



**KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI İÇİN YENİ BİR
ÖMÜR TANIMI:
BÜTÜNLEŞİK KARMA TAMSAYILI
DOĞRUSAL PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI**

Elif TORLAK

**Yüksek Lisans Tezi
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emre KESKİN
2018
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI İÇİN YENİ BİR ÖMÜR TANIMI:
BÜTÜNLEŞİK KARMA TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA
YAKLAŞIMI**

Elif TORLAK

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2018**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI İÇİN YENİ BİR ÖMÜR TANIMI:
BÜTÜNLEŞİK KARMA TAMSAYILI DOĞRUSAL
PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI**

Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emre KESKİN danışmanlığında Elif TORLAK tarafından hazırlanan bu çalışma 29/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak oybirliği / oy çokluğu (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Alper DÖYEN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emre KESKİN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Burak ERKAYMAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 08/02/2018 tarih ve 6 / 85 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI İÇİN YENİ BİR ÖMÜR TANIMI: BÜTÜNLEŞİK KARMA TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI

Elif TORLAK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emre KESKİN

Kablosuz Sensör Ağı (KSA) düşük güçlü, düşük maliyetli, çok işlevli sensör adı verilen elektronik aygıtlardan oluşur. Sensörler, sensör alanı olarak adlandırılan belli bir bölge üzerine dağıtılarak alanı gözlemeye ve biriken bilgiyi, iletişim menzilineki komşu sensör ya da ana alıcıya göndermeye kabiliyetlidirler. KSA'nın uygulanabilirliğini etkileyen en önemli unsur ağın ömrüdür. Birçok çalışmada ağ ömrü ya ilk sensörün öldüğü ana kadar geçen süre ya da ilk gözetim kaybının yaşandığı ana kadar geçen süre olarak tanımlanmıştır. Halbuki, ilk sensörün ölümünden ya da ilk gözlem kaybının yaşandığı andan sonra da ağ hala işlevseldir. Dolayısıyla literatürdeki ağ ömür tanımlamaları gerçekçi değildir. Bu çalışmada literatürde bulunan ağ ömürlerine alternatif olarak, gerçekçi ağ ömrü tanımlamaları yapılmıştır. Bunun yanı sıra ağ ömrünün uzatılması için sensörler arasında enerji yüklerinin eşit dağılımı önemli bir husus olup enerjinin dağılımını etkileyen dört ana KSA tasarım konusu vardır. Bunlar; sensörlerin yerleri, sensörlerin aktif ve bekleme periyotlarının çizelgesi, ana alıcıların rotalanması ve veri akış rotalarıdır. Gerçekçi ağ ömrü tanımıyla birlikte tasarım konularını bütünlükte ele alan Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli sunulmuştur ve çözüm için sezgisel yöntem önerilmiştir. Çalışma sonunda kapsamlı sayısal deneylere dayanarak, önerilen sezgisel yöntemin üstünlüğü gösterilmeye çalışılmıştır.

2018, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Sensör Ağları, Gerçekçi Ömür Tanımları, Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama, Periyot Üretme Sezgiseli

ABSTRACT

MS Thesis

A NEW LIFETIME DEFINITION FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS: AN INTEGRATED MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING APPROACH

Elif TORLAK

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Muhammed Emre KESKİN

Wireless Sensor Network (WSN) consists of electronic devices called sensors which are multifunctional, low-power and low-cost. Sensors are capable of monitoring a certain environment, called as sensor area, where they are distributed, and sending the collected data to adjacent sensor within the range of transmission or to the sink. The most significant factor affecting the applicability of WSN is the lifetime of network. In many studies, the network lifetime has been defined as either the time passing until the first sensor death or the time passing until the first loss in monitoring. However, the network is still functional even after the first sensor death or the first monitoring loss. Therefore, the lifetime definitions in literature are not realistic. In this study, realistic lifetime definitions have been made as alternatives to those in literature. In addition, balanced distribution of energy load among the sensors is an important issue for increasing the lifetime of a network, and there are four main elements in WSN designing affecting the distribution of energy. These are the location of the sensors, the schedule of active and standby mode periods of the sensors, the routing of receiving hosts, and the routes of data flow. With the realistic network lifetime definition, Mixed-Integer Linear Programming (MILP) which deals with designing issues in an integrated way has been used, and a heuristic method has been recommended for the solution. At the end of the study, it has been attempted to show the superiority of the recommended heuristic method.

2018, 77 pages

Keywords: Wireless Sensor Networks, Realistic Lifetime Definitions, Mixed Integer Linear Programming, Period iteration heuristic

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ve tez sürecinde yardımlarını esirgemeyen, bilgisi, önerileri ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan kıymetli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emre KESKİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman beni destekleyen ve yanımda olan sevgili arkadaşlarım Tuba ADAR ve Merve TUTAR'a teşekkür ederim.

Çalışmamı, bugünlere gelmemde çok emeği olan, bana inanan ve güvenen, bu zamana kadar maddi, manevi desteklerini esirgemeyen, hayattaki en büyük şansım olan canım aileme ithaf ederim.

Elif TORLAK

Ocak, 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	10
3. MATERYAL ve METOD.....	15
3.2. Küme, Parametre ve Karar Değişkenleri.....	16
3.3. Matematiksel Model.....	18
3.4. Çözüm Metodu	22
3.4.1. Periyot Üretme Sezgiseli	22
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	27
4.1. Sayısal Sonuçlar	27
4.1.1. Test problemi oluşturma ve parametre seçimi	27
4.1.2. Performans analizi	30
5. SONUÇ	37
KAYNAKLAR	38
EKLER.....	42
EK 1.....	42
EK 2.....	58
ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ψ	Küçük bir hassasiyet
c_{ij}^t	i noktasından j noktasına iletilen bir bit veri başına sensörün harcadığı enerji
NA_{ir}	i noktasındaki r tipi sensörün bilgi gönderebildiği ana alıcıların kümesi
NG_{ir}	i noktasındaki r tipi sensörün kapsadığı noktaların kümesi
N_{ir}	i noktasındaki r tipi sensörün komşu sensörlerinin kümesi
T^*	Maksimum ağ ömrünü veren en düşük periyotun sayısı
a_{irt}	$w_t q_{irt}$ yerine kullanılan sürekli değişken
b_{kt}	$w_t \beta_{kt}$ yerine kullanılan sürekli değişken
c^r	Alınan bir bit veri için sensör tarafından harcanan enerji
c^s	Birim zaman başına aktif sensörler tarafından algılama ve işleme için harcanan enerji
d_{ij}	i ve j noktalarında bulunan sensörlerin arasındaki mesafe
d_k	k noktasını gözlemesi gereken sensör sayısı
e^r	r tipi sensörün batarya enerjisi
f_{ir}	i noktasına r tipi sensörün yerleştirilme maliyeti
p_{ir}	i noktasında r tipi sensörün yerleştirilip yerleştirilmediğini belirten ikili değişken
q_{irt}	t periyodunda i noktasında r tipi sensörün aktif olup olmadığını belirten ikili değişken
w_t	t periyodunun uzunluğu
x_{irjst}	t periyodunda, i noktasında bulunan r tipi sensörden j noktasında bulunan s tipi sensöre veri akış miktarı
y_{irlt}	t periyodunda, i noktasında bulunan r tipi sensörden l noktasında bulunan ana alıcıya veri akış miktarı
z_g	Gurobi tarafından elde edilen maksimum ağ ömrü
z_{lt}	t periyodunda l noktasında ana alıcı olup olmadığını belirten ikili değişken

$z_{püs}$	Periyot üretme sezgiseli ile elde edilen maksimum ağ ömrü
α_k	k noktasının ömrün yüzde kaçında gözlemlenmeyebileceğini belirten parametre
β_{kt}	t zaman diliminde k noktasının gözlenip gözlenmediğini belirten ikili değişken
δ^η	Periyot sayısı η için bulunan kısıtlanmış model amaç fonksiyon değeri
ζ_1	İletim enerjisinin mesafeden bağımsız sabit kısmının katsayısı
ζ_2	İletim enerjisinin mesafeye bağlı olan kısmının katsayısı
B	Sensör yerleştirme bütçesi
I	Muhtemel sensör yerlerinin kümesi
K	Sensör alanında kapsanacak noktaların kümesi
k_1	Gözlem kaybının olmadığı parçanın ağırlığı
k_2	Gözlemdeki kaybın belirli bir düzeyin altında olduğu parçanın ağırlığı
L	Muhtemel ana alıcı yerlerinin kümesi
L_1	Gözlem kaybının olmadığı kısım
L_2	Gözlemdeki kaybın belirli bir düzeyin altında olduğu kısım
M	Çok büyük bir sayı
P	Toplam ana alıcı sayısı
R	Sensör tiplerinin kümesi
T	Zaman dilimleri kümesi
η	Periyot numarası

Kısaltmalar

ARP	Ana Alıcı Rotalama Problemi
AS	Alt sınır
DP	Doğrusal Program
EÇP	Etkinlik Çizelgeleme Problemi
KP	Kapsama Problemi
KSA	Kablosuz Sensör Ağ

KTDP	Karma Tamsayılı Doğrusal Program
PÜS	Periyot Üretme Sezgiseli
ÜS	Üst sınır
VEKA	Bütünleşik Matematiksel Model
VRP	Veri Rotalama Problemi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kablosuz Sensör Ağı Uygulama Alanları.....	1
Şekil 1.2. Sensörler ve ana alıcılar arasındaki iletişim	4
Şekil 1.3. Gerçekçi ağ ömrü 2.....	8
Şekil 1.4. Gerçekçi ağ ömrü 3.....	8
Şekil 4.1. Farklı hassasiyet seviyeleri için ortalama ağ ömürleri	31
Şekil 4.2. Farklı α değerleri (0.05, 0.10, 0.20, 0.40) için ortalama yüzde sapmalar.....	31
Şekil 4.3. Farklı boyuttaki ağlar için ortalama ağ ömürleri	34
Şekil 4.4. Ortalama yüzde sapmalar	35
Şekil 4.5. Gurobi ve PÜS'ün VEKA modelini çözerken harcadığı süreler	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kümeler, parametreler ve karar değişkenleri.....	17
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan parametreler	29
Çizelge 4.2. Gurobi ve PÜS'den elde edilen maksimum ağ ömürleri.....	33



1. GİRİŞ

Sensör, ısı, ışık, hareket, nem, basınç gibi fiziksel ortamdaki değişiklikleri algılayan düşük güçlü, düşük maliyetli, çok işlevli elektronik aygıttır (Kalaycı, 2011). Sensörler, sensör alanı olarak adlandırılan belli bir bölge üzerine dağıtılarak alanı gözlemeye ve biriken bilgiyi iletişim menzilineki komşu sensör ya da ana alıcıya göndermeye kabiliyetlidirler.

Kablosuz Sensör Ağı (KSA), fiziksel ya da çevresel koşulları kooperatif bir şekilde izlemek için sensör kullanan ve birbirinden bağımsız çalışan araçlar içeren kablosuz ağlardır. KSA, kablosuz bir ortam aracılığı ile birbirine bağlanmış ve birbirleriyle bilgi alışverişi yapan sensörlerden oluşur. Sensör alanına dağıtılan sensörler işbirliği yaparak bir algılama ağ sistemi oluşturmaktadır (Yazar, 2015).

Kablosuz sensör ağı uygulamalarının genel olarak amacı; izleme, takip etme ve kontroldür. KSA'lar özellikle uzak ve erişilmez alanları izleyebilen dağıtık platformlardır. KSA'ların bazı uygulama alanları Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Kablosuz Sensör Ağı Uygulama Alanları

KSA'nın uygulama alanı oldukça geniştir ve bu uygulama alanları detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir (Ceylan 2008, Soylu 2012).

Askeri uygulamalar (Winkler *et al* 2008; Lee *et al* 2009; Akyildiz ve Vuran 2010);

- Gözetleme, keşif sistemleri (Savaş alanlarının gözetim altına tutulması, Arazi hakkında keşifte bulunmak),
- Hedef alma sistemleri (hedeflerin hız ve konumlarının tespit edilmesi),
- Haberleşme sistemleri,
- Kontrol ve haber alma sistemleri (personel ve askeri araçların takip edilmesi, düşman hareketlerinin izlenmesi).

Çevresel Takip Uygulamaları (Marshall *et al* 2003; Martinez *et al* 2004);

- Tarımsal faaliyetlerin izlenmesi (Tarım, sulama, seracılık),
- Gıda kalitesi,
- Hayvan çiftliklerinin izlenmesini,
- Hava durumu, Hava kirliliğinin tespiti,
- Doğal afetlerin takibi (Sel, deprem, orman yangını).

Sağlık Uygulamaları (Dishongh and McGrath, 2009, Akyildiz ve Vuran, 2010);

- Hastaların sağlık parametrelerini izleme (ateş, kan basıncı, nefes alma vb.),
- Yaşlıların ve özürlülerin durumlarının takibi,
- Hastanede bulunan doktorların yerinin tespit edilmesi.

Yapı Otomasyon Uygulamaları (Kappler and Riegel, 2004, Dargie ve Poellabauer, 2010);

- Güvenlik (bina güvenlik sistemleri),

- Akıllı evler (Yangın alarm sistemleri, Işıklandırma kontrolü).

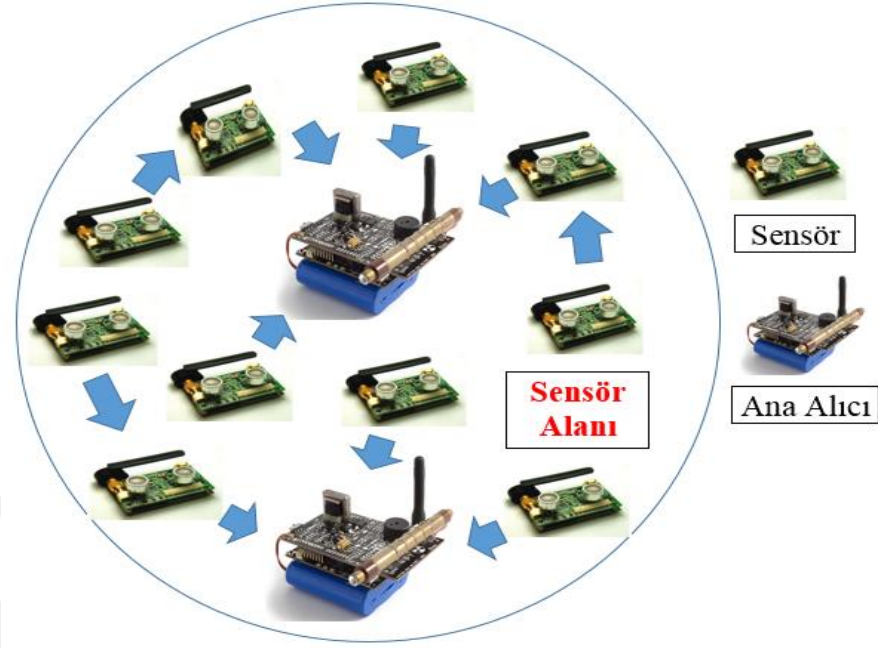
Üretim, Depolama ve Taşımacılık Uygulamaları (Verdone *et al* 2008, Havinga, 2007);

- Ürün takibi,
- Trafik izleme,
- Ürün yer tayini.

Ticari Uygulamaları (Akyildiz ve Vuran, 2010, Dargie and Poellabauer, 2010);

- Araçların izlenmesi ve tespit edilmesi,
- Enerji hatlarının izlenmesi,
- Küçük çocukların aileleri tarafından takip edilmesi,
- Işıklandırma kontrolü,
- Trafik ışıklarının kontrolü,
- Süreç izleme ve kontrol.

Bir sensör, algılama aralığı içine düşen komşu bölgeden veri toplar ve toplanan bilgiler ana alıcı olarak adlandırılan düğümlere doğrudan veya komşu sensörler üzerinden aktarılır. Sensörler arasındaki iletişim veya bir sensör ve bir ana alıcı arasındaki iletişim, sadece alıcı sensör veya ana alıcı, verici sensörün iletişim aralığında ise mümkün olmaktadır. Sensörler ve ana alıcılar arasındaki iletişim Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Sensörler ve ana alıcılar arasındaki iletişim

Sensörler, iletim aralıkları, algılama ve birim maliyet gibi teknik özelliklerine göre farklılık gösterebilmektedir. KSA içerdikleri sensörlere göre homojen KSA ve heterojen KSA olarak sınıflandırılabilir. Heterojen KSA'lar birden fazla sensör tipinden oluşurken homojen KSA'lar tek tip sensörden oluşmaktadır. Beri taraftan sensörler aktif veya pasif halde olabilirler. Pasif sensörler ihmal edilebilir düzeyde enerji kullanır ve hiçbir veri alamaz, veremez ve algılayamazlar. Öte yandan aktif sensörler ise veri algılar, alırlar, iletirler ve bunları yaparken de enerji harcarlar.

Kablosuz sensör ağlarda karşılaşılan önemli bir problem sensörlerin sınırlı enerjiye sahip olmasıdır. Sensörlerin hem uzak ve erişilemez alanlarda çalışması beklendiğinden hem de KSA uygulamalarında kullanılan sensörlerin sayısı fazla olduğundan pillerinin şarj edilmesi veya değiştirilmeleri mümkün olmamaktadır. Bu da KSA tasarlanırken enerji tüketiminin sensörler arasında dengeli dağılması gerektiğine işaret etmektedir.

Kablosuz sensör ağı tasarımı enerji dağılımını önemli ölçüde etkileyen 4 ana unsur bulunmaktadır. Bunlar; sensör yerlerinin belirlenmesi, sensörlerin görev çizelgelerinin belirlenmesi, ana alıcı güzergâhlarının belirlenmesi, veri akış rotalarının belirlenmesidir. İlk problem sensör alanının kapsama ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde sensörlerin yerlerinin, bireysel sensör arızaları da göz önüne alınarak belirli bir esneklikle belirlenmesidir ve bu problem karşımıza Kapsama Problemi (KP) olarak çıkmaktadır. Sensörlerin yerleri enerji tüketimi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır; çünkü bir iletim sırasında kullanılan enerji, verici ve alıcı arasındaki mesafeye bağlıdır. Sensörlerin yerleri belirlenirken kapsama şartının yanısıra sensörler arasındaki enerji tüketim dağılımı da dikkate alınmalıdır.

KSA tasarımı dikkat edilmesi gereken ikinci karar ise enerji tüketimini etkileyen Etkinlik Çizelgeleme Problemi (EÇP)'dir. Sensörlerin sürekli olarak açık kalması enerjilerinin hızla tükenmesine sebep olacaktır. Enerjisi azalan sensörler pasif hale getirilebilirken, pasif sensörler de aktif hale getirilebilmektedir. Dolayısıyla, enerjisi azalmış sensörleri pasif hale getirip dinlendirerek, enerji yükünün sensörler arasında eşit dağılması sağlanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus ağ ömrü boyunca kapsama ihtiyaçlarının karşılanması için, herhangi bir zamanda yeterli sayıda sensörün aktif halde olmasıdır. Ayrıca sensörlerin sayısı ve yerleri, sensörlerin etkinlik çizelgelerinin kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeplerden ötürü bu iki tasarım konusu birbirinden ayrı düşünülemez.

Ana alıcılar sabit olduğunda, ana alıcının yakınındaki sensörler enerjilerini ağına geri kalanından daha hızlı bir şekilde tüketirler. Bunun sebebi ise ağda toplanan tüm verinin bu sensörler vasıtasıyla ana alıcılara iletilmesidir. Bu problem literatürde “kalabalık merkez etkisi” (Papa *et al.* 2007), “enerji boşluğu problemi” (Li and Mohapatra 2007; Wu *et al.* 2008), veya “ana alıcı komşuluk problemi” (Basagni *et al.* 2008) olarak adlandırılmaktadır. Bu durumun önüne ise ana alıcıların hareket ettirilmesiyle geçilebilir. Bu konu ise Ana Alıcı Rotalama Problemi (ARP) olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebepten dolayı ARP, KSA tasarımı önemli olan üçüncü karardır.

Son olarak dördüncü KSA tasarım kararı enerji açısından en verimli sensör-ana alıcı veri akış güzergâhlarının belirlenmesidir. Veri Rotalama Problemi (VRP) olarak adlandırılan bu problemde, verilen ana alıcı ve aktif sensör konumları için, en verimli veri yollarını bulmak nispeten kolaydır. Bununla birlikte veri rotaları kalitesinin, aktif sensörlerin ve ana alıcıların yerlerine bağlı olduğuna dikkat edilmelidir.

Literatürdeki çalışmaların çoğu bu tasarım konularının sadece bir kısmına değinmiştir ve tasarım konularını bütünleşik şekilde ele alan çalışma sayısı azdır. Hâlbuki bu unsurlar birbirlerini etkilediklerinden, her biri için bağımsız çalışma yapılması uygun değildir. KSA tasarım konularından birinin kötü belirlenmesi diğerlerini de etkilemektedir ve bu da kötü sonuçlar elde etmemize sebebiyet verir. Bu nedenle 4 tasarım konusu KP, EÇP, ARP ve VRP'nin birleşik bir çerçeve içinde ele alınması gerekir.

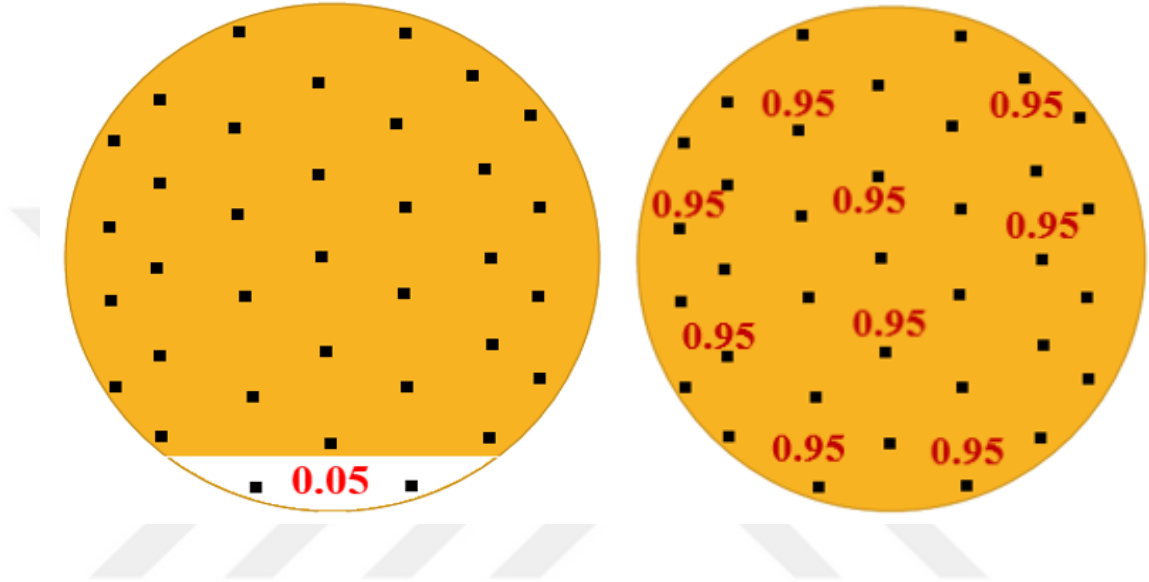
KSA'larda tasarım konularının yanı sıra ele alınması gereken bir diğer husus ağın ömür tanımıdır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, ağ ömrü ya ilk sensörün öldüğü ana kadar geçen süre, ya da ilk gözetim kaybının yaşandığı ana kadar geçen süre olarak tanımlanmıştır. Hâlbuki ilk sensörün ölümünden ya da ilk gözlem kaybının yaşandığı andan sonra da ağ hala işlevseldir ve gözlem noktalarının ihtiyaçlarının çoğuna cevap verecek kabiliyettedir. Dolayısıyla literatürdeki ağ ömür tanımlamaları gerçekçi değildir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada ağ ömürlerine alternatif olarak 3 tane gerçekçi ağ ömrü tanımı yapılmıştır. Tasarlanan birinci ağ ömrü tanımı, ömrü, ilk gözlem kaybının olduğu ana kadar geçen süre yerine gözlemdaki kaybın belli bir yüzdenin üstüne çıktığı ana kadar geçen süre olarak tanımlar. Bu tanım, ömrü, gözlem kaybının olmadığı parça (L_1) ve kaybın belirli bir düzeyin altında olduğu parça (L_2) olarak iki kısma ayırmaktadır. Ömrün ilk L_1 parçası boyunca kapsam noktalarının tamamının gözetilmesi, ikinci parça L_2 boyunca da belirlenen bir düzeyin üstündeki kısmının gözlemlenmesi gerektiği doğrusal kısıtlarla ifade edilebilmektedir. Bu durumda sensör yerleri haricindeki bütün karar değişkenlerinin (yani zamana bağlı değişkenler olan sensör çizelgeleme, ana alıcı rotalama, veri akış değişkenleri), L_1 ömür parçasına düşen ve L_2 parçasına düşen şeklinde iki küme halinde ayrı ayrı

tanımlanmaları, ilgili gözlem kısıtlarının da ilgili değişkenler kullanılarak belirlenmesi gerekecektir. Ayrıca L_1 ve L_2 ömür parçalarına düşen değişkenler arası ilişkiyi kuran ek kısıtlara da ihtiyaç doğacaktır. Toplam ömür amaç fonksiyonunda $L_1 + L_2$ olarak tanımlanabileceği gibi belirli ağırlıklar atanarak $k_1L_1 + k_2L_2$ şeklinde ağırlıklı toplam olarak tanımlanması da mümkün olacaktır. Ömrün bu şekilde iki parça halinde tanımlanması halinde L_1 ve L_2 'nin ardarda ayrı ayrı optimize edilmesi de bir alternatif olarak düşünülebilecektir. Yani önce L_1 en büyüklenecek, ardından sensörlerin kalan ömürleri ikinci en büyükleme problemide başlangıç sensör enerjileri olarak ele alınarak L_2 enbüyüklenebilecektir.

Tasarlanan ikinci gerçekçi ömür tanımında da gözlemdeki kaybın belli bir yüzdenin üstüne çıktığı ana kadar geçen süre olarak tanımlanan ağ ömrüne farklı bir yaklaşım katılmıştır. Ömrün gözlem kaybının olmadığı ve belli bir seviyenin altında olduğu iki parçaya ayrılması yerine ömrün tamamında gözlemin belli bir seviyenin üstünde olduğu düşünülebilir. Mesela hassasiyet seviyesi α olarak belirlenirse gözlem kısıtları ömrün herhangi bir anında gözlem noktalarının yüzde $100(1 - \alpha)$ kadarının gözlem ihtiyaçlarını kapsayacak şekilde yazılabilir. Bu yaklaşım literatürde Gentili ve Raiconi (2011) tarafından bütünleşik olmayan KSA tasarımı bağlamında ele alınmıştır. Bu yaklaşımda ömrün ilk zamanlarında da bazı gözlem noktalarının gözlem ihtiyaçlarının karşılanamayabileceğine dikkat etmek gereklidir. Bu yaklaşımın doğrusal kısıtlarla ifadesinde bir zorlukla karşılaşılacağı düşünülmemektedir.

Üçüncü olarak tasarlanan alternatif bir ömür tanımı olarak da şöyle bir yaklaşım getirilebilir. Kullanıcının belirlediği bir hassasiyet seviyesi α için, ağ ömrü öyle bir süredir ki, herhangi bir gözlem noktasının ihtiyaçları ömür süresinin yüzde $100(1 - \alpha)$ kadarında karşılanır. Bu ömür tanımı diğer ikisine nazaran daha gerçekçidir, zira ilk alternatifte L_2 boyunca, ikinci alternatifte ise bütün ömür süresince gözlem ihtiyaçları hiç karşılanmamış gözlem noktalarının olması ihtimali mevcuttur. Bu son ömür tanımında ise her gözlem noktasının ömrün yüzde $100(1 - \alpha)$ kadarında gözlemleneceği kesindir. Mesela, $\alpha = 0.05$ olarak ele alındığında Şekil 1.3'te görüldüğü gibi gözlem noktalarının 0.05'lik kısmında kapsama ihtiyaçları hiç

karşılanmayan noktalar bulunabilir. Diğer taraftan gerçekçi ömür tanımı 3'ün göz önüne alındığı Şekil 1.4 incelendiğinde ise gözlem noktalarının kapsama ihtiyaçları ömrün en az %95'inde karşılanacağı kesindir. Bu sebepten dolayı çalışmamızda kullanılan KSA ağ ömrü, üçüncü alternatif olarak ele aldığımız gerçekçi ağ ömrü tanımıdır.



Şekil 1.3. Gerçekçi ağ ömrü 2 ($\alpha = 0.05$) **Şekil 1.4.** Gerçekçi ağ ömrü 3 ($\alpha = 0.05$)

Ağ ömrünü enbüyüklemek için optimal KSA tasarımı hakkında zengin bir literatür mevcut olsa da, literatürdeki matematiksel optimizasyon modellerinin çoğunda temel alınan ağ ömrü, ağın ilk gözlem kaybından sonra öldüğü varsayımına dayanmaktadır ve çalışmaların çoğu yukarıda belirtilen tasarım konularının yalnızca bir alt kümesini ele almaktadır. Keskin (2017) çalışmasında bütün temel karar esaslarını içeren bir Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) önermiş ve pratik çözüm yöntemleri geliştirmiştir. Ancak temel aldıkları ağ ömrü, ağın ilk gözlem kaybından sonra öldüğü varsayımına dayanmaktadır. Gentili and Raiconi (2011)'nin çalışmasında ise ağ ömrüne daha gerçekçi bir bakış açısıyla yaklaşmış olsalar da önerdikleri model sadece sensör çizelgeleme karar değişkenine dayanmakta ve bütünleşik yaklaşımın getireceği avantajları içermemektedir.

Tasarım konularını bütünleşik bir şekilde ele alan çalışmalarda gerçekçi ağ ömrü kullanılmamıştır. Gerçekçi ağ ömrü tanımı yapılan Gentili and Raiconi (2011)'nin çalışmasında tasarım konuları bütünleşik bir şekilde ele alınmamıştır. Bu sebepten dolayı hem tasarım konularını bütünleşik şekilde ele alan, hem de alternatif ağ ömür tanımlarını dikkate alan bir çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada yeni bir ağ ömrü tanımı yapılmıştır. Gerçekçi ağ ömrüne dayanan VRP, EÇP, KP, ARP tasarım konularını bütünleşik bir şekilde ele alan yeni bir matematiksel model sunulmuştur. Matematiksel model, ticari çözücü Gurobi kullanılarak çözülmüştür. Fakat ticari çözücü Gurobi, zaman sınırlamaları nedeniyle gerçek boyuttaki örnekleri çözmekte başarısız olduğundan dolayı Periyot Üretme Sezgiseli (PÜS) olarak adlandırılan pratik bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Bu çalışma, yeni bir ağ ömrü tanımı içermesi, tasarım konularını bütünleşik bir şekilde ele alması ve kullanılan sezgisel yöntem açısından diğer çalışmalardan farklıdır.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. Bir sonraki bölümde KTDP kullanarak KSA tasarımı yapan çalışmaların özeti sunulmaktadır. Bölüm 3, gerçekçi ağ ömrü tanımı kullanarak sensör yerleri, etkinlik çizelgesi, veri yollarını ve ana alıcı hareketliliği konularını birleştiren matematiksel modeli içermektedir. Bölüm 4, Bölüm 3'te verilen matematiksel modelin uygun çözümünü hesaplayan sezgisel yöntemi tanıtmaktadır. Bölüm 5'te test problemleri kullanılarak sezgisel yöntemin verimliliği ve doğruluğu gösterilmektedir. Bölüm 6'da ise çalışmanın sonuç kısmı yer almaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Aşağıda VRP, EÇP, KP, ARP tasarım konularını ve alternatif ömür tanımlarını ele alan literatürde var olan çalışmaların bir özeti sunulmaktadır. Özellikle KTDP kullanarak KSA tasarımı yapan çalışmalara odaklanılmakta ve çalışmalarda göze alınan ağ ömrü tanımına özellikle değinilmeye çalışılmaktadır. Bunun yanı sıra çalışmalardaki KTDP modellerinin bütünleşik olup olmadığı, ya da ne kadar bütünleşik olduğu incelenmekte ve modeller için geliştirilen sezgisel yöntemlere de değinilmektedir.

Gandham *et al.* (2003), çalışmasında önerdiği KTDP modeli ile ömrü sabit zaman aralıklarına bölmüş ve her bir zaman aralığında hareketli ana alıcının yerini tespit etmeye çalışmıştır. Ağın ömrü ilk sensörün ölümüne kadarki süredir ve hareketli ana alıcı ile veri ortalama kararları modele katılmıştır. Bu model, hareketli ana alıcının hesaba katıldığı ilk KTDP modelidir.

Azad and Chockalingam (2006), Gandham *et al.* (2003) çalışmasında ele alınan modeli geliştirmişler ve amaç fonksiyonunda sensörler arasında maksimum enerji tüketimini enküçüklemeye çalışmışlardır. Bu amaçla iki sezgisel yöntem önermişlerdir. Birinci sezgiselde ana alıcıları, en fazla enerjisi kalmış sensörlere komşu olarak, ikinci sezgiselde ise sensörler arasındaki en fazla ve en az enerji kullanımını en küçükleyecek şekilde yerleştirmişlerdir.

Alsalihi *et al.* (2007), yaptıkları çalışmada aynı problem ele almış ve Gandham *et al.* (2003) ve Azad and Chockalingam *et al.* (2006)'dan farklı olarak amaç fonksiyonunda minimum sensör kalan enerjisini enbüyüklemeye çalışmıştır. Bu 3 çalışmada verilen KTDP modelleri, KSA tasarımı hedefleyen ilk modellerdendir ancak doğrudan ağ ömrünü enbüyüklemek yerine enerji optimizasyonuna odaklanmışlardır. Ayrıca 3 modelde de her bir periyot birbirinden bağımsız ele alınmıştır.

Luo and Hubaux (2005), bahsedilen bu üç çalışmanın aksine önerdiği KTDP modeli ile, optimum ana alıcı ve veri yollarının birden çok periyotta aynı anda bulunmasını sağlayarak literatürdeki eksikliği tamamlamışlardır. Ancak yapılan bu çalışmaların tamamında ömür, ilk sensörün ölümüne kadarki zaman olarak ele alınmıştır. Xia and Shihada (2015) ise çalışmalarında ağ boyunca veri iletim gecikmesi ile birlikte enerjisi kritik olan sensörlerin enerji tüketimini minimize etmeye çalışmışlardır. Bu beş çalışma matematiksel programlama modelleri sunmakla birlikte, KSA ömrünün doğrudan enbüyüklenmesi yerine sensörlerin enerji kullanım özelliklerine odaklanmaktadır.

Wang *et al.* (2005), çalışmasında doğrudan ağ ömrünü en büyükmeyi hedeflemiş ve bir Doğrusal Program (DP) modelini oluşturmuşlardır. Bu modelde, sensör yerlerinin bilindiği ve verilerin sensörlerden ana alıcılara en kısa yollar üzerinden gönderildiği varsayılır. Ömür ilk sensörün ölümüne kadarki süredir ve her bir sensör için kullanılan enerjinin pil enerjisinden fazla olamayacağı yönünde bir kısıt vardır. Hareketli ana alıcıların, dolaştığı noktalar üzerinde ne kadar zaman kalacağı belirlenmeye çalışılmış ve ana alıcının hareketli olmasının ağ ömrünün üzerindeki olumlu etkisi gösterilmiştir. Ancak bu çalışmada ana alıcıların dolaştığı noktaların sırası belirlenmemiştir.

Basagni *et al.* (2008), ana alıcıların dolaştığı noktalar ve bu noktalar üzerindeki ziyaret sürelerini değil, bu noktaların sırasını da belirlemek üzere Wang *et al.* (2005)'un modelini geliştirerek yeni bir KTDP modeli önermişlerdir. Bu çalışmada ele alınan ağ ömrü, ilk sensörün ömrünün bittiği ana kadar geçen süre olarak varsayılmış ve ana alıcı rotalaması, sunulan modellerin karar değişkeni olarak tanımlanmıştır. Basagni *et al.* (2011) ise bu modele çoklu hareketli ana alıcı özelliğini eklemiştir.

Diğer taraftan, birçok çalışmada, veri rotalama problemi de KSA modeline katılmıştır. Papadimitriou and Georgiadis *et al.* (2005), bu çalışmaların ilklerindendir. Önce ana alıcı ve veri rotalama kararlarını bütünleştiren doğrusal olmayan bir model önermişler ve ardından basit bir değişken dönüştürme işlemi uygulayarak önerdikleri modeli doğrusal hale getirmişlerdir. Ortaya çıkan model Wang *et al.* (2005)'un çalışmasında verilen modelin bir çeşitlemesidir, ancak veriler, optimal rotalar üzerinden gönderildiği

için daha etkili bir modeldir. Gatzianas and Georgiadis (2008), Papadimitriou and Georgiadis (2005) çalışmasında önerilen model için verimli dağıtık bir çözüm yöntemi önermiştir. Önerdikleri çözüm yöntemi, Madan ve Lall (2006) çalışmasında sabit ana alıcılı model için geliştirilen, Lagrange çözümlemesi ve altgradyan optimizasyonu tabanlı sezgisel çözüm yönteminin, hareketli ana alıcılı modele uyarlanmasıyla oluşturulmuştur.

Yun and Xia (2010), Papadimitriou and Georgiadis (2005) ve Gatzianas and Georgiadis (2008)'ın çalışmalarından esinlenerek oluşturdukları modeli sunmuşlardır. Bu çalışmada sensörlerin, ana alıcı yakına gelene kadar topladıkları bilgileri biriktirebildiklerini ve sensörlerin ancak ana alıcı yakına geldikten sonra biriken bilgiyi aktardıkları varsayılmıştır. Bu şekilde oluşturulan model ancak gecikme toleranslı KSA uygulamaları için geçerli olabilecektir. Yun *et al.* (2010) ve Behdani *et al.* (2012), Yun and Xia (2010)'nın çalışmasında sunulan model için çözüm yöntemleri önermişlerdir. Önerdikleri her iki çözüm yöntemi de KTDP'yi çözümleyen dağıtık yapıya sahip sezgisellerdir. Fakat Behdani *et al.* (2012) çalışmasında önerilen sezgisel yöntem daha az süreye ihtiyaç duymaktadır.

Benzer modeller Zhao and Yang (2012) ve Rault *et al.* (2013) tarafından da önerilmiştir. Sunulan modellerde sensörlerin ana alıcı yakına gelinceye kadar bilgi depolayabildiği, dolayısıyla KSA uygulamasının gecikmeleri tolere edebildiği varsayılmıştır. Her iki çalışmada da bu varsayımların ağ ömrünü olumlu yönde etkilediği gösterilmiş ve değişik sezgisel çözüm yöntemleri önerilmiştir. Bahsedilen bu sekiz çalışmada sunulan bütün modeller, optimal veri rotalamasını, hareketli ana alıcı rotalamasıyla beraber ele almışlardır. Fakat ağ ömrü, ilk sensörün öldüğü ana kadar geçen zaman olarak tanımlanmıştır.

Diğer taraftan Liang *et al.* (2010) ilk defa ana alıcıyı enerjisi sınırlı, petrol ya da elektrikle çalışan bir araç olarak ele almıştır. Basagni *et al.* (2008)'un çalışmasında önerilen modele benzer bir KTDP sunulmuş ve ana alıcının toplam seyahat uzunluğu bir kısıtla sınırlandırılmıştır. Keskin *et al.* (2011), ana alıcının sınırlı yapısını yansıtan başka

bir KTDP modeli geliştirmiştir. Modelde ana alıcının seyahat süresi ve bu seyahat süresinde biriktirilen bilgiler hesaba katılmıştır. Bu iki çalışmada da bilgi akışının en kısa yol üzerinden sağlandığı varsayılmıştır. Çözüm yöntemi olarak birbirinin sonucunu iyileştiren iki sezgisel yöntem önerilmiştir. Bilgi akışının da optimize edildiğı bir başka benzer çalışma Behdani *et al.* (2013) tarafından ele alınmıştır. Bender'in ayrıştırma yöntemine dayanan bir sezgisel, çözüm yöntemi olarak önerilmiştir.

Verilerin, optimal rotalar üzerinden gönderildiğı bir başka çalışma Luo and Hubaux (2010) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma veri rotalamanın da karar değişkeni olduğı çoklu hareketli ana alıcı içeren ilk çalışma olması bakımından önemlidir. Bu çalışmaların tamamında ömür, ilk sensörün pil enerjisinin tükendiğı ana kadar geçen zaman olarak alınmıştır. Basagni *et al.* (2014) çalışmasında ise ARP ve VRP birleştirerek KSA'nın ilginç bir su altı uygulamasını ele almıştır.

Literatürde çok az çalışmada ikiden fazla karar değişkenini beraber ele alan bütünleşik modeller önerilmiştir. Bu çalışmalardan Güney *et al.* (2010)'da sensör yerlerinin belli olduğı varsayımıyla ana alıcı yerleştirme ve veri rotalama problemi üzerinde durmuşlardır. Lagrange gevşetme yöntemiyle KTDP modellerini çözümlemişler ve sezgisel üretmişlerdir. Güney *et al.* (2012)'de ise eski çalışmaları Güney *et al.* (2010)'u, sensör yerleştirme problemini de bütünleştirecek şekilde geliştirmişlerdir. Tabu arama sezgiseli çözüm yöntemi olarak önerilmiştir. Bu iki çalışmada da ağ ömrü şimdiye kadar olduğı şekilde ilk sensörün ölümüne kadarki zaman olarak tanımlanmıştır.

Türkoğulları *et al.* (2010a), Güney *et al.* (2012) çalışmasına benzer olmakla beraber ana alıcı yerleri sabit kabul edilerek KP, VRP'nin yanına EÇP de modele katılmıştır. Bu çalışmada ağ ömrü, ilk gözetim kaybının olduğı ana kadarki geçen süre olarak tanımlanmıştır ve ilk çözüm yöntemi olarak Lagrange sezgiseli geliştirilmiştir. Daha sonra ilk aşamada sensörlerin yerlerinin ve etkinlik çizelgelerinin belirlendiğı, ikinci aşamada ise verilen sensör yerleri ve etkinlik çizelgeleri için ana alıcı yerleri ile veri akışlarının hesaplandığı iki aşamalı metodu önermişlerdir. Türkoğulları *et al.* (2010b) ve

Türkoğulları *et al.* (2010c)'de ise orijinal modeli yeniden düzenlemişlerdir ve çözüm yöntemi olarak da kolon üretme tekniği ve Tabu arama sezgiselini kullanmışlardır.

Castaño *et al.* (2015) çalışmasında sensörlerin mümkün olan aktif sensör setini bulmak için kolon üretme sezgiselini uygulamışlardır ve KP, EÇP ve VRP'yi birleştiren KTDP modeliyle ağ ömrünü maksimize etmeye çalışmışlardır. Keskin *et al.* (2014), sundukları modelde 4 tasarım konusu KP, EÇP, VRP, ARP'yi bütünleştirmiş ve pratik iki sezgisel yöntem önermişlerdir. Önerdikleri çözüm yöntemlerinin de ticari çözücü Gurobiden (Gurobi Optimizasyon, 2017) daha üstün bir performans sağladığını göstermişlerdir.

Keskin *et al.* (2015), statik ana alıcılar içeren bir model için Lagrange sezgiseli ile tavlama benzetimini birleştiren hibrid bir yöntem sunmuşlardır. Keskin *et al.* (2016) çalışmasında KSA tasarım konularının entegrasyonunu kademeli olarak arttırmış ve bu tasarım konularının bütünleşmesinin ağ ömrü üzerindeki etkilerini analiz etmek için dört adet KTDP modeli sunmuşlardır. Son olarak Keskin (2017) çalışmasında ise dört tasarım konusu olan KP, EÇP, ARP ve VRP'yi bütünleşik olarak ele almış, KTDP modeli için kolon üretme ve Lagrange gevşetme mekanizmalarına dayanan sezgisel bir yöntem önermiştir. Bahsedilen bu çalışmalarda ömür, ilk gözetim kaybının olduğu ana kadar geçen süredir.

Literatürde daha gerçekçi bir ömür tanımının KTDP çerçevesinde ele alındığı tek bir çalışma vardır. Bu çalışma Gentili and Raiconi (2011), sadece yerleri bilinen sensörlerin çizelgeleme problemini ele almış ve ağ ömrünü gözetimin belirli bir yüzdesinin kaybedildiği ana kadarki geçen süre olarak tanımlamıştır.

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bütün karar değişkenlerini bütünleştiren, gerçekçi ağ ömür tanımına dayanan yeni bir KTDP modeli geliştirilmiştir ve önerilen çözüm yöntemiyle literatüre katkıda bulunulmaya çalışılmıştır.

3. MATERİYAL ve METOD

Bu bölümde ilk olarak tamsayılı programlama ve karma tamsayılı doğrusal programlama açıklanmıştır. Ardından formülasyonda kullanılan kümeler, parametreler, değişkenler ve KTDP modelinin formülasyonu verilerek modelle ilgili açıklamalar yapılmıştır.

3.1. Tamsayılı ve Karma Tamsayılı Programlama

Pratikte çoğu uygulama problemlerinin karar değişkenlerinin (araç gereçler, makineler, takım tezgâhları, otomobil üretim miktarları gibi) tamsayılı olması gerekir. Çözüm değerlerinin tamsayılı olması istenen bu tip problemler Tamsayılı Doğrusal Programlama Problemi olarak adlandırılır. Tam Sayılı Doğrusal Programlamanın, Doğrusal Programlamadan farkı karar değişkenlerinin sıfıra eşit ve sıfırdan büyük tamsayı değeri almalarını sağlayacak olan bir kısıtın eklenmesidir.

Değişkenlerin tamamı veya bir kısmı tamsayılı olan DP problemleride olabilmektedir. Eğer problemde, değişkenlerin bir kısmının tamsayı olması gerekirken diğer değişkenlerin sürekli değerler alması gerekiyorsa bu tür problemler karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak isimlendirilir. Uygulamalarda karşılaşılan bir başka durum ise “evet” veya “hayır” gibi iki seçenekli kararların olmasıdır. Yani karar değişkenleri 0 ve 1 değerleri ile gösterilir. Bu değişkenlere ikili değişkenler veya 0-1 değişkenleri denir.

Tüm değişkenlerin 0 veya 1’e eşit olması istenildiği takdirde bu tür problemler karşımıza 0-1 tamsayılı programlama problemi ya da ikili tamsayılı programlama problemi olarak çıkmaktadır. Değişkenlerin bir kısmı sürekli değerler alırken diğer kısmının ise 0 veya 1 değerlerini aldığı tamsayılı programlama problemi ise 0-1 karma tamsayılı programlama problemi olarak adlandırılmaktadır (Öztürk 2016).

Tamsayılı doğrusal programlama modellerinin birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Bunlar; Malzeme kullanım, sırt çantası problemleri, yap-yapma kararları, Mürettebat planlama, gezgin satıcı problemleri, sermaye bütçeleme işçileri makinalara atama problemleri, kritik yol problemleri (Çevik 2006).

Bu çalışmada kullanılan model, değişkenlerin bir kısmının değeri tamsayı, bir kısmının değeri ise sürekli olduğundan dolayı karma tamsayılı doğrusal programlama modelidir.

3.2. Küme, Parametre ve Karar Değişkenleri

Sensör alanında kapsanacak noktaların kümesi K ile temsil edilmektedir. Sensörlerin muhtemel yerlerinin kümesi ve muhtemel ana alıcı yerleri olan ana alıcı ziyaret noktalarının kümesi sırasıyla I ve L olarak gösterilmektedir. Birden fazla sensör tipi olduğunu varsayılmaktadır ve sensör tipleri kümesi R ile ifade edilmektedir. $i \in I$ sensör yerine yerleştirilen, $r \in R$ tipi sensör, sensör (i, r) olarak adlandırılmaktadır. Sensör (i, r) tarafından toplanan veriler, sensör (i, r) 'nin iletim aralığında bir ana alıcı varsa bu ana alıcıya iletilebilir veya iletim aralığında bulunan komşu sensörler üzerinden ana alıcıların birine iletelebilmektedir. Sensör (i, r) 'nin iletim aralığında bulunan komşu sensörün kümesi ve bilgi gönderebildiği ana alıcı noktalarının kümesi sırasıyla N_{ir} ve NA_{ir} ile temsil edilmektedir. Benzer şekilde sensör (i, r) algılama aralığında bulunan kapsama noktalarının kümesi NG_{ir} ile gösterilmektedir. Son olarak periyotların kümesi T ile gösterilmektedir.

Parametreler çoğunlukla yukarıda açıklanan kümelere bağlıdır. Örneğin; d_k , $k \in K$ kapsama noktasının kapsama ihtiyaç miktarını ifade eder. Bu sebeple k noktasını algılayabilen aktif sensörlerin sayısı ağ ömrü boyunca herhangi bir zamanda en az d_k kadar olmalıdır. e_r , r tipi sensörün başlangıç enerjisini, h_r ise birim zaman başına r tipi sensör tarafından algılanan verinin miktarını temsil etmektedir.

c^r alınan bir bit veri başına sensör tarafından harcanan enerji miktarını temsil ederken, c^s ise birim zaman başına aktif sensörler tarafından algılama ve işleme için harcanan

enerjiyi temsil etmektedir. Benzer şekilde c_{ij}^t , i noktasında bulunan sensörün j noktasında bulunan sensöre veya ana alıcıya bir bit veri akışı için harcadığı enerjiyi ifade eder. f_{ir} , sensör (i, r) 'nin yerleştirilme maliyetini, α_k , ise gözlenecek olan k noktasının ömrün yüzde kaçında gözlenmemesine izin verildiğini ifade etmektedir. Son olarak, P toplam ana alıcı sayısını, B ise sensör yerleştirme için kullanılacak toplam bütçeyi göstermektedir.

Modelimizin 7 tane karar değişkeni vardır. Sürekli değişkenler x_{irjst} , y_{irlt} , w_t 'dir. w_t , t periyodunun uzunluğunu temsil eder. x_{irjst} , t periyodu boyunca sensör (i, r) 'den sensör (j, s) 'ye iletilen veri miktarını, y_{irlt} , ise t periyodu boyunca sensör (i, r) 'den l noktasında bulunan ana alıcıya olan veri akış miktarını belirtir.

Modelin ikili değişkenleri z_{lt} , β_{kt} , q_{irt} , p_{ir} ile gösterilmiştir. z_{lt} , t periyodu boyunca l noktasında ana alıcı olup olmadığını, p_{ir} ise sensör (i, r) 'nin olup olmadığını belirtir. β_{kt} , t periyodu boyunca k noktasının gözlenip gözlenmediğini belirten ikili değişkendir. Son olarak q_{irt} , t periyodu boyunca sensör (i, r) 'nin aktif olup olmadığını belirtmektedir. Kolaylık sağlaması amacıyla, küme, parametre ve değişken tanımlarının özeti Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Kümeler, parametreler ve karar değişkenleri

KÜMELER	TANIMLAR
K	Sensör alanında kapsanacak noktaların kümesi
I	Muhtemel sensör yerlerinin kümesi
L	Muhtemel ana alıcı yerlerinin kümesi
R	Sensör tiplerinin kümesi
T	Zaman dilimleri kümesi
N_{ir}	i noktasındaki r tipi sensörün komşu sensörlerinin kümesi
NA_{ir}	i noktasındaki r tipi sensörün bilgi gönderebildiği ana alıcıların kümesi
NG_{ir}	i noktasındaki r tipi sensörün kapsadığı noktaların kümesi
PARAMETRELER	TANIMLAR
B	Sensör yerleştirme bütçesi
P	Toplam ana alıcı sayısı
h_r	r tipi sensör tarafından birim zaman başına algılanan veri miktarı

Çizelge 3.1. (devam)

e_r	r tipi sensörün batarya enerjisi
d_k	k noktasını gözlemesi gereken sensör sayısı
c^r	Alınan bir bit veri başına sensör tarafından harcanan enerji
α_k	k noktasının ömrün yüzde kaçında gözlemlenmeyebileceğini belirten parametre
c^s	Birim zaman başına algılama ve işleme için harcanan enerji
c_{ij}^t	i noktasından j noktasına iletilen bir bit veri için i sensörünün harcadığı enerji
f_{ir}	i noktasındaki r tipi sensörün yerleştirme maliyeti
KARAR DEĞİŞKENLERİ	TANIMLAR
p_{ir}	i noktasında r tipi sensörün olup olmadığını belirten ikili değişken
q_{irt}	t periyodunda i noktasında r tipi sensörün aktif olup olmadığını belirten ikili değişken
w_t	t periyodunun uzunluğu
β_{kt}	t zaman diliminde k noktasının gözlenip gözlenmediğini belirten ikili değişken
z_{lt}	t periyodunda l noktasında ana alıcı olup olmadığını belirten ikili değişken
x_{irjst}	t periyodunda, i noktasında bulunan, r tipi sensörden, j noktasında bulunan, s tipi sensöre veri akış miktarı
y_{irlt}	t periyodunda, i noktasında bulunan, r tipi sensörden, l noktasında bulunan ana alıcıya veri akış miktarı

3.3. Matematiksel Model

VRP, EÇP, KP ve ARP'yi bütünleştiren ağ ömrünü gerçekçi olarak tanımlayan VEKA isimli KTDP modeli aşağıda verilmiştir.

VEKA:

$$\max \sum_{t \in T} w_t \quad (3.1)$$

Kısıtlar;

$$\begin{aligned}
\sum_{s \in R} \sum_{j: i \in N_{js}} x_{jsirt} + h_r w_t q_{irt} \\
= \sum_{l \in N_{A_{ir}}} y_{irlt} + \sum_{s \in R} \sum_{j \in N_{ir}} x_{irjst}
\end{aligned} \quad i \in I, r \in R, t \in T \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
\sum_{t \in T} \left(c^s w_t q_{irt} + c^r \sum_{s \in R} \sum_{j: i \in N_{js}} x_{jsirt} + \sum_{l \in N_{A_{ir}}} c_{il}^t y_{irlt} \right. \\
\left. + \sum_{s \in R} \sum_{j \in N_{ir}} c_{ij}^t x_{irjst} \right) \leq e_r
\end{aligned} \quad i \in I, r \in R \quad (3.3)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i: l \in N_A} y_{irlt} \leq M z_{lt} \quad l \in L, t \in T \quad (3.4)$$

$$\sum_{l \in L} z_{lt} = P \quad t \in T \quad (3.5)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i: k \in N_{G_{ir}}} q_{irt} \geq d_k \beta_{kt} \quad k \in K, t \in T \quad (3.6)$$

$$\sum_{t \in T} w_t \beta_{kt} \geq \sum_{t \in T} w_t (1 - \alpha_k) \quad k \in K \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} f_{ir} p_{ir} \leq B \quad (3.8)$$

$$q_{irt} \leq p_{ir} \quad i \in I, r \in R, t \in T \quad (3.9)$$

$$\sum_{s \in R} \sum_{j \in N_{ir}} x_{irjst} \leq M q_{irt} \quad i \in I, r \in R, t \in T \quad (3.10)$$

$$\sum_{s \in R} \sum_{j: i \in N_{js}} x_{jsirt} \leq M q_{irt} \quad i \in I, r \in R, t \in T \quad (3.11)$$

$$w_t, y_{irlt}, x_{irjst}, \alpha_k \geq 0 \quad i, j \in I, r, s \in R, l \in L, k \in K, t \in T \quad (3.12)$$

$$\beta_{kt}, z_{lt}, p_{ir}, q_{irt} \in \{0, 1\} \quad i \in I, r \in R, l \in L, k \in K, t \in T \quad (3.13)$$

Ömür, amaç fonksiyonunda (3.1) periyot uzunlukları toplamı olarak ele alınır ve enbüyüklenir. Kısıt (3.2) veri akış kısıtıdır ve bu kısıt her $t \in T$ periyot için, sensör (i, r) tarafından üretilen ve sensör (i, r) 'ye dışarıdan gelen verilerin toplam miktarının, sensör (i, r) tarafından komşu sensörlere veya ana alıcılara gönderilen verilerin miktarına eşit olmasını sağlar. Dolayısıyla kısıt (3.2) her periyot ve her sensör için veri akış dengesini ifade eder. Kısıt (3.3) enerji kısıtı olup, her periyotta sensör (i, r) 'nin aktif veya pasif olma durumuna göre birim zaman başına aktif sensörler tarafından algılama ve işleme için harcanan enerji, komşu sensörlerden veri alırken harcanan enerji ve komşu sensörlere veya ana alıcılara veri gönderilirken harcanan enerjilerin toplamının, sensörün pil enerjisinden küçük eşit olmasını temin eder. Kısıt (3.4), t periyodunda l noktasına yerleşen ana alıcı olmaması durumunda o noktaya veri iletimini önlemektedir. Kısıt (3.5) her $t \in T$ için yerleşen toplam ana alıcı sayısının P 'e eşit olmasını sağlar. Yani tüm ana alıcıların her periyotta yerleştirildiğinden emin olmamızı temin eder. Kısıt (3.6) her $t \in T$ periyodunda her $k \in K$ noktası için, o noktanın ilgili periyotta gözlenip gözlenmediğine bağlı olarak, noktayı gözlemleyen aktif sensörlerin sayısının en az kapsam talebi d_k (ya da $\beta_{kt} = 0$ ise 0) kadar olması gerektiğini belirtir. Bu kısıt ile herhangi bir k noktası için kapsama ihtiyaçlarının tatmin edilmesini sağlamaktayız. Kısıt (3.7)'de kullanıcının belirlediği bir hassasiyet seviyesi α_k ile herhangi bir k noktasının gözlemlendiği toplam sürenin ömrün en az $100(1 - \alpha_k)$ kadarı olması şartı koşulmaktadır. Kısıt (3.8) toplam yerleştirme maliyeti için bütçe kısıtlamasını ortaya koymaktadır. Kısıt (3.9) sensör (i, r) 'nin ancak yerleştirilmiş ise aktif olabileceğini belirtir. Kısıt (3.10) ve (3.11) t periyodu boyunca, sensör (i, r) aktif olmadığı takdirde, sensöre veri girişi ve sensörden veri çıkışı olamayacağını ifade eder. Son olarak Kısıt (3.12) ve (3.13) sırasıyla sürekli değişkenlerin pozitif olması gerektiğini ve ikili değişkenlerin 0 ya da 1 değeri alması gerektiğini ifade eder.

Kısıt (3.2)'de görüldüğü gibi t periyodunda sensör (i, r) tarafından üretilen verinin hesaplanması ve kısıt (3.3)'te ise sensör (i, r) tarafından verinin algılanması ve işlenmesi için kullanılan enerjinin hesaplanması için sensör (i, r) 'nin aktif zaman uzunluğu dikkate alınmıştır. Bu aktif zaman $w_t q_{irt}$ olarak ele alınır ve eğer sensör (i, r) , t zaman dilimi boyunca pasif halde ise $q_{irt} = 0$ olacağından dolayı aktif zaman

uzunluğu da sifıra eşit olacaktır. Eğer sensör (i, r) t zaman diliminde aktif ise $q_{irt} = 1$ 'dir ve aktif zaman uzunluğu da periyot uzunluğu w_t 'ye eşit olacaktır. Ancak tanım olarak $w_t q_{irt}$, ikili değişken q_{irt} ve sürekli değişken w_t 'nin çarpımıdır. Bu durum modeli doğrusal olmayan hale getirmektedir. Çarpım halinde bulunan bu terimi doğrusallaştırmak için t periyodunda sensör (i, r) 'nin aktif zamanından sorumlu olan yeni bir sürekli değişken a_{irt} tanımlanmaktadır yani $a_{irt} = w_t q_{irt}$ 'dir. Ayrıca modele a_{irt} sürekli değişkenin $w_t q_{irt}$ çarpımına eşit olmasını zorlayan ve modeli doğrusal hale getiren 4 kısıt daha eklenmektedir. Bu kısıtlar aşağıda verilmiştir.

$$a_{irt} \leq w_t \quad i \in S, r \in R, t \in T \quad (3.14)$$

$$a_{irt} \leq M q_{irt} \quad i \in S, r \in R, t \in T \quad (3.15)$$

$$a_{irt} \geq w_t - M(1 - q_{irt}) \quad i \in S, r \in R, t \in T \quad (3.16)$$

$$a_{irt} \geq 0 \quad i \in I, r \in R, t \in T \quad (3.17)$$

Kısıt (3.14) ve (3.16)'dan anlaşılacağı gibi eğer q_{irt} , 1 değerini alırsa a_{irt} değişkeninin w_t değişkenine eşit olması sağlanır. Benzer şekilde kısıt (3.15) ve (3.17) de q_{irt} 'nin 0 olması durumunda a_{irt} değişkeninin 0 olmasını sağlamaktadır.

Benzer şekilde kısıt (3.7)'de k noktasının ömrün belli bir oranında gözlenmesi için o noktanın gözlem zamanı dikkate alınmıştır. Bu gözlem zamanı $w_t \beta_{kt}$ olarak ele alınır ve t zaman dilimi boyunca gözlem yapılmıyorsa $\beta_{kt} = 0$ olacağından gözlem zaman uzunluğu da sifıra eşit olacaktır. Eğer t zaman diliminde gözlem yapılıyorsa $\beta_{kt} = 1$, gözlem zamanı uzunluğu, periyot uzunluğu w_t 'ye eşit olacaktır. Ancak $w_t \beta_{kt}$, ikili değişken β_{kt} ve sürekli değişken w_t 'nin çarpımıdır. Bu terimi doğrusallaştırmak için t periyodunda gözlem zamanından sorumlu olan yeni bir sürekli değişken b_{kt} tanımlanmaktadır; yani $b_{kt} = w_t \beta_{kt}$ 'dir. Ayrıca modele, b_{kt} sürekli değişkeninin $w_t \beta_{kt}$

çarpımına eşit olmasına zorlayan ve modeli doğrusal hale getiren 4 kısıt daha eklenmektedir. Bu kısıtlar aşağıda verilmiştir.

$$b_{kt} \leq w_t \quad k \in K, t \in T \quad (3.18)$$

$$b_{kt} \leq M\beta_{kt} \quad k \in K, t \in T \quad (3.19)$$

$$b_{kt} \geq w_t - M(1 - \beta_{kt}) \quad k \in K, t \in T \quad (3.20)$$

$$b_{kt} \geq 0 \quad k \in K, t \in T \quad (3.21)$$

Kısıt (3.18) ve (3.20)'den anlaşılacağı gibi eğer β_{kt} , 1 değerini alırsa b_{kt} değişkeninin w_t değişkenine eşit olması sağlanır. Benzer şekilde kısıt (3.19) ve (3.21) β_{kt} 'nin 0 olması durumunda b_{kt} değişkeninin 0 olmasını sağlamaktadır.

3.4. Çözüm Metodu

Gurobi gibi ticari KTDP çözücüler, zaman sınırlamaları nedeniyle gerçek boyutta VEKA örneklerini çözmekte başarısız olmaktadır. Bu çalışmada makul hesaplama zamanlarında VEKA örneklerinin iyi çözümlerini bulmak için Periyot Üretim Sezgiseli olarak adlandırılan pratik bir sezgisel yöntem önerilmiştir.

3.4.1. Periyot Üretim Sezgiseli

Gerçek boyutlu VEKA örneklerinin çözülmesindeki zorluk, çoğunlukla modelde çok sayıda ikili karar değişkeni bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu gözlem, karar değişkenlerin bir kısmının değerinin, geriye kalan modelde bir olumsuzluğa yol açmadan, sabitlenerek değişken sayısının azaltılmasını akla getirmektedir. Modelin

nispeten daha az sayıda karar değişkeni varsa optimale yakın çözüm daha az çaba harcanarak elde edilecektir. Üstelik elde edilen çözüm, Gurobi'ye, daha iyi bir çözüm bulunabilmesi için orjinal modelin başlangıç uygun çözümü olarak girilebilmektedir.

VEKA modelinin ikili değişkenlerinin sayısını azaltmak için toplam periyot sayısı T 'ye odaklanılmaktadır. İkili z_{lt} (hareketli ana alıcıların ziyaret yerleri), q_{irt} (sensörlerin etkinlik çizelgeleri) ve β_{kt} (sensörlerin periyotlarda gözlemlemesi) ve sürekli w_t (periyot uzunlukları), y_{irlt} (sensörler ve ana alıcılar arasındaki veri akışı) ve x_{irjst} (sensörler arası veri akışı) karar değişkenlerini gözlemlediğimizde periyot sayısındaki azalmanın, bu değişkenlerin sayısında kayda değer bir şekilde düşüş meydana getireceği görülmektedir. Bunun nedeni ise bu karar değişkenlerinde periyot indeksinin bulunmasıdır.

Bu sebepten ötürü toplam periyotların sayısı T , modelimizde önemli bir parametredir. T 'nin 1 veya 2 gibi çok düşük bir değere düşürülmesi durumunda VEKA gösteriminin çözümü çok daha kolay bir hale gelecektir. Bununla birlikte, ortaya çıkan çözümün kalitesi nispeten kötü olabilir. Diğer yandan, T 'yi yüksek değerlere getirmek gösterimin çözümünü zorlaştırmaktadır. Periyot sayısı bir birim artırıldıkça ağ ömrü uzar ama marjinal ömür uzama miktarı periyot sayısı artıkça azalarak nihayet sıfıra düşer.

PÜS ile maksimum ağ ömrünü sağlayan mümkün olan en düşük periyot sayısı (T^*) belirlenmeye çalışılmaktadır. Periyot sayısını temsil eden yeni bir parametre η tanımlanmakta ve değeri 3 olarak atanmaktadır. Bu yeni parametre η , periyot sayısını sınırlandırmaktadır. Böylece tüm sürekli değişkenler w_t , a_{irt} , b_{kt} , x_{irjst} ve y_{irlt} 'nin, η 'ya eşit veya daha küçük periyotlar için ($t \leq \eta$) sıfırdan farklı değerler almasına izin verilir. Diğer bir deyişle tüm w_t , a_{irt} , b_{kt} , x_{irjst} ve y_{irlt} değişkenleri η 'dan büyük periyotlar için ($t > \eta$) sıfıra sabitlenir. Diğer yandan, $t > \eta$ olan periyotlara karşılık gelen ikili değişkenler z_{lt} , β_{kt} ve q_{irt} 'nin değerleri, η . periyotta aldığı değerlere eşitlenir, yani $t > \eta$ için $z_{lt} = z_{l\eta}$, $q_{irt} = q_{ir\eta}$ ve $\beta_{kt} = \beta_{k\eta}$ kısıtlamaları modele eklenir.

Değişkenler sabitlendikten sonra, değişken sayısının oldukça az olduğu bir model elde edilmektedir. $t \leq \eta$ periyotları için z_{lt} , q_{irt} , β_{kt} , w_t , a_{irt} , b_{kt} , x_{irjst} , y_{irlt} değişkenleri ve sadece sensör yerleri kararı ile ilişkili p_{ir} değişkenlerine sahip bu model kısıtlanmış model olarak adlandırılmaktadır. Kısıtlanmış modelin nispeten daha kolay çözülmesi beklenmektedir. Özellikle küçük η değerleri için ikili değişkenlerin sayısı nispeten daha az olacağından, kısıtlanmış modelin çözülmesi için Gurobi çalıştırılır ve çözücü optimal ya da optimale yakın çözümleri kısa zamanda bulabilir. Ayrıca kısıtlanmış model için bulunan uygun çözüm asıl model için de uygun çözümdür. Belirli bir η değerine karşılık gelen kısıtlanmış model için optimal veya optimale yakın çözümler bulunduktan sonra η değeri 1 artırılmaktadır ve çözücü yeni η değeri için tekrar çalıştırılmaktadır. η değerinin bir birim artırılması, çok sayıda karar değişkenine izin verilmesi demektir ve bu durum çözücü için biraz daha esnek bir optimizasyon çerçevesi sağlamaktadır. Bu nedenle parametrenin her artışı sonrasında amaç fonksiyonu değerinde iyileşme beklenir, yani η değeri artıktıkça ağ ömrünün de artması beklenmektedir. Bu yaklaşım ilk bakışta açgözlü görünebilir fakat kısıtlanmış modelin sadece son periyoda karşılık gelen değişkenler için değil (yani $z_{l\eta}$, $q_{ir\eta}$, $\beta_{k\eta}$, w_η , a_{irt} , b_{kt} , $x_{irjs\eta}$, $y_{irl\eta}$) ilk periyottan η . periyoda kadar olan tüm ilgili değişkenler için (yani z_{lt} , q_{irt} , β_{kt} , a_{irt} , b_{kt} , x_{irjst} , y_{irlt} $t \leq \eta$ için) çalıştırılacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle, her yinelemede, kısıtlanmış modelde yer alan değişkenlerin genişliği, dönem sayısındaki birim artışın bir sonucu olarak artar ve kısıtlanmış model, yalnızca son periyot için değil aynı zamanda önceki periyotlar için de çalıştırılır. Büyük η değerleri için ağ ömründe iyileşme beklense de, kısıtlanmış modelin çözümü, η artıktıkça ikili değişkenlerin sayısı artacağından dolayı zorlaşmaktadır. Beri taraftan bir önceki kısıtlanmış modelin çözümünü yeni kısıtlanmış modelin başlangıç uygun çözümü olarak kullanılmak ve bu yol yeni kısıtlanmış modelin çözümünü hızlandırabilmek mümkündür. Üstelik, yeni kısıtlanmış modelin ağ ömründeki iyileşme bir önceki optimal çözümün en büyük periyot uzunluğunu aşmamaktadır. Bu fikir aşağıda verilen önermede ifade edilmektedir (Keskin *et al.* 2014).

Önerme 1. η ve $\eta + 1$ parametre değerleri için kısıtlanmış modelin optimal amaç fonksiyonu değerleri sırasıyla $\delta^{(\eta)}$ ve $\delta^{(\eta+1)}$, olsun. η . kısıtlanmış modelin optimal

çözümü için t periyodunun uzunluğu $w_t^{(\eta)}$ ile temsil edilsin ve η ve $\eta + 1$. kısıtlanmış model ile ilgili periyot uzunluklarının genelliğini kaybetmeden $w_1^{(\eta)} \leq w_2^{(\eta)} \leq \dots \leq w_\eta^{(\eta)}$ şeklinde azalmayan sırada sıralandığı varsayılın ve $w_{\eta+1}^{(\eta)} = \dots = w_\eta^{(\eta)} = 0$ olsun. Benzer şekilde, $w_1^{(\eta+1)} \leq w_2^{(\eta+1)} \leq \dots \leq w_\eta^{(\eta+1)}$ ve $w_{\eta+2}^{(\eta+1)} = \dots = w_t^{(\eta+1)} = 0$ 'dır. Bu durumda $\delta^{(\eta+1)} \leq \delta^{(\eta)} + w_\eta^{(\eta)}$ sağlanır.

Kanıt. İlk olarak $\delta^{(\eta)}$, η . periyot için en büyük ömrü temsil ettiğinden $\delta^{(\eta)} = \sum_{t=1}^{\eta} w_t^{(\eta)} \geq \sum_{t=2}^{\eta+1} w_t^{(\eta+1)}$ sağlanır. İddia $w_\eta^{(\eta)} \geq w_\eta^{(\eta+1)}$ sağlanır. Farzedelim ki $w_\eta^{(\eta)} < w_1^{(\eta+1)}$ olsun. Bu durumda $w_1^{(\eta)} \leq w_2^{(\eta)} \leq \dots \leq w_\eta^{(\eta)} < w_1^{(\eta+1)} \leq w_2^{(\eta+1)} \leq \dots \leq w_\eta^{(\eta+1)}$ ve $\sum_{t=1}^{\eta} w_t^{(\eta)} < \sum_{t=2}^{\eta+1} w_t^{(\eta+1)}$ olur. Bu bir çelişki olduğundan yukarıdaki iddia kabul edilir. Dolayısıyla $\sum_{t=2}^{\eta+1} w_t^{(\eta+1)} \leq \sum_{t=1}^{\eta} w_t^{(\eta)}$ ve $w_1^{(\eta+1)} \leq w_\eta^{(\eta)}$ eşitsizliklerin toplanmasıyla sağlanır.

Önerme 1, geçerli kısıtlanmış modele karşılık gelen amaç fonksiyonu değeri ve optimal çözümden yararlanarak bir sonraki kısıtlanmış modelin optimal amaç fonksiyonu değerine bir üst sınır belirlemek için bir araç sağlar. Bu nedenle, nispeten küçük aralıklarla bir sonraki kısıtlanmış modelin optimal amaç fonksiyonu değeri kapsandığından, bu değeri bulmak kolaylaşır. Bununla birlikte η parametresinin büyük değerleri için makul hesaplama zamanlarında uygun çözüm bulmak çok zordur. Aşırı hesaplama zamanı harcayarak optimal çözümü beklemek yerine, önceden belirlenmiş kısa zaman için çözücünün çalışmasına izin verilerek iyi bir uygun çözümle yetinebiliriz.

Kullanılabilecek başka bir yaklaşım her turda Gurobi'yi çalıştırmak yerine kısıtlanmış modelin çözümü için sezgisel bir yöntem kullanmak olabilir ancak PÜS mevcut durum için verimli olduğundan dolayı buna gerek duyulmamaktadır. Optimal amaç fonksiyonu değeri için alt sınır (AS) ve üst sınır (ÜS) önceden, çözümü daha hızlı elde etmek için çözücüye verilebilir. Diğer taraftan, amaç fonksiyonunun yakınsanmasını sonuna kadar beklemek çok vakit alacağından η 'daki bir birim artışa karşılık amaç fonksiyonunda

gözlenen artış miktarının bir ψ hassasiyet derecesinin altına düştüğü ilk anda algoritmayı sonlandırmak denenmiştir. PÜS'nin adımları Algoritma 1'de özetlenmiştir. Bu çözüm yönteminde Keskin *et al.* (2014) çalışmasından yararlanılmıştır.

Algoritma 1. Periyot Üretme Sezgiseli

Başlangıç: $\eta = 3$, $Fark = 100$ olsun ve ψ değerini pozitif küçük bir değere ata

While ($Fark > \psi$) yap

if ($\eta > 3$)

$AS = \delta^{(\eta-1)}$ ve $\ddot{U}S = \delta^{(\eta-1)} + w_{\eta-1}^{(\eta-1)}$ olarak belirle

Çözücü ile η . sınırlandırılmış modeli küçük bir zaman için çalıştır, çözüm sürecini hızlandırmak için AS ve $\ddot{U}S$ değerlerini kullan. ($\delta^{(\eta)}$ çözücü tarafından elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değeri olsun.)

$Fark = \delta^{(\eta)} - \delta^{(\eta-1)}$, $\eta \leftarrow \eta + 1$

End While

$T^* \leftarrow \eta$

Amaç fonksiyonuna tekabül eden değeri ve son çözümü raporla.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde ilk olarak VEKA formülasyonunda kullanılan parametrelerin nasıl oluşturulduğu açıklanmıştır. Daha sonra oluşturulan test örnekleri, Gurobi çözücüsü kullanılarak çözülmüş ve PÜS'ün üstünlüğü gösterilmiştir.

4.1.1. Test problemi oluşturma ve parametre seçimi

Sırasıyla 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175, 200, 300, muhtemel sensör yerlerinden oluşan 14 farklı problem seti, sayısal karşılaştırma maksadı ile rastgele üretilmiştir. Setlerin her biri beş farklı örneği içermektedir.

Zaman dilimlerinin kümesinin boyutu $|T|$ problem örneklerimizde 25 olarak alınmaktadır. Muhtemel sensör yerlerinin ızgara yapıya sahip olduğu varsayılmaktadır. Izgaranın boyutları birbirine olabildiğince yakın tamsayılar olarak seçilmektedir. Örneğin, 40 ve 90 için ızgara boyutları 5×8 ve 9×10 'dur. Komşu ızgaralar arasındaki mesafenin 15 metre olduğu kabul edilmektedir. Muhtemel sensör yerleri için oluşturulan ızgara yapısı, sensör ızgarası olarak isimlendirilmektedir. Sensör ızgarasına benzer şekilde, muhtemel ana alıcı yerlerinin de ızgara yapısına sahip olduğu varsayılmaktadır ve bu yapı ana alıcı ızgarası olarak adlandırılmaktadır. Sensör ve ana alıcı ızgaralarının ikisi de aynı sensör alanına yerleştirdiğinden iç içe geçmiş bir yapı sergilemektedir.

Muhtemel ana alıcı yerlerinin sayısı, ya muhtemel sensör yerlerinin sayısının yarısı (muhtemel sensör yerlerinin sayısı çift ise) ya da muhtemel sensör yerlerinin 5 fazlasının yarısı kadar olmalıdır (yani $|I|$ çift ise $|L| = \frac{|I|}{2}$, aksi takdirde $|L| = \frac{|I|+5}{2}$).

Örneğin, muhtemel sensör yerlerinin sayısı 150 ve 175 olduğunda muhtemel ana alıcı yerlerinin sayısı da sırasıyla 50 ve 90 olur. Ana alıcı ızgarasının şekli de aynı zamanda kareye mümkün oldukça yakın seçilir. Bu seçimin sonucunda komşu muhtemel ana alıcı yerleri arasındaki yatay ve dikey mesafeler sırasıyla $(15 \times (n_1 - 2))/(m_1 - 1)$ ve $(15 \times (n_2 - 2))/(m_2 - 1)$ ile bulunur. Burada n_1 ve n_2 sensör ızgarasının boyutlarını, m_1 ve m_2 ana alıcı ızgarasının boyutlarını göstermektedir.

Bu çalışmada sırasıyla 15 ve 22 metre boyunca algılama yapabilen, 50 ve 80 metre iletişim aralığına sahip iki tip sensör bulunduğu varsayılmaktadır. Başlangıç pil enerjileri ise sırasıyla $e_1 = 10000$ Joule ve $e_2 = 20000$ Joule olarak seçilmiştir. Her iki sensörün de birim zamanda aynı miktarda veri ürettiğini varsayılmaktadır. Bu nedenle h_r her iki tip sensör içinde 4096 bit/saat olarak seçilmiştir. Tip 1 sensörünün yerleştirme maliyeti 1 ile 10 arasında, düzgün dağılıma uygun olarak rastgele belirlenmektedir yani $f_{i1} \sim U(1, 10)$. Öte yandan, tip 2 sensörün kullanılmasının daha pahalı ve ekstra maliyet miktarının 0 ve 5 arasında düzgün dağılıma uygun olduğu varsayılmaktadır yani $f_{i2} = f_{i1} + U(0, 5)$. Toplam sensör yerleştirme bütçesi B , muhtemel sensör yerleri üzerinden sensör yerleştirme maliyetlerinin ağırlıklı toplamı olarak hesaplanmaktadır. Ağırlıklar, tüm muhtemel sensör yerleri için 0.5'dir yani $B = 0.5 \sum_{i \in I} (f_{i1} + f_{i2})$. Sensör alanı, kapsama noktaları olarak adlandırılan ayrı bir dizi nokta ile temsil edilmektedir ve kapsama noktalarının muhtemel sensör yerleri ile çakıştığı varsayılmaktadır. Kapsama noktaları farklı şekilde de temsil edilebilir. Örneğin, kapsama noktalarının dağılımı ızgara yapısına sahip olmak zorunda değildir, rasgele seçilebilir. Kapsama noktalarının belirlenmesinde seçilen yolun analizimiz üzerinde bir etkisi yoktur. Bu sebepten, sayısal deneylerimizde kapsama noktaları ve muhtemel sensör yerlerini çakışık olarak ele alınmaktayız. Kapsama noktalarının her birinde, farklı kapsama yapısına sahip olmak için bu noktaların kapsama talepleri rastgele 1 veya 2 atanmaktadır. α değerleri ise ortalamaları 0.5, 0.10, 0.20, 0.40 olacak şekilde Excel'de rastgele üretilmiştir.

Son olarak, her iki sensör tipinde enerji kullanım özelliklerinin aynı olduğunu varsayıyoruz. Heinzelman *et al.* (2000) öne sürdüğü enerji kullanım modelinde, iletimde kullanılan enerjinin verici ve alıcı sensörler arasındaki mesafenin bir fonksiyonu

olduğunu varsaymaktadır. Dolayısıyla, iletim sensörü tarafından kullanılan enerji, iletim mesafesiyle birlikte artar. İletim sırasında kullanılan toplam enerji iki ifadenin toplamıdır. İlki mesafeden bağımsız ve sabittir. İkinci ifade ise bu çalışmada varsayıldığı gibi yol kaybı indeksi 2 olduğunda iletim mesafesinin karesi ile orantılıdır. Matematiksel olarak i noktasında bulunan bir sensör tarafından j noktasında bulunan bir sensöre iletim için kullanılan enerji miktarı $c_{ij}^t = \zeta_1 + \zeta_2 d_{ij}^2$ 'e eşittir. Uzaktan bağımsız sabit enerji ζ_1 , uzaklıkla ilgili bölümün ağırlığı ζ_2 ve i ile j noktaları arasındaki öklid uzaklığı ise d_{ij} ile temsil edilmektedir. Sayısal deneylerimizde ζ_1 , 50 $\mu\text{J}/\text{bit}$ ve ζ_2 100 $\text{nJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$ olarak alınmıştır. Ayrıca bir bit veri almak için kullanılan enerji miktarının, 50 μJ olduğu kabul edilmiştir yani $c^r = 50 \mu\text{J}/\text{bit}$. Son olarak, birim zaman boyunca (örneğin, bir saat) bir birim veriyi (örneğin, bir bit) algılayan ve işleyen bir sensör tarafından harcanan enerji miktarı 50 $\text{nJ}/(\text{hour} \cdot \text{bit})$ olarak seçilmiştir yani $c^s = 50 \text{nJ}/(\text{hour} \cdot \text{bit})$. Parametre değerlerinin seçimi için Heinzelman *et al.* (2000) ve Türkoğulları *el al.* (2010a) çalışmalarından yararlanılmıştır. Kolaylık sağlaması amacıyla bu çalışmada kullanılan parametrelerin özeti Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan parametreler

ÖZELLİK	TİP 1 SENSÖR	TİP 2 SENSÖR
$ T $	25	
Algılama	15 metre	50 metre
İletişim Aralığı	22 metre	80 metre
Başlangıç enerjisi	10000 Joule	20000 Joule
h_r	4096 bit/saat	
Yerleştirme maliyeti	$f_{ir} \sim U(1, 10)$	$f_{i2} = f_{i1} + U(0, 5)$
Bütçe	$B = 0.5 \sum_{i \in I} (f_{i1} + f_{i2}).$	
d_k	1 veya 2	
α değerleri	0.05, 0.10, 0.20, 0.40	
c_{ij}^t	$\zeta_1 + \zeta_2 d_{ij}^2$	

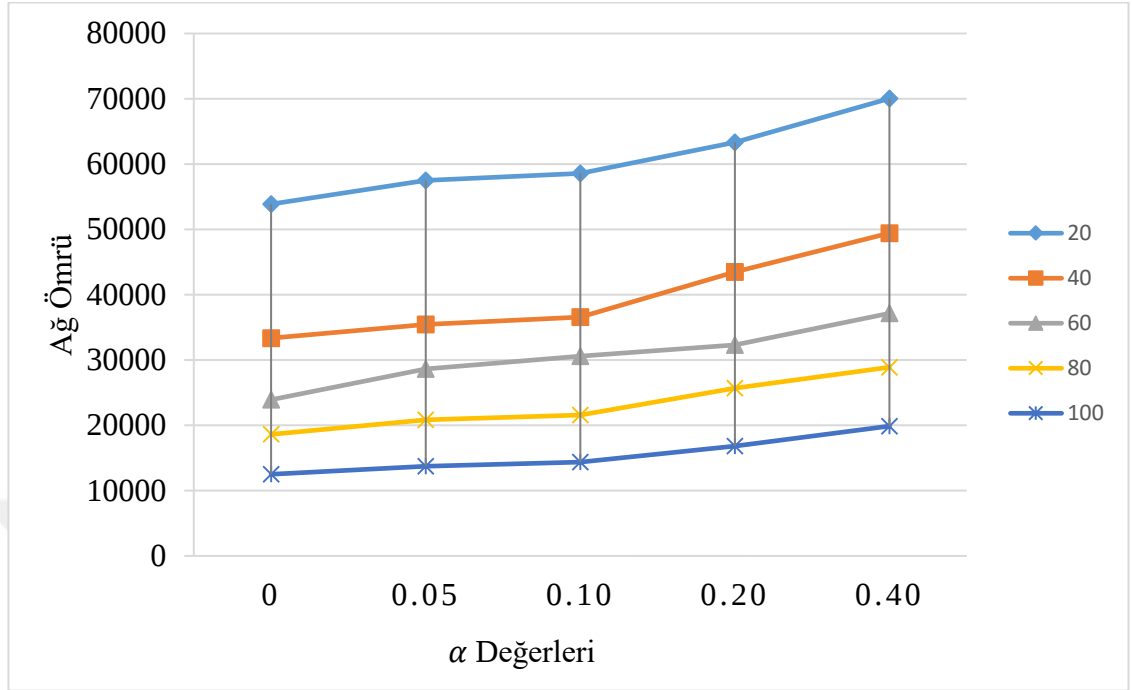
Çizelge 4.1. (devam)

ζ_1	50 $\mu\text{J/bit}$
ζ_2	100 $\text{nJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$
c^r	50 $\mu\text{J/bit}$
c^s	50 $\text{nJ}/(\text{hour} \cdot \text{bit})$

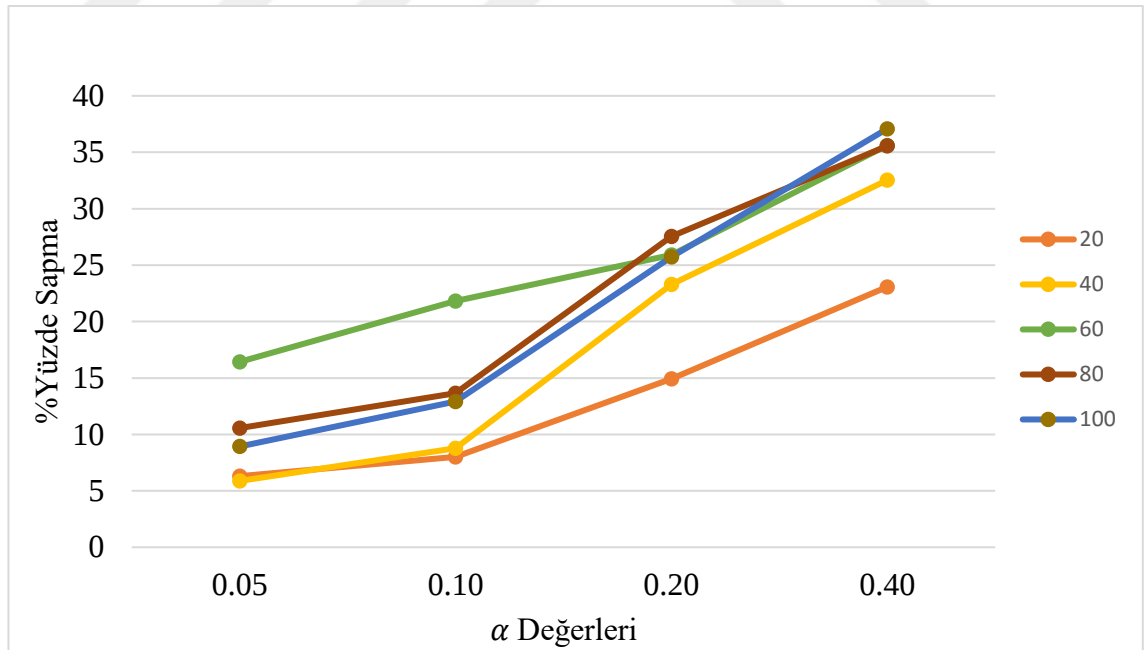
4.1.2. Performans analizi

Oluşturulan test örneklerini bu bölümde KTDP çözücüsü Gurobi (Gurobi Optimization 2017)'nin performansı ile PÜS'ün performansını karşılaştırarak değerlendirmekteyiz. PÜS ve VERA Visual Studio ortamında C# diliyle kodlanmış ve tüm deneylerin çözümünü Windows 2010'da çalışan Intel Core i7, 8 GB RAM'e sahip CASPER bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Test örneklerinin her biri Gurobi'nin en fazla 3 saat çalışmasına izin verilerek farklı α değerleri (0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40) için çalıştırılmıştır. Burada α değerinin 0 olması her gözlem noktasının ağ ömrünün %100'ünde gözlemlenmesi anlamına gelirken, α değerinin 0.05 olması her gözlem noktasının ömrün $100 \times (1 - 0.05)$ kadarında yani ömrün %95'nde kesin olarak gözlemleneceği anlamına gelmektedir. Farklı α değerleri için her bir problem setine karşılık gelen 5 örneğin ortalama ağ ömrü Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1 incelenirse hassasiyet seviyesi (yani α değeri) arttıkça problemin daha esnek bir hale gelmesinden dolayı ağ ömrünün arttığı görülebilir. Şekil 4.2'de, α 'nın çeşitli değerleri için (%95, %90, %80, %60), ömrün α 'nın 0 olduğu durumuna göre yüzde kaç arttığı temsil edilmiştir. Mesela, 80 ile 100 muhtemel sensör yerine sahip ve $\alpha = 0.20$ olan (ömrün %80'inde gözlem) örnekleri ele aldığımızda bu örneklerin $\alpha = 0$ olduğu duruma göre ortalama yüzde sapmaları sırasıyla %27.54 ve %35.56'yı bulmaktadır. Yani ağ ömründe, 80 ile 100 muhtemel sensör yerine sahip ağlar için $\alpha = 0.20$ olduğunda $\alpha = 0$ olduğu duruma göre sırasıyla %27.54 ve %35.56'lık artış olmuştur. Bu sonuç, kullanıcı tarafından izin verilen küçük hassasiyet seviyelerinin ağ ömründe ciddi artışlar yaratabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.1. Farklı hassasiyet seviyeleri için ortalama ağ ömürleri



Şekil 4.2. Farklı α değerleri (0.05, 0.10, 0.20, 0.40) için ortalama yüzde sapmalar

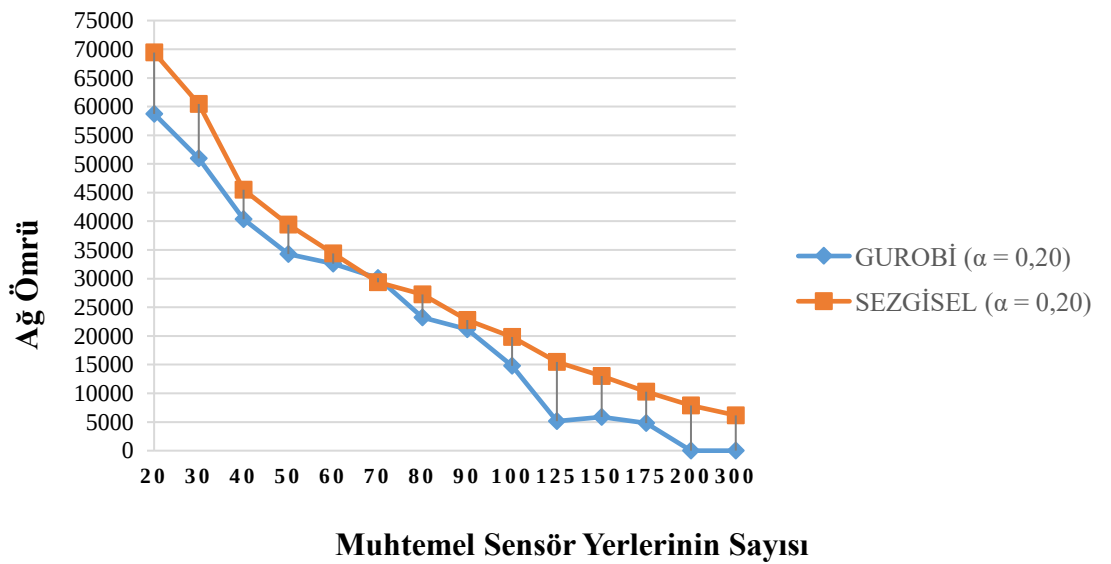
Test örneklerinin her biri için Gurobi ve PÜS'ün en fazla 3 saat çalışmasına izin verilmiştir ve bu tahsis edilen çalışma süresinde bulunan maksimum ağ ömrü Çizelge

4.2’de $\alpha = 0.2$ ve $P = 3$ için verilmiştir. Birinci ve dördüncü, sütunlar, muhtemel sensör ve ana alıcı yerlerinin sayısını ifade ederken sırasıyla ikinci, üçüncü (beşinci, altıncı) sütunlar ise Gurobi ve PÜS tarafından elde edilen maksimum ağ ömürlerini içermektedir. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi problemin büyük bir çoğunluğunda, özellikle de büyük problemlerde PÜS, Gurobi’ye üstünlük sağlamıştır. Ayrıca, Gurobi ve PÜS tarafından elde edilen maksimum ağ ömürleri arasındaki yüzde sapmalar $100 \times \left(\frac{z_{PÜS} - z_G}{z_{PÜS}} \right)$ şeklinde hesaplamaktadır.

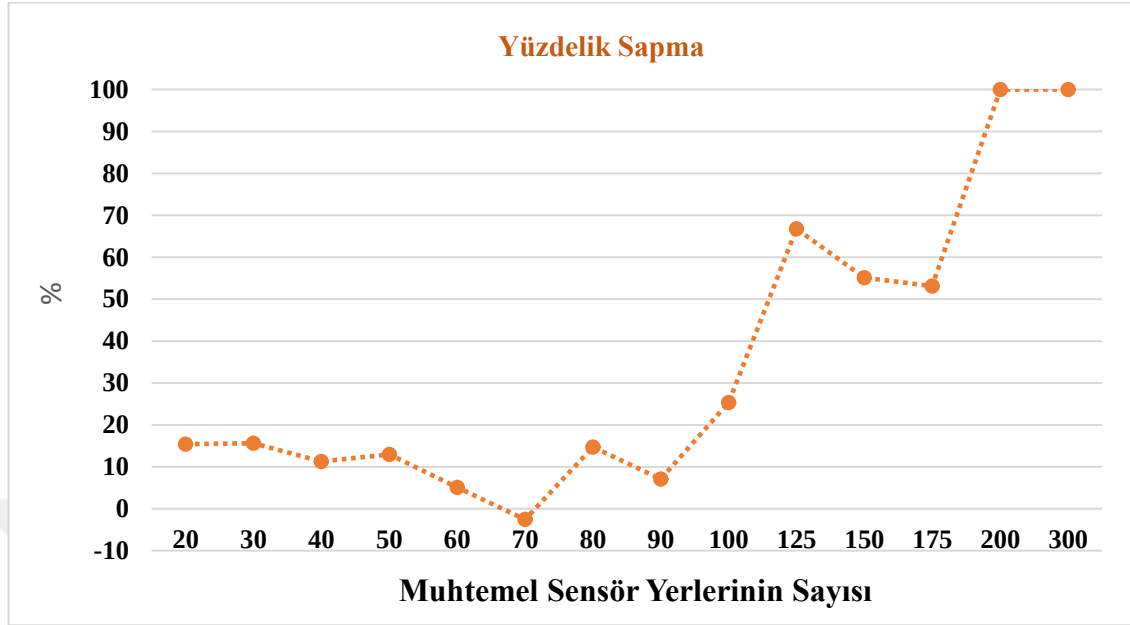
Çizelge 4.2. Gurobi ve PÜS'den elde edilen maksimum ağ ömürleri ($\alpha = 0.20$)

($ I , L $)	GUROBİ	PÜS	($ I , L $)	GUROBİ	PÜS
(20, 10)	59389.8	71397.4	(90, 45)	16989.6	22404.4
(20, 10)	58878.1	59864	(90, 45)	26810.7	22544.5
(20, 10)	56016.5	67627.3	(90, 45)	23886.8	24299.5
(20, 10)	67731.7	79569.6	(90, 45)	14495.1	22101.1
(20, 10)	51690.9	68637.1	(90, 45)	23678	22612.4
(30, 15)	50355.5	48803.7	(100, 50)	15785.9	23153.4
(30, 15)	46956.1	54212.3	(100, 50)	22086.7	20061.8
(30, 15)	51753.2	71812.3	(100, 50)	12185.7	21691.8
(30, 15)	54553.7	59494.1	(100, 50)	11628.2	14544.2
(30, 15)	51307.8	67950.1	(100, 50)	12382.3	19721.8
(40, 20)	48467	51028.4	(125, 65)	17746.3	15153.8
(40, 20)	41400.6	45691.6	(125, 65)	0.00	16091.6
(40, 20)	35418.6	42763.1	(125, 65)	0.00	15841.6
(40, 20)	44373.4	42385.3	(125, 65)	0.00	12357
(40, 20)	32230.2	45673.2	(125, 65)	7902.41	17788.7
(50, 25)	34774.3	39772.4	(150, 75)	14083.8	11768.8
(50, 25)	35806.4	44249.3	(150, 75)	8994.99	13222.5
(50, 25)	25510.8	35876.3	(150, 75)	0.00	10498.3
(50, 25)	38528.8	40243.5	(150, 75)	0.00	14730.6
(50, 25)	36831	36796.4	(150, 75)	6152.52	14864.4
(60, 30)	30800.8	31815.6	(175, 90)	11987.4	8824.68
(60, 30)	32224.2	32944.6	(175, 90)	5867.07	10528.2
(60, 30)	33157.6	35419.1	(175, 90)	0.00	8300.48
(60, 30)	31597.1	34873	(175, 90)	0.00	10974.3
(60, 30)	35256.9	36777.3	(175, 90)	6230.46	12718.9
(70, 35)	28823.38	28771.53	(200, 100)	0.00	8411.47
(70, 35)	30914.18	32065.97	(200, 100)	0.00	8204.38
(70, 35)	30648.8	28558.8	(200, 100)	0.00	8669.19
(70, 35)	30439.9	31840	(200, 100)	0.00	7790.09
(70, 35)	29726.2	25460.3	(200, 100)	0.00	6419.78
(80, 40)	23955.5	27409	(300, 150)	0.00	5564.88
(80, 40)	21782.5	26088.9	(300, 150)	0.00	6903.74
(80, 40)	25565.7	28371.9	(300, 150)	0.00	4998.10
(80, 40)	23632.2	31084.2	(300, 150)	0.00	6619.49
(80, 40)	21275.9	23303.4	(300, 150)	0.00	6757

Sezgiseli daha iyi değerlendirmek için, farklı sayılardaki muhtemel sensör yerlerinin her bir problem setine karşılık gelen 5 örneğin ortalama ağ ömrünü hesaplayıp, muhtemel sensör yerleri sayısına göre Şekil 4.3'te grafikte göstermekteyiz. Şekil 4.3 incelendiğinde 3 saatlik süre içinde 20, 30, 40, 50, 60 muhtemel sensör yerlerine sahip ağlar için PÜS tarafından elde edilen ortalama ağ ömrünün, Gurobi tarafından elde edilen ortalama ağ ömründen daha büyük olduğu görülür. 70 muhtemel sensör yerine sahip ağlar için Gurobi'nin bulduğu ortalama ağ ömrü, PÜS'e göre daha fazladır. PÜS'ün başarısı 100 ve üzeri muhtemel sensör yerine sahip ağlar için daha belirgin hale gelmektedir. Gurobi ve PÜS tarafından elde edilen maksimum ağ ömürleri arasındaki yüzde sapmalar Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Örneğin, 125 muhtemel sensör yerine sahip örnekler için ortalama yüzde sapmanın %66.79 olduğu görülmektedir. Bu sapma yüzdesi, PÜS tarafından bulunan ortalama ağ ömrünün Gurobi tarafından bulunan ortalama ağ ömrüne göre 3.01 kat daha uzun olduğunu ortaya koymaktadır. 150 ve 175 muhtemel sensör yerine sahip ağ için yüzdelik sapmalar sırasıyla %53.09 ve %52.09'dur ve birbirlerine çok yakındır. Muhtemel sensör yerlerinin sayısı 200 ve 300'e yükseldiğinde ise Gurobinin, bu ağlar için uygun bir çözüm bulamamasından dolayı yüzde sapmalar %100'e ulaşmaktadır. Dolayısıyla PÜS, küçük boyuttaki örneklere oranla büyük boyuttaki örnekler için çok daha iyi sonuç vermektedir.



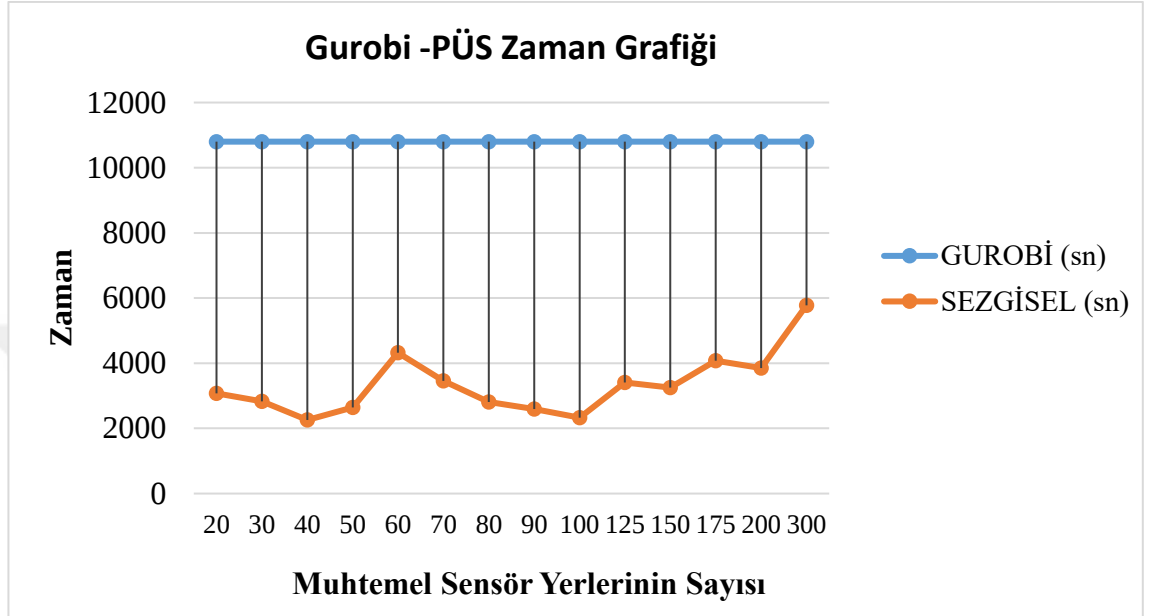
Şekil 4.3. Farklı boyuttaki ağlar için ortalama ağ ömürleri ($\alpha = 0.20$)



Şekil 4.4. Ortalama yüzde sapmalar

Yapılan çalışmada her bir problem örneği için Gurobi ve PÜS için 3 saatlik zaman verildiğinden bahsedilmişti. Fakat 3 saatten önce Gurobi'nin en iyi çözümü bulması durumunda veya PÜS'ün bir çözüme yakınması durumunda, bulunan uygun çözüm 3 saatin sonuna kadar beklenmeksizin hemen rapor edilmektedir ve diğer örneğin çözümüne başlanılmaktadır. Gurobi ve PÜS tarafından $\alpha = 0.20$ için gereken ortalama hesaplama süreleri, Şekil 4.5'te muhtemel sensör yerleri sayısına karşılık çizilmiştir. Sezgisel yöntemin Gurobi'den daha kısa sürede problemleri çözmesi istenmektedir. Önerilen PÜS, herhangi bir periyot için kısa bir süre harcamakta ve hızlı bir şekilde çözümü iyileştirmektedir. Gurobi ise birkaç iterasyondan sonra modeli iyileştirememektedir. Gurobinin tüm örnekler için 3 saatlik zamanı sonuna kadar kullandığı Şekil 4.5'te gözlemlenmektedir. Örneğin, muhtemel sensör yeri sayısı 300 olan problem örneğini ele aldığımızda Gurobi ortalama 10800 sn'de 0 sonucunu elde ederken PÜS ise ortalama 5779.32 sn'de 6619.49 sonucunu elde edebilmektedir. Dolayısıyla, küçük boyutlu örneklerden büyük boyutlu örneklere kadar PÜS, Gurobi'ye göre çok daha kısa zamanda, çok daha iyi sonuçlar vermektedir. Gurobi, verilen hesaplama süreleri içerisinde büyük problemlere çözüm bulmakta zorlanmaktadır ve

çözüm bulabilmesi için daha fazla zamana ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, büyük boyutlu ağlar için PÜS'ün kalitesi Gurobi'ye baskındır.



Şekil 4.5. Gurobi ve PÜS'ün VEKA modelini çözerken harcadığı süreler

5. SONUÇ

Bu çalışmada gerçekçi ağ ömrü tanımları ile dört tasarım konusu; sensör yerleri, veri rotalama, etkinlik çizelgeleme, ana alıcı hareketliliği birlikte ele alınmış ve bu şartlar altında kablosuz sensör ağının ömrü enbüyüklemeye çalışılmıştır. İlk olarak gerçekçi ağ ömrünün en büyükleme hedefleyen ve bütün tasarım konularını bütünleşik bir şekilde ele alan ve yeni bir KTDP modeli geliştirilmiştir. Daha sonra matematiksel modelin çözümü için pratik bir sezgisel yöntem önerilmiştir.

Önerilen sezgisel yöntem, ikili değişkenlerin bir kısmının değerini sabitleme fikrine dayanmaktadır. Periyot üretme sezgiseli, toplam periyotların sayısını sınırlandırır ve periyot sayısı, birbirini izleyen iki iterasyon arasında herhangi bir iyileşme olmayana kadar artırılır. Geçerli iterasyonun çözüm prosedürünü hızlandırmak için önceki iterasyonda bulunan çözüm yeni iterasyonda kullanılır. Önerilen sezgisel yöntemin ticari çözücü Gurobiye göre, makul hesaplama zamanları içerisinde, daha uzun ömürlü KSA tasarımları elde ettiği gözlenmiştir.

Çalışmamızda PÜS, ticari çözücü Gurobi'nin performansından daha iyi performans göstermiştir, ancak Lagrange gevşetmesi ve kolon üretme, gibi teorik ayrıştırma stratejilerini kullanarak daha iyi KSA tasarımları elde etmekte mümkündür. VEKA'nın çözümü için etkili tam çözüm metodları veya pratik sezgisel yöntemler de geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Alsalihi, W., Akl, S., Hassanein, H., 2007. Placement of multiple mobile base stations in wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE international symposium on signal processing and information technology, (pp. 229–233).
- Akyildiz, I. F., Vuran, M. C., 2010. Wireless Sensor Networks, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 9780470036013.
- Azad, A., Chockalingam, A., 2006. Mobile base stations placement and energy aware routing in wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE wireless communications and networking conference, 1, (pp. 264–269).
- Basagni, S., Carosi, A., Melachrinoudis, E., Petrioli, C., Wang, Z. M., 2008. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. *Wireless Networks*, 14 (6), 831–858.
- Basagni, S., Carosi, A., Petrioli, C., Phillips, C. A., 2011. Coordinated and controlled mobility of multiple sinks for maximizing the lifetime of wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 17 (3), 759–778.
- Behdani, B., Cole Smith, J., Xia, Y., 2013. The lifetime maximization problem in wireless sensor networks with a mobile sink: mixed-integer programming formulations and algorithms. *Journal IIE Transactions*, 45(10):1094-1113.
- Behdani, B., Yun, Y. S., Cole Smith, J., Xia, Y., 2012. Decomposition algorithms for maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sinks. *Computers and Operations Research*, 39 (5), 1054–1061.
- Castaño, F., Bourreau, E., Velasco, N., Rossi, A., Sevaux, M., 2015. Exact approaches for lifetime maximization in connectivity constrained wireless multi role sensor networks. *European Journal of Operational Research*, 241 (1), 28–38.
- Ceylan, Onur., 2008. Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Yaşam Süresi Eniyilemesi için Veri İşleme ve İletişim Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çevik, O., 2006. Tam sayılı doğrusal programlama ile işgücü planlaması ve bir uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi*, 8(1), 157-171.
- Dargie, W., Poellabauer, C., 2010. *Fundamentals Of Wireless Sensor Networks : Theory And Practice*, United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 0470997656.
- Dishongh, T. and McGrath, M., 2009. *Wireless sensor networks for healthcare applications*, Artech House, Norwood MA.
- Gandham, S. R., Dawande, M., Prakash, R., Venkatesan, S., 2003. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. *IEEE Global Telecommunications Conference*, 1, 377–381.
- Gatzianas, M., Georgiadis, L., 2008. A distributed algorithm for maximum lifetime routing in sensor networks with mobile sink. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7 (3), 984–994.
- Gentilli, M., Raiconi, A., 2011. α -Coverage to extend network lifetime on wireless sensor networks. Springer-Verlag, 1862-4472.
- Gurobi Optimization, I., 2017. Gurobi optimizer reference manual, <http://www.gurobi.com>. (Accessed November 2017).

- Güney, E., Aras, N., Altınel, İ. K., Ersoy, C., 2010. Efficient integer programming formulations for optimum sink location and routing in heterogeneous wireless sensor networks. *Computer Networks*, 54 (11), 1805–1822.
- Güney, E., Aras, N., Altınel, İ. K., Ersoy, C., 2012. Efficient solution techniques for the integrated coverage, sink location and routing problem in wireless sensor networks. *Computers and Operations Research*, 39 (7), 1530–1539.
- Havinga, P., Kuper, J., 2007. *Flexible Sensor Network Reprogramming for Logistics*, Pisa, Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS 2007.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. 2000. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the thirty third annual Hawaii international conference on system sciences*, (pp. 10–19).
- Kalaycı, T. E., 2011. *Yapay Zeka Yöntemleri ile Kablosuz Sensör Ağlarındaki Eniyileme Problemlerinin Çözümü*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kappler, C. and Riegel, G., 2004. A real-world, simple wireless sensor network for monitoring electrical energy consumption, *Wireless Sensor Networks*, Vol. 2920, pp. 339-352.
- Keskin, M. E., 2017. A column generation heuristic for optimal wireless sensor network design with mobile sinks. *European Journal of Operational Research*, 260(1), 291-304.
- Keskin, M. E., Altınel, İ. K., Aras, N., Ersoy, C., 2016. Wireless sensor network design by lifetime maximisation: An empirical evaluation of integrating major design issues and sink mobility. *International Journal of Sensor Networks*, 20 (3), 131–146.
- Keskin, M. E., Altınel, İ. K., Aras, N. 2015. Combining simulated annealing with Lagrangian relaxation and weighted Dantzig–Wolfe decomposition for integrated design decisions in wireless sensor networks. *Computers and Operations Research*, 59, 132–143.
- Keskin, M. E., Altınel, İ. 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., Altınel, İ. K., Aras, N., Ersoy, C., 2011. Lifetime maximization in wireless sensor networks using a mobile sink with nonzero traveling time. *The Computer Journal*, 54 (12), 1987–1999.
- Lee, S. H., S. Lee, H. Song and H. S. Lee, 2009. Wireless sensor network design for tactical military applications: remote large-scale environments, *IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-7.
- Liang, W., Luo, J., Xu, X., 2010. Prolonging network lifetime via a controlled mobile sink in wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE global telecommunications conference*, (pp. 1–6).
- Luo, J., Hubaux, J. P., 2005. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. In *Proceedings of the twenty fourth annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*, 3 (pp. 1735–1746).

- Luo, J., Hubaux, J. P., 2010. Joint sink mobility and routing to maximize the lifetime of wireless sensor networks: the case of constrained mobility. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 18 (3), 871–884.
- Madan, R., Lall, S., 2006. Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5 (8), 2185–2193.
- Marshall, I. W., C. Roadknight, I. Wokoma and L. Sacks., 2003. Self-organising sensor networks, 1st UK-UbiNet Workshop.
- Martinez, K., R. Ong, J. K. Hart and J. Stefanov., 2004. GLACSWEB: a sensor web for glaciers, *Proceedings of European Workshop on Wireless Sensor Networks*, pp. 46-49.
- Öztürk, A., 2016. Yöneyem Araştırması. Ekin yayınevi, 871, Bursa.
- Papadimitriou, I., Georgiadis, L., 2005. Maximum lifetime routing to mobile sink in wireless sensor networks. In *Proceedings of the thirteenth IEEE international conference on software in telecommunications and computer networks*.
- Popa, L., Rostamizadeh, A., Karp, R., Papadimitriou, C., Stoica, I., 2007. Balancing traffic load in wireless networks with curveball routing. *Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, 9 (14), 170–179.
- Rault, T., Bouabdallah, A., Challal, Y., 2013. Multihop wireless charging optimization in low power networks, *Ad Hoc and Sensor Networking Symposium*.
- Soylu, T., 2012. Kablosuz Algılayıcı Ağların Uygulama Alanları ve Bir Algılayıcı Düğüm Tasarımı. Yüksek Lisans Tez, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türkoğulları, Y. B., Aras, N., & Altınel, İ. K., 2010a. Optimal placement, scheduling, and routing to maximize lifetime in sensor networks. *Journal of the Operational Research Society*, 61 (6), 1000–1012.
- Türkoğulları, Y. B., Aras, N., Altınel, İ. K., Ersoy, C., 2010b. A column generation based heuristic for sensor placement, activity scheduling and data routing in wireless sensor networks. *European Journal of Operational Research*, 207 (2), 1014–1026.
- Türkoğulları, Y. B., Aras, N., Altınel, İ. K., Ersoy, C., 2010c. An efficient heuristic for placement, scheduling and routing in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 8 (6), 654–667.
- Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G., Conti, A., 2008. *Wireless Sensor And Actuator Networks: Technologies, Analysis And Design*, Academic Press, ISBN 0123725399.
- Wang, Z. M., Basagni, S., Melachrinoudis, E., Petrioli, C., 2005. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. In *Proceedings of the thirty eighth annual Hawaii international conference on system sciences*, 287a–287a.
- Winkler, M., Tuchs, K.-D., Hughes, K., Barclay, G., 2008. Theoretical And Practical Aspects Of Military Wireless Sensor Networks, *MILCOM'09 Proceedings of the 28th IEEE conference on Military communications*, Pages 911-917 .
- Xia, L., Shihada, B., 2015. A jackson network model and threshold policy for joint optimization of energy and delay in multi-hop wireless networks. *European Journal of Operational Research*, 242 (3), 778–787.

- Yazar, M., 2015. Kablosuz Sensör Ağları ile Yangın Uyarı Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yun, Y., Xia, Y., 2010. Maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sink in delay tolerant applications. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9 (9), 1308–1318.
- Yun, Y., Xia, Y., Behdani, B., Smith, J. C. (2013). Distributed algorithm for life- time maximization in delay-tolerant wireless sensor network with mobile sink. In *Proceedings of the forty ninth IEEE conference on decision and control*, (pp. 370–375).
- Zhao, M., Yang, Y., 2012. Optimization-Based Distributed Algorithms for Mobile Data Gathering in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11(10), 1464-1477.



ÖZGEÇMİŞ

Elif TORLAK, 1993 yılında İstanbul’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. Lise öğrenimini Yeni Levent Lisesi’nde tamamladıktan sonra 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’ne ve 2013 yılında çift anadal programıyla Makine Mühendisliği bölümüne başladı. Endüstri Mühendisliği bölümünü 2015 yılında bölüm üçüncülüğü derecesi ile bitirdi ve 2017 yılında da Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı zamanda 2015 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı. 2017 yılında Atatürk Üniversitesi Sürekli Eğitim ve Araştırma Merkezinde C sınıfı İş Sağlığı ve Güvenliği eğitimini tamamladı.