerilmiş bunlardan boyutu itibariyle daha avantajlı olanın çözüm süresi açısından da daha iyi sonuçlar verdiği yapılan ön analizler neticesinde görülmüş,
- Gecikme ile maksimum harcanan enerji miktarının amaç fonksiyonu ve kısıtlarda farklı şekillerde ele alındığı 3 farklı model ile; ağ ömrü, ortalama gecikme ve kapsama arasındaki ödünleşimin yapısı ve derecesi incelenmiş,
- Ağda bulunan sensör sayısının bu anahtar performans göstergeleri üzerine etkisi incelenmiş ve sensör sayısı arttıkça ömür-gecikme-kapsama arasındaki ödünleşimin gevşetilebildiği görülmüştür.







## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında; uygulama alanlarının ihtiyaçları doğrultusunda şekillenen gereksinimlerin karşılanabilmesi adına, KAA'lar için optimal kullanım planlarının geliştirilmesi problemleri ele alınmıştır. Ele alınan ilk problem olan “KAA'lar için SG uygulamalarında topoloji güncellemesi ile birlikte kapsama ve bağlantı tabanlı ağ ömrü enbüyüklemesi” problemi kapsamında KAA'ların SG uygulamalarında kullanımlarına yönelik olarak ağın fonksiyonelliğini koruduğu süreyi, bir diğer deyişle ağ ömrünü uzatmak için sensörlerin sahip oldukları sınırlı enerjinin verimli kullanılması hedeflenmektedir. Ağın işlevselliğini istenen seviyede koruyabilmesi KAA'dan beklenen hizmet kalitesi gereksinimlerinin sağlandığı, yani bu durum için spesifik olarak hedef alanın en az  $\% \alpha$  kadarının kapsıyor ve sezilen tüm verinin BS'ye iletilebiliyor olduğu şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu koşullar sağlanabildiği sürece KAA'da enerjisi tükenen sensörler olsa bile kalan sensörler ile ağ işlevselliğini istenen seviyede koruyabildiği sürece ağ ömrünün devam ettiği varsayılmakta, bu sayede de daha gerçekçi bir ağ ömrü tanımı ile literatüre katkıda bulunmaktadır. Bu amaçla ilgili problem kapsamında; topoloji değişikliği yani bir veya birden fazla sensörün enerjisinin tükenmesi nedeniyle tamamlanan her periyodun sonunda iletim yollarının optimal şekilde uyarlanmasına olanak sağlayan özgün çok periyotlu bir 0-1 MIP modeli önerilmiştir.

İkinci problem olan “IoT tabanlı KAA uygulamalarında gecikmeye duyarlı bağlantılılık ve  $\alpha$ -kapsama için ağ ömrü enbüyüklemesi” problemi kapsamında ise gün geçtikçe gelişen teknoloji ile özellikle IoT uygulamaları çerçevesinde önemi giderek artan bir hizmet kalitesi gereksinimi olan *gecikmenin de kapsama, bağlantılılık ve ağ ömrü* ile birlikte göz önüne alındığı enerji açısından verimli bir KAA uygulaması tasarlanması hedeflenmiştir.

Bölüm 1 'de ele alınan iki problem için de genel bir Giriş yapılmış ve problemler tanıtılmıştır. Bölüm 2'de yine her iki problemi de kapsayan çalışmaların sunulduğu Literatür Taraması'na yer verilmiştir. Bölüm 3 başlı başına birinci problemi kapsamaktadır. Bölüm, problem formülasyonu ve ana problem için geliştirilmiş olan

matematiksel programlama modeli ile başlamakta ardından ağ davranışının birim zaman ayrıştırmasına dayalı olarak önerilmiş olan iki adet 0-1 MIP yaklaşıklık modeli ile devam etmektedir. Deneysel çalışmalar kısmında önerilen modellerin detaylı kıyaslaması sunulmakta, son olarak sonuçlar bölümünde de elde edilmiş olan tüm bulgular yorumlanmaktadır. Kısaca tekrar etmek gerekirse, bu çalışma sayesinde göreceli olarak küçük ağlar için dahi ağ ömrünün çok periyotlu optimizasyon ile uzatılmasının mümkün olduğu ve tek periyotlu durum için ağ ömrünü enbüyüklemek ile en fazla enerji tüketen sensörün enerji tüketimini enküçüklemenin eşdeğer olduğu başlıca elde edilen sonuçlar olmuştur. Ayrıca varsayılan kapsama ve bağlantı gereksinimleri altında ağ ömrüne ilişkin teorik üst sınırlar ve ilgili literatüre tam bir referans sağlanmaktadır.

Bölüm 4 ise ikinci probleme dair çalışmaları kapsamaktadır. İlk olarak problem için geliştirilmiş olan matematiksel model sunulmakta, sonrasında doğrusal olmayan bu modelin doğrusallaştırılması için iki farklı yöntem önerilmektedir. Çözüm süresinin kısaltılabilmesi adına, ilk problemin tek periyotlu durumu için elde etmiş olduğumuz; sensörlerin başlangıç enerjilerinin aynı olduğu durumda ağ ömrünü enbüyüklemek ile en fazla enerji tüketen sensörün enerji tüketimini enküçüklemenin eşdeğer olduğu sonucundan yola çıkarak yapılan dönüşüm neticesinde modelin boyutu küçültülmüş bu sayede de çözüm süresini kısaltmak mümkün hale gelmiştir. Deneysel çalışmalar kısmında; gecikme, ağ ömrü/enerji tüketimi ve kapsama arasındaki ödünleşimin yapısını inceleyebilmek adına bu ödünleşimi açığa çıkarabileceği öngörülen üç farklı model sunulmuş ve bunların sonuçları incelenmiştir. Genel itibariyle ortalama gecikmede %33'lük bir azalma için ağ ömründe %9'luk bir düşüşün göze alınması gerektiği, kapsama seviyesinde %21'lik bir artış için ise ağ ömründen %59 feragat edilmesi gerektiği görülmüştür.

Tez kapsamında ele alınmış olan iki problem ile de literatüre özgün bir katkıda bulunulmuştur. Bu katkının artırılabilmesi adına problemlerin takviyeli öğrenme kapsamında ele alınmasının anlamlı bir katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Armstrong, D.B., Fogarty, G.J., & Dingsdag, D.** (2007). Scales measuring characteristics of small business information systems. *Proceedings of Research, relevance and rigour: coming of age: 18th Australasian Conference on Information Systems*. Toowoomba, Australia: University of Southern Queensland.
- Abrahart, R. J. & See, L.** (2000). Comparing neural network and autoregressive moving average techniques for the provision of continuous river flow forecasts in two contrasting catchments. *Hydrological Processes*, 14 (2), 2157–2172.
- Alarif, A., Tolba, A.** (2019). Optimizing the network energy of cloud assisted internet of things by using the adaptive neural learning approach in wireless sensor networks. *Computers in Industry*, 106, 133-141.
- Althoubi, A., Alshahrani, R., Peyravi, H.** (2021). Delay Analysis in IoT Sensor Networks, *Sensors*, 21.
- Altin-Kayhan, A., Sendil, M.** (2016). Optimal Path Selection under Different Data Redundancy Policies for More Secure Wireless Sensor Networks. *INFOR*, 54(2), 121-146.
- Altinel, I.K., Aras, N., Guney, E., Ersoy, C.** (2008). Binary Integer Programming Formulation and Heuristics for Differentiated Coverage in Heterogeneous Sensor Networks. *Computer Networks*, 52(12), 2419-2431.
- Amutha, J., Sharma, S., Nagar, J.** (2020). WSN strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency: Review, approaches and open issues. *Wireless Personal Communications*, 111(2), 1089-1115.
- Ayadi, F., Colak, I., Garip, I., Bulbul, H.I.** (2020). Impacts of Renewable Energy Resources in Smart Grid. *8th International Conference on Smart Grid*, 183-188.
- Boubrima, A., Bechkit, W., Rivano, H.** (2017). Optimal WSN deployment models for air pollution monitoring. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(5), 2723-2735.
- Calvete, H.I., del-Pozo, L., Iranzo, J.A.** (2018). Dealing with residual energy when transmitting data in energy-constrained capacitated networks. *European Journal*, 269, 602-620.
- Cardei, M., Thai, M.T., Li, Y., Wu, W.** (2005). Energy -Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks. *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol.3.

- Cardei, M., Wu, J.** (2006). Energy-efficient coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. *Computer communications*, 29(4), 413-420.
- Cerulli, R., D'Ambrosio, C., Iossa, A., Palmieri, F.,** (2022). Maximum Network Lifetime Problem with Time Slots and coverage constraints: heuristic approaches. *The Journal of Supercomputing*, 78, 1330-1355.
- Chakrabarty, K., Iyengar, S.S., Qi, H., Cho, E.** (2002). Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. *IEEE transactions on computers*, 51(12), 1448-1453.
- Chang, J. H., Tassiulas, L.** (1999). Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings of the Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing*, Vol.37, pp. 1191-1200.
- Charr J.C., Deschinkel, K., Mansour, R.H., Hakem, M.** (2020). Lifetime optimization for partial coverage in heterogenous sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 107.
- Chen, Z., Shen, H.** (2018). A grid-based reliable multi-hop routing protocol for energy-efficient wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(3).
- Chouhan, N., Jain, S.C.** (2020). Tunicate swarm Grey Wolf optimization for multi-path routing protocol in IoT assisted WSN networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*.
- Cotuk, H., Bicakci, K., Tavli, B., Uzun E.** (2014). The Impact of Transmission Power Control Strategies on Lifetime of Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Computers*, 63(11), 2866-2879.
- Curry, R.M., Smith, J.C.** (2016). A survey of optimization algorithms for wireless sensor network lifetime maximization. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 145-166.
- Dhillon, S.S., Chakrabarty K., Iyengar, S.S.** (2002). Sensor placement for grid coverage under imprecise detections. *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion 2*, 1581-1587.
- Dhillon, S.S., Chakrabarty, K.** (2003). Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks. *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking 3*, 2003, pp. 1609-1614
- Dhumane, A.V., Prasad, R.S.** (2018) Fractional Gravitational Grey Wolf Optimization to Multi-Path Data Transmission in IoT. *Wireless Pers Commun*, 102, 411-436.
- Dietrich, I., Dressler, F.** (2009). On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 5(1), 1–39.
- Durairaj, U.M., Selvaraj, S.** (2020). Two-level clustering and routing algorithms to prolong the lifetime of wind farm-based WSN. *IEEE Sensors Journal*, 21(1), 857-867.
- Ekmen, M., Altin-Kayhan, A.** (2017). Reliable and Energy Efficient Wireless Sensor Network Design Via Conditional Multi-Copying for Multiple Central Nodes. *Computer Networks*, 126, 57-68.

- Fadel, E., Gungor, V.C., Nassef, L., Akkari, N., Malik, M.G.A., Almasri, S., Akyildiz, I.F.** (2015). A Survey on Wireless Sensor Networks for Smart Grid. *Computer Communications*, 71, 22-33.
- Faheem, M., Gungor, V.C.** (2018). MGRP: Mobile sinks-based QoS-aware data gathering protocol for wireless sensor networks-based smart grid applications in the context of industry 4.0-based on internet of things. *Future Generation Computer Systems*, 82, 358-374.
- Fei, Z., Li, B., Yang, S., Xing, C., Chen, H., Hanzo, L.** (2017). A survey of multi-objective optimization in wireless sensor networks: Metrics, algorithms, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 550-586.
- Ferrari, P., Flammini, A., Sisinni, E., Rinaldi, S., Brandao, D., Rocha, M.S.** (2018). Delay Estimation of Industrial IoT Applications Based on Messaging Protocols. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 67(9), 2188-2199.
- Gao, J., Xiao, Y., Liu, J., Chen, C.L.P.** (2012). A survey of Communication/Networking in Smart Grids. *Future Generation Computer Systems*, 28(2), 391-404.
- Gentili, M., Raiconi, A.** (2013).  $\alpha$ -Coverage to extend network lifetime on wireless sensor networks. *Optimization Letters*, 7, 157-172.
- Guleria, K., verma, A.K.** (2019). Comprehensive review for energy efficient hierarchical routing protocols on wireless sensor networks, *Wireless Networks*, 25, 1159-1183.
- Guney, E., Arasa, N., Altinel, I.K., Ersoy, C.** (2010). Efficient Integer Programming Formulations for Optimum Sink Location and Routing In Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *Computer Networks*, 54, 1805-1822.
- Gungor, V.C., Lu, B., Hancke, G.P.** (2010). Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(10), 3557-3564.
- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G. P.** (2011). Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE transactions on Industrial informatics*, 7(4), 529-539.
- Huan, X., Kim, K.S.** (2019). On the practical implementation of propagation delay and clock skew compensated high-precision time synchronization schemes with resource-constrained sensor nodes in multi-hop wireless sensor networks. *Computer Networks*, 166.
- Jaiswal, K., Anand, V.** (2021). A Grey-Wolf based Optimized Clustering approach to improve QoS in wireless sensor networks for IoT applications. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14, 1943-1962.
- Jeske, M., Rosset, V., Nascimento, M.C.V.** (2020). Determining the trade-offs between data delivery and energy consumption in large-scale WSNs by multi-objective evolutionary optimization. *Computer Networks*, 179.

- Kabakulak, B.** (2019). Sensor and sink placement, scheduling and routing algorithms for connected coverage of wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 86, 83-102.
- Kar, K., Banerjee, S.** (2003). Node Placement for Connected Coverage in Sensor Networks. *WiOpt'03: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, Sophia Antipolis, France. 2.
- Keskin, M.E., Altinel, I.K., Aras, N., Ersoy, C.** (2014). Wireless sensor network lifetime maximization by optimal sensor deployment, activity scheduling, data routing and sink mobility. *Ad Hoc Networks*, 17, 18-36.
- Keskin, M.E., Altinel, I.K., Aras, N., Ersoy C.** (2016). Wireless Sensor Network Design by Lifetime Maximization: An Empirical Evaluation of Integrating Major Design Issues and Sink Mobility. *International Journal of Sensor Networks*, 20(3),131-146.
- Kriechbaum, L., Scheiber, G., Kienberger, T.** (2018). Grid-based multi-energy systems-modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. *Energy Sustainability and Society* 8, 35.
- Krug, S., O'Nils, M.** (2019). Modeling and Comparison of Delay and Energy Cost of IoT Data Transfers. *IEEE Access*, 7, 58654-58675.
- Kurt, S., Yildiz, H.U., Yigit, M., Tavli, B., Gungor, V.C.** (2017). Packet Size Optimization in Wireless Sensor Networks for Smart Grid Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(3), 2392-2401.
- Liang, H., Gao, W., Nguyen, J.H., Orpilla, M.F., Yu, W.** (2020).Internet of Things Data Collection Using Unmanned Aerial Vehicles in Infrastructre Free Environments. *IEEE Access*, 8, 3932-3944.
- Liu, Y., Liu, A., Zhang, N., Liu, X., Ma, M., Hu, Y.** (2019). DDC: Dynamic duty cycle for improving delay and energy efficiency in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 131, 16-27.
- Ma, R., Chen, H.H., Huang, Y.R., Meng, W.** (2013). Smart grid communication: Its challenges and opportunities. *IEEE transactions on Smart Grid*, 4(1), 36-46.
- Madan, R., Cui, S., Lall, S., Goldsmith, A.** (2006). Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(11), 3142-3152.
- Meguerdichian, S., Potkonjak, M.** (2003). Low Power 0/1 Coverage and Scheduling Techniques in Sensor Networks. *UCLA Technical Reports*, 030001.
- Moore, S.J., Nugent, C.D., Zhang, S., Cleland, I.** (2020). IoT reliability: a review leading to 5 key research directions. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 2, 147-163.
- Nakas, C., Kandris, D., Visvardis, G.** (2020). Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey, *Algorithms*, 13, 72.

- Patel, N.R., Kumar, S., Singh, S.K.** (2021). Energy and Collision Aware WSN Routing Protocol for Sustainable and Intelligent IoT Applications, *IEEE Sensors Journal*, 21(22), 25282-25292.
- Paul, B.** (2020). A Novel Mathematical Model to Evaluate the Impact of Packet Retransmissions in LoRaWAN. *IEEE Sensors Letters*, 4(5).
- Preeth, S.K.S.L., Dhanalakshmi, R., Shakeel, P.M.** (2020). An intelligent approach for energy efficient trajectory design for mobile sink based IoT supported wireless sensor networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 13, 2011-2022.
- Rahman, R., Islam, M., Pritom, A.I., Alsaawy, Y.** (2021). ASRPH: Application Specific Routing Protocol for Health care. *Computer Networks*, 197.
- Rebain, M., Le berre, M., Snoussi, H., Hnaien, F., Khoukhi, L.** (2015). Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks. *Ad-Hoc Networks*, 56, 11-21.
- Rehmani, M.H., Reisslein, M., Rachedi, A., Erol-Kantarci, M., Radenkovic, M.** (2018). Integrating Renewable Energy Resources Into the Smart Grid: Recent Developments in Information and Communication Technologies. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(7), 2814-2825.
- Rishiwal, V., Singh, O.** (2021). Energy efficient emergency rescue scheme in wireless sensor networks. *International Journal of Information Technology*, 13(5), 1951-1958.
- Rizvi, S., Qureshi, H.K., Khayam, S.A., Rakocevic, V., Rajarajan, M.** (2012). A1: An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(2), 597-605
- Roy, D.G., Mahato, B., De, D., Buyya, R.,** (2018). Application-aware end-to-end delay and message loss estimation in Internet of Things (IoT) — MQTT-SN protocols. *Future Generation Computer Systems*, 89, 300-316.
- Sankayya, M., Sakthivel, R.K., Gayathri, N., Al-Turjman, F.** (2020). Wireless sensor network-based delay minimization framework for IoT applications. *Personal and Ubiquitous Computing*.
- Sengupta, S., Das, S., Nasir, M.D., Panigrahi, B.K.** (2013). Multi-objective node deployment in WSNs: In search of an optimal trade-off among coverage, lifetime, energy consumption, and connectivity. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26, 405–416.
- Senthil, G.A., Raaza, A., Kumar, N.** (2021). Internet of things multi hop energy efficient cluster-based routing using particle swarm optimization, *Wireless Networks*, 27, 5207-5215.
- Sevgi, C., Koçyiğit, A.** (2014). Optimal deployment in randomly deployed heterogeneous WSNs: A connected coverage approach. *Journal of Network and Computer Applications*, 46, 182-197.

- Shah, B., Abbas, A., Ali, G., Iqbal, F., Khattak, A.M., Alfandi, O., Kim, K.** (2020). Guaranteed lifetime protocol for IoT based wireless sensor networks with multiple constraints. *Ad Hoc Networks*, 104.
- Shukla, A., Singh, D., Sajwan, M., Verma, A., Kumar, A.** (2022). A source location privacy preservation scheme in WSN-assisted IoT network by randomized ring and confounding transmission. *Wireless Networks*, 28, 827-852.
- Slijepcevic, S., Potkonjak, M.** (2001). Power efficient organization of wireless sensor networks, *ICC*, Helsinki, Finland.
- Sujanthi, S., Kalyani, S.N.** (2020). SecDL: QoS-Aware Secure Deep Learning Approach for Dynamic Cluster-Based Routing in WSN Assisted IoT. *Wireless Personal Communications*, 114, 2135-2169.
- Thangaramya, K., Kulothungan, K., Logambigai, R., Selvi, M., Ganapathy, S., Kannan, A.** (2019). Energy aware cluster and neuro-fuzzy based routing algorithm for wireless sensor networks in IoT. *Computer Networks*, 151, 211-223.
- Tripathi, Y., Prakash, A., Tripathi, R.** (2021). Load aware multipath data forwarding for enhanced lifetime of WSN. *International Journal of Information Technology*, 13(2), 807-815.
- Tuna, G., Gungor, V.C., Gulez, K.** (2013). Wireless Sensor Networks for Smart Grid Applications: A Case Study on Link Reliability and Node Lifetime Evaluations in Power Distribution Systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(2).
- Uzun, E., Tavli, B., Bicakci, K., Incebacak, D.** (2014). The Impact of Scalable Routing on Lifetime Of Smart Grid Communication Networks. *Ad Hoc Networks*, 22, 27-42.
- Vaiyapuri, T., Parvathy, V.S., Manikandan, V., Krishnaraj, N., Gupta, D., Shankar, K.** (2021). A Novel Hybrid Optimization for Cluster-Based Routing Protocol in Information-Centric Wireless Sensor Networks for IoT Based Mobile Edge Computing. *Wireless Personal Communications*.
- Vales-Alonso, J., Egea-López, E., Martínez-Sala, A., Pavón-Mariño, P., Bueno-Delgado, M.V., García-Haro, J.,** (2007). Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks, *Computer Networks*, 51(6) 1483-1498.
- Wang, J., Zhong, N.** (2006). Efficient point coverage in wireless sensor networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 11(3), 291–304.
- Wang, W., Srinivasan, V., Chua, K.C.** (2005). Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, 270-283.
- Xiang, X., Liu, W., Wang, T., Xie, M., Li, X., Song, H., Liu, A., Zhang, G.** (2019). Delay and energy-efficient data collection scheme-based matrix filling theory for dynamic traffic IoT. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 168.



- Ye, W., Ordóñez, F.** (2008). Robust Optimization Models for Energy-Limited Wireless Sensor Networks under Distance Uncertainty. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(6), 2161-2169.
- Yetgin, H., Cheung, K. T. K., El-Hajjar, M., Hanzo, L. H.** (2017). A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 19(2), 828–854.





## **EKLER**

EK A: ORTALAMA AĞ ÖMRÜ, STANDART SAPMA, GÜVEN ARALIĞI.

EK B: AĞ ÖMRÜNDE ORTALAMA AZALMA.

EK C: MODELLERİN SAĞLADIĞI KAPSAMA SEVİYESİ.

EK D: İSTENEN MİNİMUM KAPSAMA SEVİYESİ ÜZERİNDE DUYARLILIK ANALİZİ.



## EK A: ORTALAMA AĞ ÖMRÜ, STANDART SAPMA, GÜVEN ARALIĞI

Çizelge Ek 1:  $MMaxE$  &  $MSumE$  ile  $T^{max} = 1$  &  $T^{max} = 2$  için farklı simülasyon ortamlarında elde edilen ortalama ağ ömrü.

Ağ	Sensör Oranı	Ortalama Ağ Ömrü		
		$MSumE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 2$	$MMaxE$
4x4	0,25	122	275	623
	0,5	342	724	1055
	0,75	569	996	1356
6x6	0,25	75	195	320
	0,5	189	364	568
	0,75	349	570	890
8x8	0,25	55	142	190
	0,5	120	226	335
	0,75	193	331	472
10x10	0,25	53	132	142
	0,5	75	182	226
	0,75	178	315	352

Çizelge Ek 2:  $MMaxE$  &  $MSumE$  ile  $T^{max} = 1$  &  $T^{max} = 2$  için farklı simülasyon ortamlarında elde edilen ortalama ağ ömrüne ait standart sapma

Ağ	Sensör Oranı	Standart Sapma		
		$MSumE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 2$	$MMaxE$
4x4	0,25	31	62	86
	0,5	45	101	78
	0,75	109	210	0
6x6	0,25	18	73	117
	0,5	38	57	101
	0,75	49	75	113
8x8	0,25	20	42	66
	0,5	16	45	51
	0,75	28	62	66
10x10	0,25	17	39	42
	0,5	23	57	52
	0,75	47	39	45

Çizelge Ek 3:  $MMaxE$  &  $MSumE$  ile  $T^{max} = 1$  &  $T^{max} = 2$  için farklı simülasyon ortamlarında elde edilen ortalama ağ ömrüne ait standart sapma

Ağ	Sensör Oranı	Güven Aralığı		
		$MSumE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 2$	$MMaxE$
4x4	0,25	19	39	53
	0,5	28	62	48
	0,75	96	184	0
6x6	0,25	11	45	72
	0,5	24	36	63
	0,75	43	66	99
8x8	0,25	12	26	41
	0,5	10	28	32
	0,75	25	54	57
10x10	0,25	11	24	26
	0,5	14	35	32
	0,75	41	35	39

## EK B: AĞ ÖMRÜNDE ORTALAMA AZALMA

Çizelge Ek 4: 4x4'e kıyasla ortalama ağ ömründeki azalma

Sensör Oranı	Ağ	Ortalama Ağ Ömrü		4x4 yerleşime göre düşüş	
		<i>MMaxE</i>	<i>MSumE-T<sup>max</sup> = 2</i>	<i>MMaxE</i>	<i>MSumE-T<sup>max</sup> = 2</i>
0,25	4x4	623	275	-	-
	6x6	320	195	0,49	0,29
	8x8	190	142	0,69	0,48
	10x10	142	132	0,77	0,52
0,5	4x4	1055	724	-	-
	6x6	568	364	0,46	0,45
	8x8	335	226	0,68	0,65
	10x10	226	182	0,79	0,78
0,75	4x4	1356	996	-	-
	6x6	890	570	0,34	0,39
	8x8	472	331	0,65	0,66
	10x10	352	315	0,74	0,69

## EK C: MODELLERİN SAĞLADIĞI KAPSAMA SEVİYESİ

Çizelge Ek 5:  $MMaxE T^{max} = 1$ ,  $MSumE T^{max} = 1$  ve  $MSumE T^{max} = 2$  ile elde edilen ortalama kapsama seviyesi.

Sensör Oranı	Ağ	Kapsama Seviyesi			
		$MMaxE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 2$	
				$MSumE(P1)$	$MSumE(P2)$
0,25	4x4	0,38	1,00	1,00	0,38
0,5		0,38	1,00	1,00	0,38
0,75		0,38	0,88	1,00	0,38
0,25	6x6	0,36	1,00	1,00	0,36
0,5		0,36	1,00	1,00	0,36
0,75		0,36	0,97	0,97	0,36
0,25	8x8	0,36	1,00	1,00	0,42
0,5		0,36	0,94	1,00	0,48
0,75		0,36	0,94	1,00	0,53
0,25	10x10	0,35	0,64	0,75	0,35
0,5		0,35	0,95	1,00	0,35
0,75		0,35	0,95	1,00	0,37
	<b>Ortalama</b>	<b>0,36</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	<b>0,39</b>

( $MSumE T^{max} = 2$  modelinde, birinci  $MSumE(P1)$  ve ikinci  $MSumE(P2)$  periyotlar ayrı ayrı belirtilmiştir)

## EK D: İSTENEN MİNİMUM KAPSAMA SEVİYESİ ÜZERİNDE DUYARLILIK ANALİZİ

Çizelge Ek 6:  $MMaxE$  &  $MSumE$  ile  $T^{max} = 1$  &  $T^{max} = 2$  için farklı minimum kapsama seviyelerinde elde edilen ortalama ağ ömrü

İstenen Min Kapsama	Ortalama Ağ Ömrü		
	$MMaxE$	$MSumE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 2$
0,25	728	181	441
0,35	546	181	374
0,5	414	181	289
0,75	281	181	215
1	211	177	171

Çizelge Ek 7:  $MMaxE$  &  $MSumE$  ile  $T^{max} = 1$  &  $T^{max} = 2$  için farklı minimum kapsama seviyelerinde elde edilen ortalama ağ ömrüne ait standart sapma

İstenen Min Kapsama	Standart Sapma		
	$MMaxE$	$MSumE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 2$
0,25	387,74	107,30	316,74
0,35	330,34	107,32	225,68
0,5	276,47	107,30	190,40
0,75	195,34	107,31	138,64
1	148,39	110,52	108,27

Çizelge Ek 8:  $MMaxE$  &  $MSumE$  ile  $T^{max} = 1$  &  $T^{max} = 2$  için farklı minimum kapsama seviyelerinde elde edilen ortalama ağ ömrüne ait güven aralığı

İstenen Min Kapsama	Güven Aralığı		
	$MMaxE$	$MSumE-T^{max} = 1$	$MSumE-T^{max} = 2$
0,25	120,16	33,25	98,16
0,35	102,37	33,26	69,94
0,5	85,68	33,25	59,00
0,75	60,53	33,25	42,96
1	45,99	34,25	33,55



## ÖZGEÇMİŞ

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- **Serper, E.Z.**, Altın-Kayhan, A., 2022. Coverage and connectivity based lifetime maximization with topology update for WSN in smart grid applications, *Computer Networks*, Volume 209, 108940, ISSN 1389-1286.
- **Serper, E.Z.**, Altın-Kayhan, A., 2021. Akıllı Şebekeler için Kablosuz Algılayıcı Ağ Uygulamalarında Ağ Ömrü ve Gecikme Eniyilemesi, 40. Veri Çağında Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi, YAEM 2021, 5-7 Temmuz, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- **Serper, E.Z.**, Altın-Kayhan, A., 2020.  $\alpha$ -Coverage and Connectivity Based Lifetime Maximization for WSN in Smart Grid, 15th INFORMS Telecommunications and Network Analytics Conference, October 20-21, Berlin.
- **Serper, E.Z.**, Altın-Kayhan, A., Tavlı, B., 2019. Akıllı Şebekelerde Kablosuz Algılayıcı Ağ Ömrü Eniyilemesi, 38. Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi, YAEM 2019, 12-14 Haziran, Başkent Üniversitesi, Ankara.

### DİĞER YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- **Serper, E.Z.**, Alumur, S.A., 2016. The design of capacitated intermodal hub networks with different vehicle types, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 86, Pages 51-65, ISSN 0191-2615.
- **Serper, E.Z.**, Altın-Kayhan, A., Alumur, S.A., 2018. Kapasitesiz Ana Dağıtım Üssü Yer Seçimi ve Filo Belirlenmesi Problemi, 38. Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi, YAEM 2018, 26-29 Haziran, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- **Serper, E.Z.**, Alumur, S.A., 2013. Hub location and the design of capacitated intermodal hub networks, EWGLA XX- EURO Working Group on Locational Analysis Meeting, April 17-19, TOBB ETU, Ankara.
- **Serper, E.Z.**, Alumur, S.A., 2013. Ulaşım Maliyeti Odaklı Ana Dağıtım Üssü Yer Seçimi ve Kapasiteli İntermodal Ana Dağıtım Üssü Ağları Tasarımı, International IIE Conference & 33. Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi, YAEM 2013, 26-28 Haziran, İstanbul.

- Ersol, D., **Serper, E.Z.**, GÜngör, G., 2012. Designing a Sustainable Receiving Dock System Using Automated Guided Vehicles, GCSM 2012- 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing, October 31-November 02, Istanbul.
- Danış, D., **Serper, E.Z.**, GÜngör, G., Güven, M., Yavuz, S., 2011. Türk Traktör Depo Optimizasyonu, 31. Yöneyem Araştırması Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi, YAEM 2011, 5-7 Temmuz, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.



