

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

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA BELİRSİZ VERİ  
ÜRETİMİ İÇİN GÜRBÜZ EN İYİLEME**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Teslime GÜREL**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**ARALIK 2020**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA BELİRSİZ VERİ ÜRETİMİ İÇİN GÜRBÜZ EN İYİLEME

Teslime GÜREL

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Tarih: Aralık 2020

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA), son zamanlardaki teknolojik yenilikler ile birlikte askeri, sağlık, çevre, afet yönetimi, habitat gözlemi gibi pek çok farklı alanda uygulanabilirlik özelliğine sahip olmasıyla göz önüne çıkan bir teknolojidir. Kablosuz Vücut Alan Ağları (KVAA) ise, yakın zamanda benimsenen ve hastaların sağlık koşullarının uzaktan izlenmesi gibi önemli sağlık uygulamalarında yaygın şekilde kullanılan özel bir KAA türüdür. KAA'larda genellikle çok sayıda algılayıcı düğüm, gözlemlenecek bölgeye rastgele saçılarak yerleştirildiğinden algılayıcı düğümlerin pillerinin değiştirilmesi veya yeniden şarj edilmesi pratikte anlamlı ve mümkün olmayabilir. Dolayısıyla da ağın enerji verimli kullanımını sağlamak, ağa dair temel

beklenti uzun süre çalışması olduğundan çok önemlidir. KAA teknolojisinde karşılaşılan başka bir sorun ise literatürde trafik belirsizliği olarak belirtilmektedir. Bazı durumlarda algılayıcı düğümler veri üretimini olay-odaklı bir şekilde gerçekleştirmektedir. Bu demektir ki ölçüm yapılan ortamda bir olay gerçekleşirse veri üretimi söz konusu olur. Aksi durumda algılayıcılar bir nevi uyku durumuna geçerek enerji tasarrufu yaparlar. Bu sebeple iletilecek veri miktarı, önceden tam olarak bilinemediğinde ağ üzerindeki trafiğe dair belirsizliğe yol açmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda belirsiz veri üretim miktarı genellikle ihmal edilmektedir, ancak bu ihmalin sonucunda ağın beklenen performansa ulaşması ve dolayısıyla etkin işleyişi tehlikeye atılmaktadır. KVAA bünyesindeki vücut algılayıcı düğümleri genellikle olay-odaklı ölçüm yapacak şekilde yapılandırılmaktadır. Bu tasarımlar, veri trafiğindeki belirsizlik ihmal edilerek yapıldığında hastaların sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek durumlara yol açabilmektedir. KAA teknolojisindeki ağ ömrü ve belirsiz veri üretim miktarı problemlerini ele almak için, bu çalışmada öncelikle her bir algılayıcının birim zamanda ölçeceği veri miktarının kesin olarak bilindiği varsayımıyla enerji verimli deterministik bir model sunulmaktadır. Ardından sensörlerin birim zamanda ölçtükleri veri miktarının farklı olabileceği öngörüsü ile gürbüz bir enerji verimli KAA tasarımı problemi ele alınarak olası üretim oranlarının, çokyüzlü bir küme ile ifade edildiği durum incelenmektedir. Çalışmada öncelikle yarı sonsuz programlama modeli sunulmaktadır. Daha sonra eşlenirlik kullanılarak sıkı bir formülasyon elde edilmektedir. Modellerin performansını karşılaştırmak amacıyla 1,75 m boyundaki bir erkek vücudu üzerine rastgele yerleştirilen farklı büyüklüklerdeki KVAA'lar üzerinde testler yapılmıştır. Yapılan test sonuçları değerlendirilerek veri üretim miktarındaki belirsizliğin KVAA performansına dair farklı metriklere etkisi incelenmiştir. Deterministik model ile elde edilen ağ ömrü süreleri, gürbüz model ile elde edilen ağ ömürlerinden daha iyi olmasına rağmen deterministik modeldeki ağ tasarımları veri belirsizliği altında zorlandığında gürbüz modelden daha kötü bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz algılayıcı ağlar, Kablosuz vücut alan ağları, Ağ ömrü en iyileme,  $F$ -gürbüz optimizasyon, Olay-odaklı ölçüm.

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **ROBUST OPTIMIZATION FOR UNCERTAIN DATA GENERATION RATE IN WIRELESS SENSOR NETWORKS**

Teslime GÜREL

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Date: December 2020

Wireless Sensor Networks (WSNs) stand out with their applicability in many different areas such as military, health, environment, disaster management, habitat observation along with recent technological innovations. On the other hand, Wireless Body Area Networks (WBANs), is a special type of WSNs that has been recently adopted and is widely used in important health applications such as remote monitoring of patients' health conditions. As a large number of sensor nodes are scattered randomly to the area to be observed, replacing or recharging the batteries of the sensors may not be meaningful or possible in practice. That's why it becomes very important to ensure the

energy-efficient use of the network because the main expectation from a network is to have it stay functional as long as possible. Another problem encountered in WSN applications is stated as traffic uncertainty in the literature. In some cases, sensor nodes generate data in an event-driven manner. This means that a sensor generates data only if an event occurs in its sensing region. Otherwise, the sensors save energy by going into a sleep state. For this reason, the amount of data to be transmitted is not known precisely in advance, which leads to traffic uncertainty. In the literature, uncertainty in data production rate is generally neglected. However, that deteriorates the performance of the network. Body sensor nodes within WBAN are generally configured to perform event-driven measurements. Neglecting the uncertainty in data traffic at the network design stage can lead to situations that may adversely affect the health of patients. In order to address network lifetime and uncertain data generation rate problems in WSN technology, we first present an energy-efficient WBAN design model where the data generation rate for each sensor is assumed to be known precisely. Then, under the prediction that the amount of data measured by sensors in unit time may differ, we introduce a robust energy-efficient WSN design model, where the set of applicable production rates is expressed with a polyhedral set. Initially, we have a semi-infinite programming model for which a tight formulation is obtained using duality. For the experimental tests, we use random instances generated based on a 1.75 m male body. We analyze the effect of uncertainty in data generation rates on WBAN performance with respect to different metrics. Even though the network lifetimes with the deterministic model are better than the ones with the robust model, it has been observed that the network designs in the deterministic model get worse than the robust model when faced with a challenging applicable scenario other than the expected one.

**Keywords:** Wireless sensor networks, Wireless body area networks, Network lifetime optimization,  $\Gamma$ -robust optimization, Event-oriented measurement.

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmamın her aőamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaőarak bana destek olan ve hayatımı her anlamda ynlendiren değerli danışman hocam Do. Dr. Ayőegl Altın Kayhan'a, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü ğretim üyelerine ve daima yanımda olan, beni her konuda destekleyen ve yalnız bırakmayan arkadaőlarım ve sevgili aileme en içten duygularımla teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR .....	x
SEMBOL LİSTESİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	7
3. PROBLEM TANIMI VE EN İYİLEME MODELLERİ .....	15
3.1 Varsayımlar ve Parametreler .....	16
3.2 Deterministik Model .....	17
3.3 Gürbüz Optimizasyon Modeli .....	19
3.3.1 $\Gamma$ -Gurbüz Model .....	22
4. PERFORMANS ANALİZİ .....	27
4.1 Örneklem Oluşturulması .....	27
4.2 Parametreler .....	29
4.3 Test Sonuçları.....	30
4.3.1 $\Gamma$ Değerlerinin Ağ Ömrüne Etkisi.....	30
4.3.2 Ağ Ömrü Performanslarının Karşılaştırılması .....	36
4.3.3 Farklı Veri Setlerinin Ağ Ömrüne Etkisi .....	42
4.3.4 Genel Değerlendirme .....	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
KAYNAKLAR .....	48
EKLER.....	53

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1 : Ağ modeli.....	28
Şekil 4.2 : $U^+$ için farklı $\Gamma$ değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri. ....	31
Şekil 4.3 : $U^+$ için farklı $\Gamma$ değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri. ....	32
Şekil 4.4 : $U^\pm$ için farklı $\Gamma$ değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri. ....	34
Şekil 4.5 : $U^\pm$ için farklı $\Gamma$ değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri. ....	35
Şekil 4.6 : $U^+$ için $\Gamma$ -gürbüz ve deterministik model ağ ömürleri karşılaştırması....	39
Şekil 4.7 : $U^\pm$ için $\Gamma$ -gürbüz ve deterministik model ağ ömürleri karşılaştırması. ....	41
Şekil 4.8 : Farklı veri setlerinin ağ ömrüne etkisi. ....	43



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1 : KAA ve KVAA arasındaki karşılaştırma.	8
Çizelge 2.2 : Enerji verimliliğini ele alan makaleler.	10
Çizelge 4.1 : Algılayıcı düğüm dağılımı.	28
Çizelge 4.2 : Parametreler.	29
Çizelge 4.3 : $U^+$ için farklı $\Gamma$ değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ortalama ağ ömrü değerleri.	30
Çizelge 4.4 : $U^+$ için farklı $\Gamma$ değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.	31
Çizelge 4.5 : $U^+$ için ağ ömrü bakımından gürbüzlüğün % bedeli.	32
Çizelge 4.6 : $U^\pm$ için farklı $\Gamma$ değerleri için ortalama ağ ömrü değerleri.	33
Çizelge 4.7 : $U^\pm$ için farklı $\Gamma$ değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.	35
Çizelge 4.8 : $U^\pm$ için ağ ömrü bakımından gürbüzlüğün % bedeli.	36
Çizelge 4.9 : Deterministik modelde algılayıcı düğümlerin ömrü.	37
Çizelge 4.10 : Farklı veri üretim miktarına sahip düğümlerin sayısının ağ ömrüne etkisi.	38
Çizelge 4.11 : $U^+$ ile $\Gamma$ -gürbüz ve deterministik model ağ ömürleri karşılaştırması.	38
Çizelge 4.12 : $U^+$ için deterministik modele göre diğer modellerin ağ ömürlerindeki oransal azalma.	40
Çizelge 4.13 : $U^\pm$ için deterministik modele göre diğer modellerin ağ ömürlerindeki oransal azalma.	41

## KISALTMALAR

<b>BS</b>	: Baz İstasyonu
<b>EEG</b>	: Elektroensefalografi
<b>EKG</b>	: Elektrokardiografi
<b>EM</b>	: Elektro Manyetik
<b>İMM</b>	: İletim Menzili Mesafesi
<b>KAA</b>	: Kablosuz Algılayıcı Ağ
<b>KVAA</b>	: Kablosuz Vücut Alan Ağı
<b>MOO</b>	: Multi-Objective Optimization
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b><math>T_{det}</math></b>	: Deterministik Modelin Ağ Ömrü
<b><math>T_{det}(f)</math></b>	: Revize Deterministik Modelin Ağ Ömrü
<b><math>T_{gür}</math></b>	: $f$ - gürbüz Modelin Ağ Ömrü
<b>WBAN</b>	: Wireless Body Area Network
<b>WSN</b>	: Wireless Sensor Network
<b>Qos</b>	: Quality of Satisfaction

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur:

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$A$	Ayrıt kümesi
$\bar{a}_{ij}$	Ortalama (veya nominal) değer
$\hat{a}_{ij}$	Maksimum sapma
$\beta$	Güç yitim katsayısı
$b$	Sağ taraf vektörü
$B_i$	Başlangıç enerjisi
BS	Baz istasyonu
$c$	Amaç fonksiyonu katsayılar vektörü
$d_{ij}$	Öklid mesafesi
$\varepsilon$	Verici verimlilik katsayısı
$\Gamma$	Korunaklılık seviyesi
$G(N, A)$	Yönlü çizge
$N$	Algılayıcı kümesi
$N^*$	BS hariç algılayıcı kümesi
$p$	Belirsiz katsayıların sayısı
$PRX$	Bir birim veriyi almak için harcanan enerji
$PTX_{ij}$	Bir birim veriyi $j \in N$ 'e göndermek için $j \in N$ 'in harcadığı enerji miktarı
$S_i$	Birim zamanda $i \in N$ tarafından üretilen veri miktarı
$U$	Belirsizlik veri kümesi
$x_c$	Yatay koordinat eksen
$y_c$	Düşey koordinat eksen

$\rho$

Elektronik devrelerde harcanan enerji miktarı



## 1. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA); bir ortama yerleştirilen çok sayıda, küçük boyutlu algılayıcı düğümler ile bir veya daha fazla sayıda baz istasyonundan (BS'den) oluşur. Algılayıcı düğümler, buldukları ortamdan sezme menzilleri içerisindeki sıcaklık, nem gibi fiziksel veriyi toplarlar. Bu veriyi işleyerek iletişim menzili içerisinde bulunan başka algılayıcı düğümlere veya BS'lere kulaktan kulağa olarak isimlendirilen bir yöntem kullanarak kablosuz bir şekilde iletirler. Böylece sezilen her bir veri, BS'lerde toplanmış olur. Veri, BS aracılığıyla veri işleme merkezine iletilir. BS hem diğer algılayıcı düğümlerle hem de veri işleme merkezi ile iletişim kurabilmesi sebebiyle özel bir düğümdür. Algılayıcı düğümlerin sahip olduğu enerji, hafıza, işlem kapasitesi gibi kaynaklar kısıtlı iken BS'lerin kaynakları daha geniştir. Ortamdan toplanan fiziksel veri, veri işleme merkezlerinde anlamlı hale getirilir. KAA'lar sayesinde ilgili gözlem alanları kolay ve etkin bir şekilde sürekli takip edilebilir hale gelmektedir.

Söz konusu uygulamaya göre farklılık göstermekle birlikte, bir ortamdaki verinin algılanabilmesi için yüzlerce hatta binlerce algılayıcı düğüm kullanılabilir. Her biri bünyesinde bulundurduğu bataryadan güç temini yapan bu algılayıcı düğümler, ölçüm yapılacak bölgeye rastgele saçılabilirler gibi belirlenen konumlara doğrudan da yerleştirilebilirler. Her ne kadar değiştirilebilen ya da güneş enerjisi gibi alternatif kaynaklar kullanılarak şarj edilebilen bataryalar mevcut olsa da, genellikle tasarımlarda tek kullanımlık bataryalar tercih edilir. Ölçüm yapılan bölgenin coğrafi özellikleri, yenileme işlemi maliyetinin kabul edilebilir aralıkta olmasına her zaman olanak vermeyebilir. Örneğin; sualtı gözlemi için okyanus dibine saçılmış olan düğümlerin enerjilerinin bitmesi durumunda sualtında bulunup bataryaların değişmesi neredeyse olanaksızdır.

Bir başka önemli husus ise iletişimin devamlılığıdır. Örneğin; ülke savunmasında KAA ile veri iletiminin sürekliliği son derece önem arz etmektedir. Herhangi bir iletişim kesintisi durumunda oluşabilecek sonuçların telafisi olmayabilir. Düşman kuvvetlerinin sınıra yaklaştığı bilgisinin gözden kaçması geri dönülemez sonuçlara

sebeup olabilir. Bir KAA'nın iyi performans gösterdiği kabul edilebilmesi için, verinin gizliliği, güvenliği ve güvenilirliğinin sağlanması gerekmektedir. Dolayısıyla, iyi performans gösteren bir KAA'dan beklenen, hedeflenen hizmet kalitesini sağlarken olabildiğince uzun süre fonksiyonel kalarak iletişimin devamlılığının sağlanmasıdır.

Tek bir algılayıcı düğümün menzil alanı küçük iken bir alana yoğun bir şekilde saçılmış algılayıcı düğümlerin birbirleri ile iletişim kurmaları sayesinde, ağın kapsama alanı çok geniş olabilmektedir. Böylelikle gözetimsiz bir biçimde ilgili hedef alan takip edilebilmektedir. KAA'lar hemen hemen tüm çevre şartlarında ve uygulama alanlarında kullanılabilirler. Geleneksel algılayıcı sistemlerin aksine çok daha yüksek veri iletim hızına sahiptirler ve ayrıca hataya karşı daha dayanıklıdırlar. KAA'lar düşük güç tüketerek çalışmaları, buldukları ortama kolay adapte olabilmeleri ile hemen hemen her alandan veri toplayabilmeleri, düşük maliyetlere sahip olmaları ve kullanım/kurulum kolaylıkları gibi nedenlerle pek çok alanda, özellikle kablolu algılayıcı ağların yeterli olmadığı ya da uygulanamadıkları alanlarda tercih edilirler. Bilinen ilk KAA 1967 yılında Amerika Birleşik Devletleri Ordusu tarafından ormanlık alanda Vietnam Ordusundaki birlik hareketlerini gözlemek amacıyla tasarlanmıştır. Ancak bu uygulama, algılayıcıların yüksek güç harcamaları ve aralarında oluşan iletişim problemleri sebebiyle başarılı olamamıştır. 1960'lı yıllardan sonra askeri alanların yanında sosyal alanlarda da KAA'ların kullanımı yaygınlaşarak iklim, çevre, trafik yoğunluğu, orman yangınları gözlemi gibi çok geniş bir yelpazede kendine yer bulmuştur [1].

1990'lı yıllarda KAA'lar, sağlık alanında da önemli bir araştırma konusu haline almaya başlamışlardır [2]. Kablosuz haberleşme teknolojisindeki gelişmelerle bu alanda yapılan çalışmalar ilerleme göstermiştir. İlk çalışmalar 1990'lı yıllarda "kablosuz personel alan ağları" adı verilen teknolojinin, insan vücudu yakınında iletişim amacıyla kullanılmasıyla başlamıştır [3]. Taşınabilir/giyilebilir sağlık izleme sistemleri, düşük maliyetli ve uzaktan takip edilebilir şekilde 2000'li yıllarda geliştirilmiştir. Bu teknoloji Kablosuz Vücut Alan Ağları (KVAA) adını almıştır [4].

Nesnelerin interneti, 5G gibi gelecek nesil haberleşme sistemleri her an ve her yerde internete bağlı olma prensibi ile çalışmaktadır. İnsanların sürekli iletişimde kalma ve bilgiye her durumda ulaşabilme ihtiyaçları, kablosuz haberleşme sistemlerine duyulan ihtiyacı da artırmıştır. Dünya nüfusunun artışı sonucu yetersiz kalan sağlık imkanları ile sağlık maliyetlerindeki ciddi artış ise KVAA'lara olan ilginin ve ihtiyacın artmasına

sebeptir. KVAA, hastanın sağlık durumunun ve hayati değerlerinin anında izlenmesi temeline dayanır. Bu teknoloji; yaşlı insanların, kronik hastalığa sahip olan bireylerin, doğal yaşamlarına mşdahale edilmeden devamlı olarak fizyolojik verinin ölçşlmesinde giderek yaygınlaşarak kullanılmaktadır. KVAA teknolojisinin temel amacı; hastanın hayati parametrelerinin, hasta nerede olursa olsun, ilgili tıbbi personele eş zamanlı olarak iletilmesini sağlamaktır [3]. Kablosuz teknolojinin kullanılmadığı durumlarda hastalar, gözlem altında kalabilmek için evlerinde veya hastanelerde bulunmak durumundayken kablosuz teknoloji kullanımı sonucunda günlük hayatları etkilenmeden fizyolojik veri takip edilir.

KVAA teknolojisi; sağlık, askeri ve spor başta olmak üzere birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bireyin fizyolojik parametrelerini toplamak, saklamak, işlemek, ilgili birime doğru zamanda iletmek, ona her yerde ve her an hizmet sunmak üzere tasarlanmıştır. Ayrıca insan vücudundaki anormalliklerin erken aşamada tespit edilerek mşdahale edilmesini amaçlamaktadır [5].

KVAA, KAA'nın özel bir çeşidi olup insan vücudunun içine veya üzerine yerleştirilmiş bir dizi küçük algılayıcı (EKG, EEG vb.) düğümler ile bu düğümlerin bağlı bulunduğu özel bir düğüm olan BS'den oluşur [6]. Algılayıcı düğümler yine KAA'lardaki gibi bünyelerinde bulundurdukları bataryalarından enerji teminini sağlamaktadır. Hem KAA teknolojisinde hem de KVAA teknolojisinde karşılaşılan en büyük zorluk algılayıcı düğümlerin sınırlı enerjiye sahip olmasıdır. KVAA bünyelerinde algılayıcı düğümler buldukları ortama ait verinin sezilmesi, işlenmesi ve diğer algılayıcılara iletilmesi için enerji harcarlar. Bir KAA'nın ömrü için literatürde çeşitli tanımlamalar önerilmiştir; ancak, genel olarak kabul edilen bir tanım, ağın artık amaçlanan işlevini yerine getiremediği bir noktaya gerilemesidir. Bu durum; ilk algılayıcı düğüm öldüğünde veya belli sayıda ya da yşzdede düğüm öldüğünde veya ağ, alt ağlar arasında iletişim olmayacak şekilde bölündüğünde veya kapsama alanı kaybolduğunda oluşabilir [7]. KVAA'larda algılayıcı düğümlerden birinin dahi enerjisinin bitmesi ağda iletişimin kopmasına veya sınırlı bir şekilde gerçekleştirilmesine neden olabilir. Bu nedenle KVAA'nın ömrü, ilk ölen düğümün ömrüne eşit olduğu varsayılır. İletişimin birdenbire kesilmesi ciddi sorunlar doğurabilir. KAA'larda olduğu gibi KVAA'larda da iletişimin sürdürülebilirliği insan sağlığı açısından oldukça hassas bir konudur. Örneğin; hastanın kalp krizi geçirdiği bilgisinin tıbbi personellere iletilmemesi ölümcül sonuçlara sebep olabilir. Ayrıca

KVAA'lar insan vücuduna implante edilerek ya da giyilerek kullanılmaktadır. İmplante edilerek kullanılan KVAA'ların insan vücuduna yerleştirilebilmeleri için ek bir cerrahi girişim gerekmektedir. Bu durumda implante KVAA'ların olabildiğince uzun çalışmasını sağlamak, çok daha elzem bir ihtiyaçtır. Ancak bataryaları değiştirme veya yeniden doldurma ihtiyacı, sadece implante edilmiş KVAA'lar için değil, bütün KVAA'lar için istenmeyen bir maliyete neden olmaktadır.

Bu tez kapsamında; olay-odaklı ölçüm yapmasından dolayı veri üretim hızı belirsiz olan bir ağın ömrünün, en iyi seviyeye ulaşmasını amaçlayan bir gürbüz en iyileme modeli oluşturulmuş ve en iyi ağ ömrüne sahip tasarımlar elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca çoklu yollar üzerinden veri iletimine izin verilerek tek bir düğümün veri iletiminde kritik olmasının, dolayısıyla tek bir düğümün aşırı yüklenmeyle enerjisinin erken tükenmesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen gürbüz model üzerinde değerlendirmeler yapabilmek için KAA türlerinden KVAA, olay odaklı ölçüm yapılabilmesi nedeniyle uygulama alanı olarak seçilmiştir.

KVAA bünyesinde bulunan algılayıcı düğümlerin batarya ömürlerini optimize etme amacıyla olay-odaklı veri üretme/gönderme metodu benimsenmektedir. Yani düğümler için standart durum önceden tanımlanır ve tanımlı bu şartlar sağlandığı sürece ilgili düğümler uyku halinde olurlar. Uyku halinde enerji harcamalarını minimumda tuttuklarından tasarruf yapmış olurlar. Ardından tanımlı standart şartların dışında bir olay gerçekleştiğinde hemen veriyi BS'ye iletirler. Böylelikle her veriyi merkeze göndererek fazla enerji harcamaktan kaçınmış olurken önemli verinin de kaybolmamasını sağlarlar. Olay-odaklı bu ölçüm KAA teknolojisinde de kullanılmaktadır, ancak KVAA teknolojisinde daha çok benimsenmektedir ve biyosensörler genellikle olay-odaklı çalışmaktadır. Batarya ömründen tasarruf için geliştirilen bu çözümün sonucunda trafik yoğunluğu belirsiz hale gelmektedir. Algılayıcı düğümler buldukları yere göre birim sürede farklı miktarda veri üretirler. Algılayıcı düğümlerin veri üretebilmeleri ancak ilgili fizyolojik olguların oluşmasıyla mümkündür. Yani bütün düğümlerin birim zamanda eşit miktarda veri üretmesi gerçek hayatta pek olası değildir, üretilen veri miktarı fizyolojik olguların oluşma durumuna göre değişiklik gösterir. Algılayıcı düğümler fazla veri sezdiğinde ve bu veriyi merkeze ilettiklerinde daha fazla enerji harcarlar. Bu durum klasik deterministik modellemede benimsenen verinin net bilindiği varsayımıyla temelden çelişmektedir [8].



Belirsiz koşullar altında karar verebilmek için geliştirilmiş çeşitli matematiksel modelleme yaklaşımları literatürde yer almaktadır. Bu yaklaşımlardan biri olan gürbüz en iyileme, bazı parametreler için veri belirsizliğinin dikkate alındığı optimizasyon problemleriyle ilgilenen bir teoridir [9]. Belirsizlik, stokastik programlamada olduğu gibi bir olasılık dağılımıyla da ifade edilebilir. Ancak olasılık dağılımını belirlemek için ağ hakkında yeterli bilgi ve tecrübeye sahip olmak gerekmektedir. Neticede her ağ için bu bilgiye sahip olmak her zaman pek mümkün değildir. Dolayısıyla ağ performansı bakımından belirleyici olan bütün girdi verilerinin, yeni kurulan ya da yeterince tecrübe edilmemiş ağlarda kesin olarak bilindiği veya olası değerlerine dair olasılık dağılımlarının belirlenebileceğini varsayarak elde edilen çözümler gerçekte etkin olmayabilir.

Gürbüz programlamadaki motivasyon, problem parametrelerindeki olası değişiklikleri dikkate alarak her durumda geçerli bir çözüm oluşturmaktır. Bu amaçla olası en kötü, yani amaç fonksiyonu değerini en olumsuz yönde etkileyecek, parametre değerlerinin gerçekleşmesi durumunda dahi iyi bir sonuç bulmaya çalışılmaktadır. Parametrelerdeki değişiklik, ortaya çıkabilecek tüm değerlerin bir belirsizlik kümesi tanımlanması ile ifade edilmektedir. Bu belirsizlik kümesinin yapısına göre problem farklı yapıya sahip olabilmektedir. Bu tez çalışmasında çokyüzlü bir küme tanımı kullanılacaktır. Yani belirsizlik kümesinin sonlu sayıda doğrusal eşitsizlik ile tanımlanan, sınırlı ve boş olmayan bir küme olduğu durum incelenecektir.

Belirsizlik kümesinin geniş olması durumunda daha temkinli bir karar oluşturulması beklenir. Bunun nedeni dikkate alınması gereken parametre senaryolarının daha fazla olmasıdır. Modelin gürbüzlük seviyesini, yani dikkate alınan olası senaryoların sayısını, artırdıkça ortalama değerler baz alınarak belirlenen deterministik en iyi sonuçtan feragat edilmesi söz konusudur. En iyi sonuçtan verilen bu ödün “gürbüzlüğün bedeli” olarak isimlendirilmektedir. En kötü durumu tanımlarken bütün parametrelerin en kötü değeri alacağını varsaymak çok kötümser bir yaklaşımdır. Bertimas ve Sim (2004) bu sebeple bütün parametreler yerine  $\Gamma$  tane parametrenin en kötü değeri aldığı,  $\Gamma$ -gürbüz en iyileme olarak isimlendirilen yaklaşımı geliştirmiştir. Böylelikle modellerin gürbüzlük düzeyine karar vermek mümkün olmaktadır [10].

Uzun süre çalışması beklenen KVAA'nın aniden çalışmayı bırakması veya vücudun bir bölümü ile bağlantısının kopması sebebiyle veri alınamaması çok önemli bir problem haline gelmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında en kötü durum için bile

hazırlıklı olarak iyi bir sonuç elde etmek amacıyla Bertimas ve Sim (2004)'in yaklaşımını benimseyen  $\Gamma$ -gürbüz bir matematiksel model tasarlanmıştır. Bu noktada sensörlerin birim zamanda çevrelerinden sezdikleri veri miktarının yani veri üretim hızının belirsizliği ele alınmış ve tasarlanan deterministik model bu belirsizliğe karşı daha dayanıklı hale getirilmeye çalışılmıştır. Algılayıcı düğümlerin birim zamanda buldukları ortamlardan sezdikleri veri miktarları farklılık gösterebilir. Ortam özelliklerinin yanı sıra sensörlerin performanslarına bağlı olarak da beklenenden farklı oranda veri sezilmesi söz konusu olabilir. KVAA'lara gelindiğinde bir sensörün veri sezme oranı fizyolojik olguların oluşumu ile de yakından ilgilidir. Bu bağlamda KVAA kurulurken kullanılan parametrelerin değerlerinin her zaman kesin olarak bilinebileceğini varsaymak, geliştirilen tasarımı gerçekçi olmaktan uzaklaştırabilir. Bu noktada özellikle sezilen veri miktarındaki farklılık, sensörlerin ilettikleri veri miktarlarının ve dolayısıyla da enerji harcamalarının beklenenden farklı şekilde gerçekleşmesine neden olabilir. Sensörlerin kısıtlı enerjileri olduğu düşünüldüğünde, sarfiyattaki farklılık ağın fonksiyonel ömründe ve dolayısıyla da güvenilirlik ve müsaitlik boyutlarında da beklenen ağ performansına ulaşamamasına neden olabilir. Bu motivasyonla mevcut tez çalışmasında sensörlerin veri sezme oranlarındaki farklılığın gürbüz en iyileme yöntemleri ile modellenmesine çalışılmıştır. Böylece olabilecek durumların hiçbirinde kötü performans göstermeyecek ve ağ ömrü bakımından en zorlayıcı sezme oranı senaryosunda da optimal performansı gösterecek iletim yollarının belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasının ana başlıkları altında öncelikle Bölüm 2'de konuyla ilgili incelenen literatür çalışması verilmiştir. Bölüm 3'te problem tanımı yapılmakta ve hem geliştirilen deterministik modelden hem de gürbüz modelden bahsedilmektedir. Bölüm 4, CPLEX 12.8 ticari çözücüsü kullanılarak yapılan performans analizi çalışmalarını içermektedir. Yapılan testlerde modeller ağ ömrü açısından karşılaştırılmakta ve farklı metriklerin ağ ömürleri üzerindeki etkisi incelenmektedir. Son olarak Bölüm 5'te elde edilen sonuçların tamamı özetlenerek çalışmanın genel bir değerlendirmesi sunulmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması kapsamında öncelikle KVAA'ların ağ mimarisini ve kendilerine has özelliklerini içeren derleme makaleleri taranmıştır. KVAA'ların mevcut en son teknolojileri, en son standartlara ve yayınlara dayanarak bu çalışmalarda özetlenmektedir. Ayrıca KVAA teknolojisinde araştırmaya açık konular ve yaşanan zorluklar belirtilmektedir [11-13].

Ghamari vd. (2016)'da, KVAA sistemlerinin hızlı gelişimini destekleyebilecek mevcut düşük güçlü iletişim teknolojilerini karşılaştırmaktadır. Temel olarak yaşlı veya kronik hastaların konut ortamlarında uzaktan izlenmesi ile ilgili bilgiler derlenmiştir. Ayrıca düşük güç tüketimi, güvenilirlik, gecikme süresi, veri hızları ve güvenlik konularına özel olarak odaklanılmaktadır [11].

Kadel vd. (2019)'da, KVAA teknolojisinde hangi parametrelerin dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir. Ek olarak güvenilirliğin nasıl ölçüldüğünü ve araştırmanın farklı veri türleri için farklı güvenilirlik türleri ve gecikme gereksinimlerinden bahsetmektedir [12].

Qu vd. (2019)'da, KVAA'larda enerji verimli yönlendirme protokollerini inceleyerek sınıflandırmış ve farklı yönlendirme protokollerinin avantaj ile dezavantajlarını karşılaştırmıştır. Yönlendirme protokolünün; enerji verimli, güvenilir ve düşük maliyetli olmasının KVAA'ların tasarımında önemli bir rolü olduğunu belirtmektedir [13].

KVAA, KAA'nın özel bir uygulama dalı olmasından dolayı iki teknoloji arasında benzerlikler bulunmaktadır ancak birçok farklılık da mevcuttur. Qu vd. (2019)'da yaptıkları çalışmada iki teknolojinin ayrıntılı bir karşılaştırmasını sunmuştur ve bu farklılıklar Çizelge 2.1'de gösterilmektedir [13].

**Çizelge 2.1 : KAA ve KVAA arasındaki karşılaştırma [13].**

<b>Problem</b>	<b>KAA</b>	<b>KVAA</b>
Aralık	Çevresel izleme (m/km)	Vücut aralığı (cm/m)
Düğüm Sayısı	Yüzlerce	Düzinelerce
Düğüm Boyutu	Özel gereklilik yok	Ne kadar küçük o kadar iyi
Düğüm Görevi	Tek/Zamanlanmış görevler	Birçok
Veri Hızı	Homojen	Heterojen
Veri Kaybı	Tolere edilebilir	Tolere edilemez
Düğüm Yerleşimi	Kolay	Zor
Biyouyumluluk	Gerekli değil	Gerekli
Düğüm Ömrü	Aylar/Yıllar	Ne kadar uzun o kadar iyi
Topoloji	Sabit	Değişken
Düğüm Enerjisi	Sınırlı, ancak değiştirilebilir	Sınırlı ve geri doldurulamaz
Emniyet	Düşük	Çok yüksek
Standart	IEEE 802.11.4	IEEE 802.15.6

KVAA, insan vücuduna uygulanan bir teknolojidir, bu nedenle ağ ortamı çok karmaşıktır. Toplanan fizyolojik veri insan yaşamı ve sağlığı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğundan, KVAA için yönlendirme tasarlamak çok önemlidir. Çizelge 2.1'deki analize dayanarak, yönlendirme tasarımında aşağıdaki problemler ve zorluklar öne çıkmaktadır:

- Topolojik yapının dinamik değişiklikleri: Kablosuz iletim; vücut yüzey iletimini, vücut iletimini ve boş alan iletimini içerir. Kanal koşulları karmaşıktır. İnsan hareketinin neden olduğu gölge etkisi de dikkate alınmalıdır. Düğümler arasındaki mesafe ve göreceli konum, uzuvların

hareketiyle de deęiŖecektir. Topolojinin zaman içindeki deęiŖimini ve olası problemleri göz önünde bulundurarak, güvenilir yönlendirme mekanizması dinamik topolojiye uyum sağlayacak Ŗekilde tasarlanmalıdır [14] .

- Enerji verimliliği: KVAA bünyesindeki, bazı sensörler vücuda implante edilmeli ve ameliyatla deęiŖtirilmelidir. Yalnızca mikro pillerle güç sağlamak yeterli değildir. Artık güç kaynağı için RF (Radyo Frekans), EM (Elektro Manyetik) veya enerji hasadı kullanılabilse de, kaynakta enerji verimliliği tasarımı da yapılmalıdır. Bu nedenle, ağın ömrünü olabildiğince uzatmak için yönlendirme tasarımında tek düğümün enerji verimliliği ve tüm ağın enerji dengesi dikkate alınmalıdır [13].
- Düğüm sıcaklığı: Düğümler alıŖırken ısı üretirler ve bu da insan vücudunun önemli dokularına ve organlarına zarar verebilir [15,16]. Bu nedenle, bu tür durumlardan kaçınmak için yönlendirme tasarımında düğümlerin sıcaklığı hesaba katılmalıdır.
- eŖitli Qos gereksinimleri: KVAA'daki düğümler, acil durum verisi, gecikmeye duyarlı veri, güvenilirliğe duyarlı veri ve genel veri gibi farklı veri türlerinin Qos gereksinimlerini sağlamak için farklı Ŗekilde iŖlenmesi gereken farklı veri türleri üretir [13].

Energileri sınırlı olan KAA'larda sistemin genel verimliliğini artırmak temel amaçtır. Bu doğrultuda literatürde bulunan alıŖmalar tketlenen enerji miktarını azaltmak için genellikle  optimizasyon problemine odaklanmaktadır. Bazı makaleler, konuyu enerji sınırlı KAA'lardan elde edilen veri miktarını maksimize etme problemi olarak ele almaktadır [17-20]. Bazı makaleler ise, maksimum veri elde etme ile yakından ilgili bir problem olan belirli bir miktarda veriyi elde etmek için kullanılacak minimum enerji miktarını belirleme problemini incelemektedir [17, 21]. Diğer yandan amacın ağ ömrünü maksimize etmek olduğu problem ise [22-26]'da incelenmektedir.

Fei vd. (2016)'da ağın enerji yayılımı, paket kayıp oranı, kapsama alanı ve ağ ömrü gibi eŖitli optimizasyon kriterlerini, çok Amaçlı Optimizasyon (Multi-Objective Optimization-MOO) tekniğini kullanarak ele alan alıŖmalar üzerine bir derleme yapmıŖtır. Bu derleme alıŖması sonucunda ilgili metrikler hem ayrı ayrı deęerlendirilmiŖ hem de birbirleri ile iliŖkisi incelenmiŖtir. Bu kapsamda sunulan enerji verimliliğini ele alan makalelerin bir kısmı izelge 2.2'de sunulmuŖtur [27].

**Çizelge 2.2 :** Enerji verimliliğini ele alan makaleler [27].

Teknik Amaç	Amaç Fonksiyonu	Algoritma	Sensör Türü	Ref.
Yerleştirme	Min. enerji miktarı, Min. gecikme	Çarpışmadan kaçınma protokolü	Homojen-sabit	[28]
Veri Toplama	Min. enerji miktarı, Min. gecikme	Dinamik programlama	Heterojen-sabit	[29]
Veri Toplama	Min. enerji miktarı, Min. gecikme	Tabu arama	Heterojen-sabit	[30]
Veri Toplama	Min. enerji miktarı, Min. gecikme	Tamsayılı Programlama	Homojen-sabit	[31]
Rotalama	Maks. ağ ömrü, Maks. sistem verimliliği	Alt gradyan	Heterojen-sabit	[32]
Mac Rotalama	Maks. ağ ömrü, Maks. veri akışı	Mac Protokol	Homojen-sabit	[33]
Optimal akış kontrolü	Maks. ağ ömrü, Maks. sistem verimliliği	Primal-dual algoritma	Homojen-sabit	[34]

KAA'larda, yüzlerce hatta binlerce algılayıcı düğüm geniş alanları kaplar, önemli ölçüde yedeklilik sunar. Bir diğer deyişle takip edilen alanın bir bölümüyle ağın iletişiminin kesilmesi için KVAA'lara göre genellikle çok daha fazla düğümün ölmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bir sensörün enerjisinin tükenmesi aynı alanı gözlemleyebilen başka sensörlerin de olabilmesi nedeniyle telafi edilebilmektedir. Aksine, KVAA'lar insan vücuduyla sınırlı bir alanı kaplar ve sayıları KAA'lara göre

çok daha azdır. Literatürde KVAA'larda ağ ömrünü artırmaya yönelik çalışmalar ise [35-40]'da incelenmektedir.

Ghosh vd. (2005)'te, KVAA düğümleri arasındaki vücut içi iletişimin, enerji verimliliği ile paket hata oranını analiz etmekte ve termal enerji hasat tekniğini kullanarak vücut içi iletişim performansını artırmaya çalışmaktadır. Termal enerji hasadı tekniğinin kullanılmasından sonra, bir düğümün ek paketler iletebildiğini ve düğümün daha uzun süre canlı kaldığını gözlemlediklerini belirtmektedir [26].

Tsouri vd. (2012)'de, enerji tüketimini dengelemek ve KVAA'larda ağ ömrünü artırmak için özelleşmiş yeni bir bağlantı maliyet fonksiyonu ile Dijkstra algoritmasına dayalı küresel bir yönlendirme protokolü önermektedir. Ağ ömrü, tek bir sensörün güç kaynağını ağ başlangıcından itibaren tüketmesi için geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada mevcutta enerjiye sahip başka düğümler varken tek bir düğümün pilini tüketmemesi gerekir düşüncesinden yola çıkarak önerilen bağlantı maliyeti işlevi tüm düğümlerin aynı anda pillerini tüketmesini sağlamak için tasarlanmıştır ve yazarlar ağ ömründe önemli bir artış elde ettiklerini belirtmektedir [35].

Reusens vd. (2009)'da, ağ ömrünü üzerinde tek-atlamalı ve çok-atlamalı iletimin etkisini incelemiştir. Bu incelemenin ardından tek-atlamalı iletimde, BS'den daha uzaktaki düğümlerde enerji tasarrufu için açık bir alan olduğunu, bu düğümlerin fazla enerji tüketerek önce öldüğünü gözlemlemiştir. Bununla birlikte, çok-atlamalı iletimde, BS'ye yakın düğümlerin daha fazla veri ilettiklerinden önce öldüğünü gözlemlemiştir. Bu gözlemlere dayanarak, ağ ömrünü önemli ölçüde iyileştirmek için röleleri kullanarak, aktarma ve işbirliği olmak üzere iki çözüm önermektedir. İlk çözüm, özel röle düğümlerinin kullanılmasını kapsamaktadır. Bunlar sadece trafik aktarımını idare eden ve herhangi bir algılama yapmayan özel düğümlerdir, dolayısıyla iletişim amaçları için daha fazla enerji mevcuttur. Ana fikir, röle düğümlerinin uygun şekilde yerleştirilmesinin, tek-atlamalı trafik durumunda BS'den uzaktaki düğümler için performans açığını kapatabileceği ve çok-atlamalı trafik durumunda yükü BS'ye daha yakın düğümlerden dağıtabileceğidir. İkinci çözümde ise röle düğümler yerleştirilmeden diğer düğümlerin, veriyi bir düğümden BS'ye iletmek için işbirliği yapmasıdır. Tek-atlamalı bir topolojideki enerji kullanımını bir çok-atlamalı topolojideki enerji kullanımıyla karşılaştırıldığında, BS'ye yakın olan sensörlerde çok sayıda artık enerji olduğunu

belirtilmektedir. Bu enerji kaynağı kullanılırsa, röle cihazlarında olduğu gibi bu düğümlerin enerji tüketiminin azaltılacağını vurgulanmaktadır [36].

Ehyaie vd. (2009)'da sensörlerdeki enerji tükenme oranını azaltmak için KVAA ile birlikte bir röle ağının kullanılmasını önermektedir. İletişimin büyük bir kısmının, çok-atlamalı iletim ile röle düğümleri tarafından gerçekleştirildiği ve sensör düğümlerinin, hiçbir geçiş olmadan kısa mesafeler üzerinden iletim yaptığını belirtilmektedir. Röle sayısının üst sınırını; vücudun farklı bölümlerinin yol kaybı katsayısına, sensör düğümlerinin sayısına ve bunların BS'ye olan mesafesinin dikkate alındığı bir eşitlik ile hesaplamaktadır. Doğru röle sayısını hesaplayarak ağın tükettiği toplam enerji miktarı hesaplanmaya çalışılmaktadır [37].

Chai vd. (2014)'te, KVAA'lar için ağ ömrü maksimizasyonu tabanlı ortak bir kaynak tahsisi şeması önermektedir. Ağ ömrü optimizasyon probleminin, kaynak tahsisine tabi olarak sensör düğümlerinin kalan enerjisini maksimize etmeye eşdeğer olduğunu söylemektedir. Sonuç olarak optimal bir ortak iletim modu, röle seçimi, iletim gücü ve zaman dilimi tahsis stratejisi elde ettiklerini ve ağ ömrünü en üst düzeye çıkarabildiklerini belirtmektedir [38].

Wu vd. (2018), enerji hasadı modülü ile hasta tarafından taşınan sensörlerin kişisel bir cihaza veri iletebildiği, yenilenebilir enerji ile çalışan bir KVAA sistemi tasarlamaktadır. Enerji tüketiminden tasarruf etmek için uyku modunu kullanmaktadır. Problemi Lyapunov optimizasyon yaklaşımını kullanarak pil yönetimi, toplama hızı kontrolü ve iletim gücü tahsisi olmak üzere üç grupta ele alarak enerji yönetimini gerçekleştirdiklerini belirtmektedir [39].

Yaqoob vd. (2019), KVAA'larda daha uzun ağ ömrü elde etmek için bir protokol önermektedir. Çalışmalarında protokolün yaşam süresini iyileştirmenin yanı sıra çıktı ve artık enerji ortalamasını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Gerekli sonuçlara ulaşmak için Poisson dağılımı ve denge modeli teknikleri kullanılmıştır. Poisson dağılımına sahip sabit bir düğüm ve toplu rastgele dağıtım ile çok-atlamalı topolojinin kombinasyonunun ağ ömrünün iyileştirilmesi için en iyi kombinasyon olduğunu belirtmektedir [40].

Literatürde KVAA'nın matematiksel bir model ile en iyi şekilde tasarlanması problemi ile ilgili çok sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalardan biri Elias ve Mehaoua (2012) tarafından yapılmıştır. Bir KVAA tasarım problemini modellemek ve



çözmek için matematiksel optimizasyon kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında ağ ömrünü uzatmak amacıyla ortak veri yönlendirme ve röle konumlandırma problemi için karma tamsayıli deterministik bir model önerilmektedir. Ortaya çıkan sorun, ticari bir çözümleyici ile çözülmekte ve çözücünün performansını özel olarak iyileştirmek için yeni bir algoritma önerilmektedir [41].

Zhang vd. (2017)'de, ağdaki düğümlerin minimum ömrünü maksimize etmek için her bir düğümün hem enerji tüketim oranını hem de artık enerjiyi dikkate alan bir optimizasyon problemi formüle ederek bir röle seçim şeması önermektedir. Bu NP-zor problemi ticari çözücüler ile çözemediklerini belirterek sezgisel bir çözüm tasarlamaktadır [6].

Bu çalışma kapsamında, KVAA'nın ağ ömrünü en iyilemek amacıyla gürbüz optimizasyon metodolojisi kullanıldığından ilgili literatür incelenmiştir. Gürbüz En İyileme'de temel düşünce; belirsiz veri vektörünün, tanımlı bir belirsizlik kümesindeki herhangi bir nokta (senaryo) olabileceğini varsaymak, belirsizlik kümesinden olası herhangi bir senaryo için tüm kısıtları karşılayan bir çözüm bulmak ve en kötü durumda amaç fonksiyonu değerini optimize etmektir [42]. Gürbüz optimizasyon metodolojisi, optimallikte yalnızca sınırlı bir kayıp ile en kötü durum performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu durum, dikkate alınan belirsizlik altında, değişkenliğin gürbüz çözüm üzerindeki etkisinin azalmasının bir sonucudur. Ben-Tal ve Nemirovski [43, 44] ve El Ghaoui vd. [45, 46] veri için belirsizlik kümelerinin elipsoid olmasına izin vererek gürbüz çözümlerin korunaklılık seviyelerini incelemekte ve veri belirsizliği altında dışbükey optimizasyon problemlerini çözmek için bazı verimli algoritmalar önermektedir. Bertsimas vd. [10, 47] ise, deterministik bir optimizasyon modelinde gürbüz çözümdeki korunaklılık düzeyini kontrol etmek için farklı bir yaklaşım olan  $\Gamma$ -gürbüz programlamayı önermekte ve gürbüzlüğün bedelini daha iyimser bir yaklaşımla azaltmaya çalışmaktadır. Gürbüz optimizasyonun; portföy optimizasyonu [48], tedarik zinciri kontrolü [49], Markov Karar Süreçleri [50] ve genel ağ akış sorunları [51] gibi çok çeşitli ve farklı optimizasyon problemleri için literatürde uygulamaları vardır.

Bu tez çalışması esnasında uygulama alanı olarak seçilen KVAA'lar için, matematiksel model ile optimizasyon problemleri dahi yaygın çalışılmamışken olay-odaklı KVAA'lardaki veri belirsizliğini dikkate alan optimizasyon problemleri ise literatürde çok az sayıda çalışmada görülmüştür.

Flushing ve Di Caro (2013), KAA'lardaki röle düğümü yerleştirme probleminin büyük ölçüde dinamik olarak değişebilen ve önceden kesin olarak bilinmeyen veri trafiği modellerine bağlı olduğunu belirtmektedir. Çalışmalarında veri trafiğindeki belirsizlik altında performans iyileştirmesi için röle düğümü yerleştirme problemine gürbüz bir optimizasyon metodolojisi önermektedir. Optimalliğe ulaşmak için, sonuçta ortaya koydukları gürbüz optimizasyon problemini çözmenin hesaplama açısından son derece pahalı olacağını belirtilmekte ve bu nedenle, gürbüzlükten ödün vermeden hesaplama maliyetlerini önemli ölçüde azaltmayı amaçlayan ayırt edici bir gürbüzlük ölçüsü önerilmektedir. İlgili optimizasyon problemi genetik algorithmadan faydalanılarak çözülmüştür [52].

D'Andreagiovanni ve Nardin (2015), röleli KVAA tasarımında trafik belirsizliğini ele almak ve tek yöllü yönlendirmeyi benimsemek için gürbüz bir model sunmaktadır. Ortaya çıkan gürbüz optimizasyon probleminin, en son teknoloji bir optimizasyon çözücüsü için bile zorlayıcı sonuçlanabileceğini savunmakta ve değişkenlerin sezgisel bir şekilde sabitlenmesine rehberlik etmek için doğrusal gevşetmelerden yararlanan değişken komşu arama algoritması önerilmektedir [53].

Bu bölümde öncelikle KVAA teknolojisine ait derleme makalelerinden kısaca bahsedilmiş daha sonra KVAA'nın, KAA teknolojisinden ayrılan noktalarına değinilmiştir. KVAA tasarımlarında dikkat edilmesi gereken zorluklar listelenmiştir. Ardından KAA sistemlerindeki ağ ömrü problemlerini ele alan çalışmalara yer verilmiştir. KVAA sistemlerinde ağ ömrü ile ilgili bulunan kısıtlı sayıdaki çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu çalışmada veri üretimindeki belirsizlik ele alınacağından kullanılan gürbüz optimizasyon metodolojisi ayrıca incelenmiştir. Literatürde yapılan geniş araştırmalara dayanarak bilindiği kadarıyla D'andreagiovanni ve Nardin'in (2013)'teki çalışması ile Flushing ve Di Caro'nin (2015)'teki çalışması dışında KVAA alanında gürbüz programlama kullanılan başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bir sonraki bölümde ise tez çalışması kapsamında ele alınan problem tanımı yapılarak varsayımlar ve ilgili parametreler verilecektir. Bu varsayımlar ve parametreler ışığında enerji verimli bir model sunularak veri üretim miktarındaki belirsizliğe karşı korunaklı hale getirilmeye çalışılacaktır.

### 3. PROBLEM TANIMI VE EN İYİLEME MODELLERİ

Bütün KAA uygulamalarında olduğu gibi bir KVAA'nın sahip olması istenilen temel özellikler; işlevsellik, dayanıklılık, güvenilirlik ve diğer sistemlerle uyumlu çalışabilirlik olarak söylenebilir. Ağ bünyesinde yer alan algılayıcıların olabildiğince küçük ve hafif olmaları, bireylerin rahatı ve KVAA'nın taşınabilirliği açısından çok önemlidir. Ancak hacimleri küçültülen bu algılayıcı düğümlerin, enerjilerini temin ettikleri pillerin de hacimleri doğru orantılı olarak küçültülmüş olmaktadır. Pillerin kapasitelerinin hacimleri ile doğru orantılı olmasından ötürü KAA için çözülmesi gereken temel konulardan biri olan enerji verimli protokollerin tasarımı ile ağ ömrünün uzatılması, KVAA'lar için çok daha kritik bir konu haline gelmektedir [11]. Bu nedenle algılayıcı düğümlerin ömürlerinin, pil boyutları artırılmadan, uzatılabilmesi için enerji tüketiminin en aza indirgenmesi gerekmektedir. KVAA sisteminde enerji verimliliği, ağ ömrünün daha uzun olmasına imkân tanınmasıyla birlikte algılayıcı düğümlerinin çok ısınarak insan derisine zarar vermelerinin engellenmesi bakımından da kritiktir.

Yapılan literatür taraması sonucunda KAA'larda ağ ömrünün en iyilenmesinin ele alındığı pek çok çalışmaya ulaşılmıştır. Ancak bu çalışmalarda çoğunlukla gerçek hayattaki parametrelerin belirsizliği dikkate alınmamış ve genellikle beklenen sistem davranışı düşünülerek bütün parametre değerlerinin kesin olarak bilindiği varsayılmıştır. Gerçek hayatta parametrelerin her zaman net olarak bilinmeyeceği, parametre değerlerinin belirsiz olabileceği ya da beklenen değerlerinden sapmalar gösterebileceği düşünüldüğünde yapılan bu çalışmaların yetersiz olduğu ve bu alanda bir açık olduğu görülmüştür. Bir sensör ağının gerçek bir uygulamada nasıl çalıştığını etkileyebilecek çeşitli belirsizlik kaynakları vardır. Örneğin, düğümlerin gerçek konumu beklenenden sapabilir, iletişim kanalının kalitesi zaman içinde değişebilir, üretilen veri miktarı değişiklik gösterebilir veya radyo devresinin enerji tüketim oranı beklenen değerden sapabilir. Bu belirsizlikler enerji tüketimini ve dolayısıyla ağın verimliliğini etkileyebilir. Bir KAA'nın operasyonlarının planlanmasındaki belirsizliği göz ardı etmenin bedeli uygulamaya bağlı olarak değişebilir. Ancak optimize edilmiş uygulamalar, problem parametreleri değişirse verimsiz hale gelebilir.

Belirsizliğin söz konusu olduğu bir problemde daha iyi bir strateji oluşturmak amacıyla, parametrelerin belirli bir değeri için optimal olmayan ancak olası tüm belirsizlik sonuçları için etkili olan bir çözüm geliştirilmelidir. Bu doğrultuda, bu tez çalışması kapsamında önce bütün parametrelerin kesin olarak bilindiği varsayılan deterministik bir model sunulmuş, daha sonra bu model veri üretim hızındaki belirsizlik göz önünde bulundurularak  $\Gamma$ -gürbüz optimizasyon metodolojisiyle ilgili belirsizliğe karşı gürbüz hale getirilmiştir. Deterministik modeldeki bütün parametrelerin kesin olarak bilinir varsayımının dışına çıkıldığında, modelin ortaya çıkabilecek performansı hakkında tahminde bulunulamamaktadır. Model halen iyi bir performans gösterebileceği gibi yetersiz performans göstermesi de olasılıklar dahilindedir. Bu sebeple gürbüz bir model geliştirilerek parametre değerlerindeki değişikliklere karşı daha dayanıklı bir sistem oluşturulmaya çalışılmıştır. Gerçek hayat uygulamalarındaki belirsiz ortamın, model üzerindeki etkisi geliştirilen bu dayanıklı tasarımla azaltılmaya çalışılmıştır.

### 3.1 Varsayımlar ve Parametreler

Bu çalışmada incelenen KVAA,  $G = (N, A)$  yönlü çizgesi ile temsil edilmektedir. Burada  $N$ , bütün algılayıcı düğümleri ve BS'yi içeren düğüm kümesidir. Algılayıcı düğümlerin kümesi ise  $N^* = N \setminus \{BS\}$  ile gösterilmektedir. Her bir algılayıcı düğümün kendi iletim alanı içerisindeki algılayıcı düğümler ile aralarındaki yönlü ayrıtların kümesi ise  $A$ 'dır. Buna göre  $i \in N^*, j \in N: i \neq j$  çifti için  $(i, j) \in A$  olabilmesi, iki düğüm arasındaki  $d_{ij}$  mesafesinin  $i$  sensörünün iletim menziline uzun olmaması durumunda mümkündür. Ağda bir tane sabit konumlu BS ile çok sayıda algılayıcı düğüm yer almaktadır. Enerji bakımından sınırsız kapasiteye sahip olan BS dışında her  $i \in N^*$  algılayıcısı  $B_i$  ile gösterilen sınırlı miktarda başlangıç enerjisine sahiptir. Genel durumda KVAA heterojen yapıda olduğunda her bir algılayıcı düğüm kendi donanımsal özelliğine göre bünyesinde bulundurduğu bataryadan enerji temini yapmaktadır. Algılayıcı düğümler sahip oldukları enerjiyi; çevrelerindeki veriyi sezmek, sezilen veriyi iletim menzillerindeki diğer algılayıcı düğümlere veya BS'ye iletmek ve diğer algılayıcı düğümlerden kendilerine gönderilen veriyi almak için kullanırlar. Diğer yandan  $i \in N^*$ 'ın bir birim veriyi  $j \in N \setminus \{i\}$ 'ye tek atlamalı yol yani  $(i, j) \in A$  üzerinden iletmesi için harcaması gereken enerji  $PTX_{ij}$  olarak ifade edilmektedir. Tez çalışmasında kullanılacak modele göre  $PTX_{ij} = \rho +$

$\epsilon d_{ij}^\beta$  ilişkisi vardır ve  $\rho$  elektronik devrelerde harcanan enerji miktarı,  $\epsilon$  verici verimlilik katsayısı,  $\beta$  güç yitim katsayısı ve  $d_{ij}$  de  $i$  ve  $j$  algılayıcıları arasındaki Öklid mesafesidir [54]. Ayrıca  $i \in N^*$ 'ın diğer algılayıcı düğümlerden kendisine gönderilen birim veriyi almak için harcadığı sabit enerji ise  $PRX$  ile gösterilmektedir. Ayrıca her  $i \in N^*$  algılayıcısının birim zamanda ürettiği veri miktarı  $S_i$  ile gösterilmektedir. Deterministik modelde  $S_i$  değerlerinin bilindiği varsayılırken gürbüz modelde bu parametreler için bir belirsizlik kümesi tanımlanmaktadır. Belirsizlik kümesi için sonlu sayıda doğrusal eşitsizlik ile tanımlanan, sınırlı ve boş olmayan çokyüzlü bir küme tanımı kullanılmaktadır. Buradaki veri üretim hızındaki belirsizliğin dayanağı, bir algılayıcı düğümün veri sezebilmesi için fiziksel sinyalin oluşmasının gerekmesidir. KVAA ile farklı parametreler farklı bölgelerden ölçüldüğünden her fiziksel sinyal eşit oranda meydana gelmemektedir. Son olarak  $i \in N^*$  algılayıcısının ömrü  $T_i$ , algılayıcının sahip olduğu başlangıç enerjisi  $B_i$ 'nin tükendiği zamanı ifade etmektedir. Ağın ömrü  $T$ 'nin ise enerjisi ilk olarak tükenen algılayıcı düğümün yaşam süresine eşit yani  $T = \min\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  olduğu varsayılmaktadır. Sonuç olarak, her iki modelde de en iyilenecek ve  $T$  ile gösterilen ağ ömrü, ağdan ilk ayrılan, yani enerjisi ilk olarak tükenen algılayıcı düğümün aktif yaşam süresi ile ifade edilmektedir.

### 3.2 Deterministik Model

Bir KAA bünyesindeki algılayıcı düğümler, kendi sezme menzilleri içerisindeki fiziksel veriyi toplarlar ve daha sonra çoklu veya tekli yollarda başka düğümler üzerinden ya da doğrudan BS'ye iletirler. Bu iletim işlemi ilgili düğüm ya da BS yalnızca iletim menzili içerisindeyse gerçekleştirebilirler. Ağın sağlıklı veri sağlayabilmesi için elde edilen bütün verinin eksiksiz olarak BS'ye iletilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması için oluşturulan deterministik modelin temel amacı, algılayıcı düğümlerin başlangıçta sahip oldukları sınırlı enerjilerini en verimli şekilde kullanmalarını sağlayarak ağın ömrünün en iyilenmesi ve aynı zamanda ağda üretilen tüm verinin BS'ye iletilmesidir.

$$\mathit{maks} T \quad (3.1)$$

öyle ki:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}^k = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i = k \\ -1 & \text{eğer } i = BS \\ 0 & \text{diğer } i \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall i \in N, \\ k \in N^* \end{matrix} \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in N^*} \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k S_k T + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k S_k T \right) \leq B_i \quad \forall i \in N^* \quad (3.3)$$

$$0 \leq f_{ij}^k \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A, k \in N^* \quad (3.4)$$

Amaç fonksiyonu (3.1)'de  $T$  ile ifade edilen ağ ömrü en iyilenmektedir. Akış denge kısıtları olan (3.2) ile her bir algılayıcı düğümün sezdiği bütün veriyi arada herhangi bir kayıp olmadan BS'ye iletmesi sağlanmaktadır. Burada  $f_{ij}^k$  akış değişkeni  $k \in N^*$  kaynaklı verinin hangi oranda  $(i,j) \in A$  ayrıtı üzerinden gönderileceğini göstermektedir. Enerji kısıtı olarak tanımlanan (3.3)'te ise bir algılayıcı düğümün  $i \in N^*$  tüm ömrü boyunca veri iletme ve alma sırasında harcadığı toplam enerjinin o algılayıcı düğümün başlangıçta sahip olduğu enerji miktarı  $B_i$ 'yi geçmemesi sağlanmaktadır. (3.4)'te ise akış değişkenleri için işaret kısıtları verilmiştir. Çoklu yol kullanımına (multipath routing) izin verildiği için akış değişkenleri sürekli değerler alabilmektedir.

Enerji kısıtı (3.3)'te  $f_{ij}^k$  ve  $T$  değişkenleri çarpım durumunda olduğundan bu kısıt doğrusal değildir. Bu aşamada fonksiyonel olan bir ağ için  $T > 0$  olacağı bilgisi kullanılarak (3.3)'ün her iki tarafı  $T$ 'ye bölünürse her  $i \in N^*$  için:

$$\sum_{k \in N^*} \left( \sum_{(i,j) \in A} \frac{PTX_{ij} f_{ij}^k S_k T}{T} + \sum_{(j,i) \in A} \frac{PRX_{ji} f_{ji}^k S_k T}{T} \right) \leq \frac{B_i}{T} \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu durumda ağın birim zamana indirgenen enerji kısıtı  $i \in N^*$  için:

$$\sum_{k \in N^*} \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k S_k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k S_k \right) \leq B_i \frac{1}{T} \quad (3.6)$$

olur. Son olarak bu kısıtın sağ tarafındaki ifadeyi de doğrusallaştırma adına yeni pozitif değişken  $Q = 1/T$  tanımlanarak  $i \in N^*$  için:

$$\sum_{k \in N^*} \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k S_k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k S_k \right) \leq B_i Q \quad \forall i \quad (3.7)$$

birim zamana indirgenmiş enerji kısıtı elde edilir. Dolayısıyla tasarlanacak KAA'nın birim zamandaki işleyişini belirleyen yeni doğrusal modelin olurlu bölgesi  $F_D = \{f \in \mathfrak{R}^{|\mathcal{A}| \times |N^*|} : (3.2), (3.4), (3.7)\}$  olur. Burada birim zamana indirgeme yapıldığı için ağ ömrü yani  $T$  değişkeni kısıtlarda yer almamaktadır. Dolayısıyla (3.1)'de *maks*  $T$  olarak verilen amaç fonksiyonu  $Q$  değişkeninin tanımından yola çıkılarak *min*  $Q$  şeklinde değiştirilmiştir. Sonuç olarak birim zaman işleyişi için geliştirilen doğrusal deterministik model  $\min_{f \in F_D} \{Q\}$  olacaktır.

### 3.3 Gürbüz Optimizasyon Modeli

Birçok optimizasyon uygulamasında, problemle ilişkili girdi verilerinin kesin olarak bilindiği varsayımı yapılmaktadır. Ancak bu durum, uygulamada her zaman mümkün olan bir durum değildir. Gerçek hayatta veri; ölçüm hataları, rastgele olmaları veya birçok başka nedenden dolayı belirsizliğe maruz kalır. Bir optimizasyon probleminin çözümü, genellikle veri bozulmalarına karşı yüksek hassasiyet gösterebilmektedir. Bu doğrultuda veri belirsizliğini göz ardı etmek, pratik olmayan uygulamalar için yetersiz veya mümkün olmayan çözümlere yol açabilir [55].

Belirsizlik altında optimizasyon problemlerini ele almak üzere bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar içerisinde en yaygın kullanılan optimizasyon yöntemleri stokastik programlama, dinamik programlama ve gürbüz optimizasyondur. Dinamik ve stokastik programlama yöntemlerini uygulayabilmek için belirsiz girdi verilerinin olasılık dağılımı hakkında her zaman detaylı bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Bu derece detaylı bilgiyi elde etmek her durumda mümkün olmamaktadır. Ayrıca olasılık

dağılımının bilindiği durumlarda bile, gürbüz optimizasyon daha kolay çözümlenebildiğinden cazip olabilmektedir [56].

Gürbüz optimizasyon, en kötü belirsizlik senaryosunda, en iyi amaç fonksiyonuna sahip çözümü bulmayı amaçlar [57]. Sosyter'in 1970 yılında ortaya koyduğu bu yaklaşımda, belirsiz girdi verilerinin belli bir aralıkta dalgalandığı varsayılır ve girdi verilerinin olası en kötü değeri için uygun çözümler üretecek şekilde gürbüz modele denk doğrusal bir model elde edilir. Bu nedenle en kötü durum analizi olarak adlandırılan bu model korunaklı olarak değerlendirilmektedir [58].

Gürbüz optimizasyon uygulanırken iki temel aşama takip edilir. İlk aşama belirsizlik kümelerinin seçimidir. İkinci aşama ise, gürbüz eşdeğer problemin kurulmasıdır. Verideki belirsizliklerin tanımlanması, belirsizlik kümesinin seçimi ile yapılmaktadır. Bu küme genellikle sınırlandırılmış konveks bir küme yapısında olup, belirsiz girdi verilerinin mümkün tüm değerlerini içinde barındırmaktadır. Gürbüz eşdeğer problemleri belirsizlik kümelerine göre oluşturulduğundan farklılık göstermektedir, bu nedenle belirsizlik kümelerinin tanımlanması önem arz etmektedir [59].

Amaç fonksiyonu katsayıları  $c$ , kısıt katsayıları  $A$  ve sağ taraf değerleri  $b$  matrisleri ile gösterilen genel formdaki deterministik bir doğrusal programlama modeli (3.8)-(3.10)'daki gibi temsil edilebilir. Buradaki temel varsayım  $c, A$  ve  $b$  ile gösterilen tüm parametrelerin tam olarak bilindiğidir.

$$\text{maks} \sum_{j \in J} c_j x_j \quad (3.8)$$

$$\text{öyle ki :} \quad \sum_{j \in J} A^j x_j \leq b \quad (3.9)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j \in J. \quad (3.10)$$

Burada  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ , karar değişkenlerinin vektörü ve  $|J| = n$  için  $A \in R^{m \times n} = \{A^j, j \in J\}$ 'dir. Ayrıca  $A$  matrisinin  $a_{ij}$  ögesi  $x_j$  değişkeninin  $i$ . kısıttaki katsayısıdır ve sağ taraf vektörü olarak adlandırılan  $b \in R^m$  ise karşılanması gereken maksimum gereksinimleri temsil eder. Birçok problemde, bu girdi verisi için istatistiksel veya tahmini değerler belirlenebilmesi mümkün olmakla beraber uygulamada tam olarak hangi değerlerin gerçekleşeceği belirsizdir.



Gürbüz optimizasyon, bazı girdi verileri için veri belirsizliğinin dikkate alındığı optimizasyon problemlerini ele alan optimizasyon teorisi alanıdır. Bu belirsizlik daha önce de belirtildiği gibi stokastik programlamada kullanıldığı şekilde olasılık dağılımı ile ifade edilebilir. Ancak olasılık dağılımını belirlemek elde yeterli miktarda veri bulunmaması gibi nedenlerle her zaman mümkün olmayabilir. Özellikle bu gibi durumlarda gürbüz en iyileme yaklaşımında parametrelerin  $(c, A \text{ ve } b)$  tümü veya bir kısmı için olası tüm değerleri içeren bir belirsizlik kümesi  $U \subseteq R^n \times R^{m \times n} \times R^m$  tanımlanır. Literatürde farklı belirsizlik kümesi tanımları bulunmakla beraber bu tez çalışmasında sonlu sayıda doğrusal kısıtla tanımlanan bir çokyüzlü küme kullanılmaktadır. Bu küme içerisinde belirsiz parametreler için sonsuz tane olası gerçekleşme mevcuttur [60].

Dikkate alınan belirsizlik kümesinin boyutu, gürbüz çözümün temkinlilik seviyesine ilişkin fikir vermektedir. Genel hatlarıyla ifade etmek gerekirse ne kadar fazla senaryo yani geniş bir belirsizlik kümesi dikkate alınırsa oluşturulan çözüm de o kadar temkinli bir çözüm olacaktır. Doğal olarak temkinlilik seviyesi arttıkça da daha korunaklı olmak adına daha fazla bedel ödenecek yani deterministik ve gürbüz problemlerin çözümleri arasındaki fark artacaktır. Bu bedeli ölçebilmek için Bertsimas ve Sim (2004),  $\Gamma$ -gürbüz yaklaşımını önermiştir [10].  $\Gamma$ -gürbüz en iyileme, (3.9)'da gösterildiği gibi  $A^j$  vektörünün elemanları belirsiz iken  $(c, b)$  parametreleri kesin olarak bilinen doğrusal gürbüz programlamanın bir alt dalıdır. Örneğin, (3.9)'daki modelin  $i$ . kısıtı;

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.11)$$

olsun. Literatürde aralık modeli olarak bilinen belirsizlik kümesi tanımına göre bu problemin gürbüz karşılığında her  $i = 1, \dots, m$  ve  $j \in J$  için  $a_{ij}$  katsayısının  $|\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij}, \bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}|$  aralığındaki değerleri rastgele bir şekilde alan bir değişken olduğu kabul edilmektedir. Burada  $\bar{a}_{ij}$  ortalama (veya nominal) değeri,  $\hat{a}_{ij}$  ise maksimum sapmayı ifade etmektedir. Bu kabulün yapıldığı gürbüz çözümlerde sıkıntı, en kötü duruma karşılık gelen senaryoda her  $i = 1, \dots, m$  ve  $j \in J$  için  $a_{ij} = \bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}$  olmasıdır. Fakat belirsiz her şeyin en kötü değerlerini alacağı duruma göre verilen karar, gereğinden fazlaca temkinli bir karar olacaktır. Bu noktada Bertsimas ve Sim (2004)'deki  $\Gamma$ -gürbüz yaklaşımı, ufak bir dokunuşla literatüre önemli bir katkıda

bulunmuştur. Burada temel motivasyon, aralık modelinin, belirsiz katsayıların en kötü senaryoda en fazla  $0 \leq \Gamma \leq |J|$  tanesinin en zorlayıcı değerleri alacağı kabulü yapılacak şekilde daraltıldığı bir belirsizlik kümesinin tanımlanmasıdır. Dolayısıyla  $\Gamma$ , modelin ve dolayısıyla alınacak kararın gürbüzlük seviyesini ifade eder [10]. Böylece Bertsimas ve Sim (2004)'e göre (3.11) aşağıdaki şekilde güncellenir:

$$\sum_{j \in J} \bar{a}_{ij} x_j + \max_{\{S \subseteq J: |S|=\Gamma\}} \sum_{j \in S} \hat{a}_{ij} x_j \leq b_i \forall i = 1, \dots, m. \quad (3.12)$$

Burada  $\delta(x, \Gamma) = \max_{\{S \subseteq J: |S|=\Gamma\}} \sum_{j \in S} \hat{a}_{ij} x_j$  eş zamanlı olarak en fazla  $\Gamma$  parametresiyle kısıtlanan maksimum sapmadır [60].

Bunlara ek olarak, Bertsimas ve Sim (2004) tarafından isteğe bağlı bir gerçekleşme verildiğinde, (3.12) kısıtının ihlal edilme olasılığının yaklaşık  $1 - \Phi\left(\frac{\Gamma-1}{\sqrt{p}}\right)$  olduğu kanıtlanmıştır. Burada  $\Phi$ , standart bir normal değişkenin kümülatif dağılım fonksiyonudur ve  $p$ , belirsiz katsayıların sayısıdır. Bertsimas ve Sim (2004), bu belirsizlik modeliyle, optimum bir “sağlam çözüm bulmanın, boyutu yalnızca orta derecede artırılmış sıradan bir doğrusal programı çözmeye indirgenebileceğini ve böylece büyük ölçekli uygulamaların yolunun açıldığını” belirtmektedir [60].

### 3.3.1 $\Gamma$ -Gürbüz Model

Deterministik modelde her  $i \in N^*$  algılayıcısının birim zamanda üreteceği veri miktarı  $S_i$ 'nin kesin olarak bilindiği varsayılmaktadır. Bu varsayım algılayıcı düğümlerin olay odaklı olarak veri üretmesi durumunda geçerli olmayabilir. Enerji tüketimini azaltmak için, bazı algılayıcı düğümler, ortamdan sağlanan tüm okumaların sürekli olarak iletilmesini sağlamak yerine, yalnızca alışılmadık bir durum ortaya çıktığında veri üretecek şekilde yapılandırılmaktadır. Olay gerçekleştiğinde ortaya çıkan veriler düğümler tarafından iletiğinden her  $i \in N^*$  düğümünün birim zamanda veri üretim miktarı  $S_i$  de sabit olmamakta ve önceden bilinmemektedir [39]. Bu aşamada belirsizlik altında iyi çalışabilen tasarımlar yapmak için gürbüz programlamadan yararlanılmaktadır. Bir  $i \in N^*$  düğümünün gerçekteki veri üretim miktarı beklenen  $S_i$ 'den düşükse, gürbüz bir model ile problem yaşanmaz ancak gerçekteki veri üretim miktarı beklenen  $S_i$ 'den daha fazla ise gürbüz model bu durumla başa çıkabilirken, deterministik modelde sorunlar ortaya çıkabilir. Üretilen verinin en enerji etkin

biçimde iletilmemesi durumunda ağda yoğunluk yönetilemeyebilir ve bunun sonucunda önemli veriler kaybedilebilir. Bir optimizasyon probleminde veri belirsizliğinin varlığı, yani problem çözüldüğünde girdi verilerinin bir alt kümesinin tam olarak bilinmediği gerçeği, sadece pratikte değil teorik olarak da problemler yaşatabilir. Girdi verilerinin değerlerindeki küçük sapmalar bile, üretilen çözümlerin uygulanabilirliğini ve uygunluğunu olumsuz yönde etkileyebilir. Uygulanabilir olduğu varsayılan olurlu çözümler, mümkün olmaktan çıkabilir ve dolayısıyla uygulamada tamamen yararsız sonuçlanabilirken, optimum olduğu varsayılan çözümler beklenenin altında performans gösterebilir. Belirsizlik altında bir optimizasyon problemi için gürbüz çözüm, en kötü durum senaryosunda en iyi amaç değerine sahip çözüm olarak tanımlanabilir. Sağlam bir çözümün çekici özellikleri, herhangi bir özel senaryo için yalnızca optimuma yakın olsa da, tüm olası belirsizlik sonuçları için optimum sonucu vermese bile iyi bir sonuç vermesidir.

Bu kapsamda bu tez çalışmasında  $k \in N^*$  algılayıcı düğümünün birim zamanda veri üretim miktarı  $S_k$  belirsizliği altında  $\Gamma$ -gürbüz bir model tasarlanmıştır.

$$\min Q \quad (3.13)$$

öyle ki:

(3.2), (3.4)

$$\sum_{k \in N^*} \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k S_k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k S_k \right) \leq B_i Q \quad \begin{array}{l} \forall i \in N^* \\ S \in U \end{array} \quad (3.14)$$

Deterministik modelde gösterilen (3.3) enerji kısıtından farklı olarak gürbüz modelde her bir sensör  $i \in N^*$  ve veri üretim hızı senaryosu  $S$  için bir enerji kısıtı bulunmaktadır. Bunun nedeni gürbüz model ile olası bütün senaryoları dikkate alarak enerji etkin bir çözüm üretilmesine çalışılmasıdır. Sonuç olarak (3.14)'te, her  $k \in N^*$  için  $S_k$  girdi değerinin belirsiz olduğu durumlarda her bir algılayıcı düğümün tüm ömrü boyunca veri iletme ve alma sırasında harcadığı toplam enerjinin o algılayıcı düğümün başlangıçta sahip olduğu enerji miktarını geçmemesi sağlanmaktadır. Bu çalışmada  $U = \{S \in R^{|N^*|}: \underline{S}_k \leq S_k \leq \overline{S}_k + \widehat{S}_k \forall k \in N^*\}$ , veri üretim hızlarındaki

belirsizliğe dair dikkate alınacak senaryoları içeren çokyüzlü bir belirsizlik kümesi olarak ifade edilebilir.

Bu haliyle  $U = \{S \in R^{|N^*|}: \underline{S}_k \leq S_k \leq \underline{S}_k + \widehat{S}_k \forall k \in N^*\}$  kümesi aralık belirsizliği tanımına uygundur ve gürbüz en iyileme yaklaşımı ile olduğu gibi ele alındığında ortaya çıkabilecek en kötü durum senaryosu gerçekçilikten uzak aşırı temkinli bir tasarıma neden olabilir. Bu noktada Bertsimas ve Sim (2004) aralık belirsizliğine karar vericinin tercih ettiği temkinlilik seviyesini de dahil etmek için “en fazla  $\Gamma$  tane belirsiz parametrenin en kötü değerini alabileceği aralık belirsizliği” tanımını önermişlerdir [10]. Sensör enerji kısıtı (3.14)’e bu tanım yansıtıldığında ilgili gürbüz eşleniği;

$$\sum_{k \in N^*} \left( \underline{S}_k \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k \right) + \max_{C \subseteq N/BS: |C| \leq \Gamma} \widehat{S}_k \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k \right) \right) \leq B_i Q \quad \forall i \quad (3.15)$$

olacaktır. Böylece en fazla  $\Gamma$  tane  $k \in N^*$  algılayıcı düğümün  $S_k$  değerinin en kötü değerini alabildiği birim zamana indirgenmiş enerji kısıtı (3.15) elde edilir. Sonlu sayıdaki bu kısıtın sol tarafındaki en büyükleme problemi Bertsimas ve Sim (2004)’de gösterildiği gibi bir doğrusal programlama modeli olarak ifade edilebilmektedir [10]. Bunun için öncelikle en fazla  $\Gamma$  parametrenin en zorlayıcı değerini alabileceği koşulunu modelleyebilmek amacıyla,

$$Z_k = \begin{cases} 1 & \text{eğer } S_k = \underline{S}_k + \widehat{S}_k \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } S_k = \underline{S}_k \text{ ise} \end{cases} \quad (3.16)$$

gösterge değişkeni tanımlanır. Devamında ise her  $i \in N^*$  için (3.15)’in sol tarafındaki en büyükleme problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\max \sum_{k \in N^*} Z_k \widehat{S}_k \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k \right) \quad (3.17)$$

öyle ki :

$$\sum_{k \in N^*} Z_k \leq \Gamma \quad (3.18)$$

$$0 \leq Z_k \leq 1 \quad \forall k \in N^*. \quad (3.19)$$

Buna göre (3.18)-(3.19) boş olmayan kapalı bir küme tanımladığından belli bir  $f$  için (3.17)-(3.19) olurlu ve sınırlı bir doğrusal programlama modelidir. Dolayısıyla dual problem de olurlu ve sınırlıdır. Sırasıyla (3.18) ve (3.19) için  $\Lambda_i$  ve  $\mu_{ik}$  dual değişkenleri tanımlanırsa ilgili dual model:

$$\min \Gamma \Lambda_i + \sum_{k \in N^*} \mu_{ik} \quad (3.20)$$

öyle ki:

$$\Lambda_i + \mu_{ik} \geq \widehat{S}_k \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k \right) \quad \forall i, k \in N^* \quad (3.21)$$

$$\Lambda_i, \mu_{ik} \geq 0 \quad \forall k \quad (3.22)$$

olur. Dual teoremleri kullanarak (3.20)'deki amaç fonksiyonu (3.17)'deki maks problemi yerine yazılabilir. Ayrıca her  $i \in N^*$  için (3.21) ve (3.22) gürbüz modele eklenmelidir. Böylelikle gürbüz durum için sonlu sayıda değişken ve sonlu sayıda kısıt içeren aşağıdaki sıkı model elde edilir:

$$\min Q$$

öyle ki:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}^k = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i = k \\ -1 & \text{eğer } i = BS \\ 0 & \text{dd} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \forall i \in N, \\ k \in N^* \end{array}$$

$$\sum_{k \in N^*} \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k \underline{S}_k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k \underline{S}_k \right) + \Gamma \Lambda_i + \sum_{k \in N^*} \mu_{ik} \leq B_i Q \quad \forall i \in N^*$$

$$\lambda_i + \mu_{ik} \geq \widehat{S}_k \left( \sum_{(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k + \sum_{(j,i) \in A} PRX_{ji} f_{ji}^k \right) \quad \forall i, k \in N^*$$

$$0 \leq f_{ij}^k \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A, \quad k \in N^*$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad \forall i \in N^*$$

$$\mu_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \in N^*$$

Elde edilen bu model, ticari çözücüler tarafından çözülebilecek sıkı bir modeldir. Deterministik modelde olduğu gibi burada da gürbüz en iyileme yaklaşımı ile ağın birim zamandaki işleyişi düzenlenmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde bütün parametrelerin kesin olarak bilindiği klasik deterministik bir modelden yola çıkarak veri üretim miktarının belirsizliğine karşı model  $\Gamma$ -gürbüz en iyileme metodolojisinden faydalanarak korunaklı hale getirilmiştir. Bir sonraki bölümde ise elde edilen enerji verimli bu gürbüz modelin performansını incelemek için insan vücudu üzerine yerleştirilmiş KVAA örneklemlerinde testler gerçekleştirilecektir. Çeşitli metriklerin ağ ömrüne etkisi araştırılacaktır.

## 4. PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde 3. Bölümde oluşturulan deterministik modelin ve  $\Gamma$ -gürbüz modelin ağ ömrü açısından performanslarının karşılaştırılması istenmektedir. Bu amaçla KAA'lar içerisinden olay-odaklı ölçüm yapacak şekilde yapılandırılmış olan KVAA'lar uygulama alanı olarak seçilmiştir. İnsan vücudu üzerinde çeşitli büyüklüklerde örneklem oluşturulmakta ve bu örneklem üzerinde her iki modelin de ağ ömrü incelenerek sonuçlar verilmektedir. Bu bölümde iki modelin performanslarını değerlendirirken sadece ağ ömrü üzerinden bir karşılaştırma yapılması yeterli olmayacaktır. Her iki modelin oluşturduğu iletim rotalarının farklı  $S_i$  değerleri ile performansları da değerlendirilmelidir. Böylece ağ performansının daha istikrarlı olması adına ağ ömründeki azalmanın hangi şartlarda kabul edilebilir olduğu da daha rahat değerlendirilebilecektir. Bu bölümde bu amaçla da testler yapılmıştır.

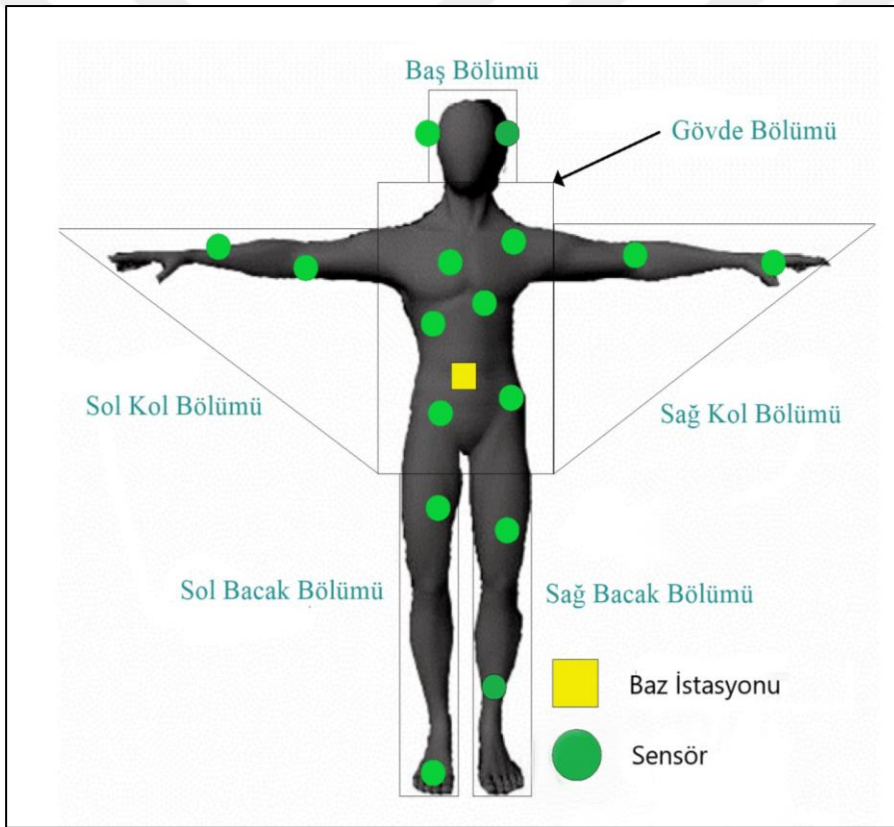
### 4.1 Örneklem Oluşturulması

KAA bünyesinde bulunan algılayıcı düğümler, gözlem yapılacak bölgeye genelde rastgele saçılarak yerleştirilir. Gözlem için bölgeyi, parçalar halinde izlemek gibi özel bir yaklaşıma ihtiyaç bulunmamaktadır. Ancak KVAA'nın yapısı gereği, farklı vücut parametreleri vücudun farklı yerlerinden ölçülebilmektedir. Örneğin elektrokardiyogram (EKG) değerleri için vücudun gövde bölümünden, kandaki oksijen ve glikoz değerleri için kol bölümünden veri almak gerekmektedir. Bu doğrultuda, KVAA ile testlerin yapılabilmesi için bu çalışma kapsamında örneklem 1,75 metre boyundaki bir erkek birey baz alınarak oluşturulmuştur. Vücut; baş, gövde, sağ-sol kol, sağ-sol bacak olmak üzere 6 bölüm olarak değerlendirilmiş ve Çizelge 4.1'de bu bölümler 1,75 metre boyundaki bir erkek bireyin vücuduna göre koordinatları ile birlikte verilerek Şekil 4.1'de de görsel olarak sunulmuştur.

**Çizelge 4.1** : Algılayıcı düğüm dağılımı [6].

Vücut Bölümü	Aralık
Baş	$x \in [-10,10]; y \in [46,70]$
Gövde	$x \in [-20,20]; y \in [-25,45]$
Sol Kol	$x < -20 ; y < 42 ; 0.91x + y + 38.2 > 0$
Sağ Kol	$x > 20 ; y < 42 ; 0.91x - y - 38.2 < 0$
Sol Bacak	$x \in [-20,-5]; y \in [-105,-24]$
Sağ Bacak	$x \in [5,20]; y \in [-105,-24]$

Gövde bölümünün fiziksel yönden diğer bölümlerden daha hareketsiz olması ve diğer bölümlere oranla merkezi sayılması sebebiyle literatürdeki kabullerle uyumlu olarak BS gövde bölümüne yerleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında sabit bir adet BS kullanılmaktadır [6].



**Şekil 4.1** : Ağ modeli [6].

Modellerin performansını gözlemlemek amacıyla farklı örneklem kümeleri Çizelge 4.1'de verilen koordinat bilgileri dikkate alınarak Ek 1'de sunulan algoritma ile üretilmiştir.

Algılayıcı düğümler sezdikleri verileri kendi iletim menzili mesafesi (İMM) içerisindeki düğümlere iletebilmektedir. Ağın dengeli olarak çalışabilmesi için ağda



bulunan algılayıcı düğümlerin en az %70'inin birbirlerinin iletim menzili içerisinde olmaları sağlanmıştır. Tüm ağ üzerinde oluşturulacak ayrıtlar, hesaplanan mesafelerin menzil mesafesinden küçük olup olmamasına bağlı olarak  $a_{ij}$  matrisinde 0 – 1 değerini almaktadır. Bir  $i \in N^*$  algılayıcısının  $(i, j) \in A$  ayrıtı üzerinden bir birim veri göndermek için harcayacağı enerji miktarı belirlenirken  $PTX_{ij}=16.7 + 1.97d_{ij}^{3.38}$  denklemi kullanılmaktadır [6]. Buna göre her  $i \in N^*$  algılayıcısının başka bir  $j \in N$  düğümüne veri iletmesi durumunda harcayacağı birim enerji  $i - j$  arasındaki mesafenin ayrıtının uzunluğunun 3,38. kuvveti ile doğru orantılı olmaktadır. Dolayısıyla  $i$  düğümü için iletim mesafesi arttıkça harcanacak birim enerji miktarı da artacaktır. Bu çalışmada ele alınan KVAA örnekleri en az 9, en fazla 65 algılayıcıdan oluşmaktadır. IEEE 802.15.6'ya göre genel bir KVAA modeli en fazla 64 algılayıcı düğümden oluşabilir. Her ağ büyüklüğü için beşer tane rastgele örneklem üretilmiştir [6].

## 4.2 Parametreler

Tüm modellerin çözümü için kullanılan parametrelerin değerleri veya hesaplanma şekilleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2 : Parametreler.**

Parametreler	Değerler
$S_i$	1
$PRX$	36,1
$PTX_{ij}$	$16,7+1,97d_{ij}^{3,38}$
$B_i$	250.000

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi deterministik modelde tüm parametrelerin önceden kesin ve tam olarak bilindiği varsayılırken, gürbüz modelde birim süredeki olay-odaklı ölçümden kaynaklı veri üretim hızının tam olarak bilinemeyeceği, belli bir oranda sapmaya uğrayabileceği dikkate alınmaktadır. KVAA'lar heterojen ağ yapılarına sahip olduğundan farklı yapıdaki sensörler için sabit parametreler değişkenlik göstermektedir. Ancak bu çalışmada veri üretim miktarının belirsizliği altında ağ ömrü incelendiğinden bütün sensörler için sabit parametrelerin aynı değeri aldığı kabul edilmiştir.

### 4.3 Test Sonuçları

Deterministik ve  $\Gamma$ -gürbüz model performanslarının analiz edilmesi amacıyla farklı KVAA örneklemi incelenmiştir. Örneklem, Çizelge 4.1'deki koordinat bilgileri dikkate alınarak rastgele bir şekilde oluşturulmuştur. Çizelge 4.2'de verilen parametreler kullanılarak CPLEX 12.8 ticari çözücüsüyle bu örneklem üzerinde testler yapılmıştır. Test sonuçlarını daha iyi ifade etmek amacıyla bundan sonra deterministik modelin ağ ömrü  $T_{det}$ , gürbüz modelin ağ ömrü ise  $T_{gür}$  olarak ifade edilecektir.

#### 4.3.1 $\Gamma$ Değerlerinin Ağ Ömrüne Etkisi

Daha önce de bahsedildiği üzere,  $\Gamma$  değeri arttıkça modelin korunaklılığı artmaktadır. Bu artışın ağ ömürlerine etkisini incelemek amacıyla farklı örneklem büyüklükleri için model, ticari çözücüyle çözdürülmüştür. Testler yapılırken iki farklı belirsizlik kümesinden faydalanılmıştır.

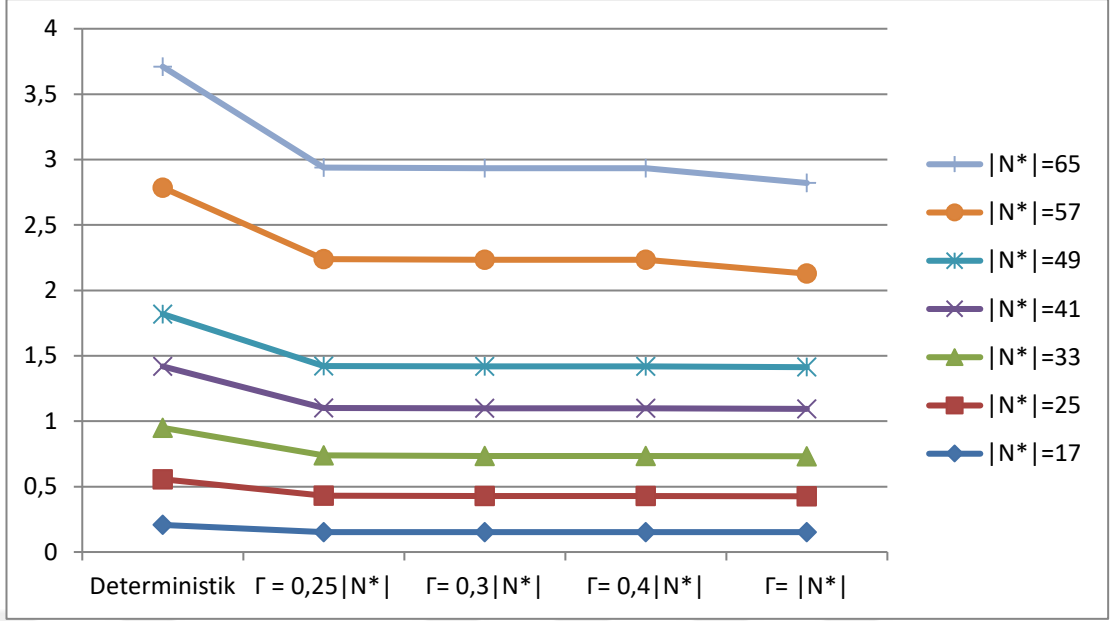
##### 4.3.1.1 $U^+ = \{S \in R^{|N^*|} : \underline{S}_i \leq S_i \leq \underline{S}_i + \hat{S}_i \forall i \in N^*\}$ iken $\Gamma$ Değerlerinin Ağ Ömrüne Etkisi

Deterministik modelde  $S_i = \underline{S}_i$  iken gürbüz modelde  $\{S \in R^{|N^*|} : \underline{S}_i \leq S_i \leq \underline{S}_i + \hat{S}_i \forall i \in N^*\}$  olacak şekilde beşer farklı ağ ele alınmış ve ortalama ağ ömürleri hesaplanarak Ek 2'de sunulmuştur. Farklı  $\Gamma$  değerleri için ağ ömürleri incelenerek aşağıdaki Çizelge 4.3 oluşturulmuştur:

**Çizelge 4.3 :**  $U^+$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ortalama ağ ömrü değerleri.

Örneklem Büüklüğü	$T_{det}$	$T_{gür}$			
		$\Gamma = 0,25 N^* $	$\Gamma = 0,3 N^* $	$\Gamma = 0,4 N^* $	$\Gamma =  N^* $
17	0,207	0,152	0,152	0,152	0,152
25	0,349	0,279	0,276	0,275	0,274
33	0,393	0,307	0,307	0,307	0,306
41	0,470	0,364	0,364	0,364	0,362
49	0,400	0,320	0,320	0,320	0,358
57	0,966	0,816	0,816	0,816	0,715
65	0,925	0,700	0,700	0,700	0,693

Çizelge 4.3'te görülen ağ ömür değerleri Şekil 4.2'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



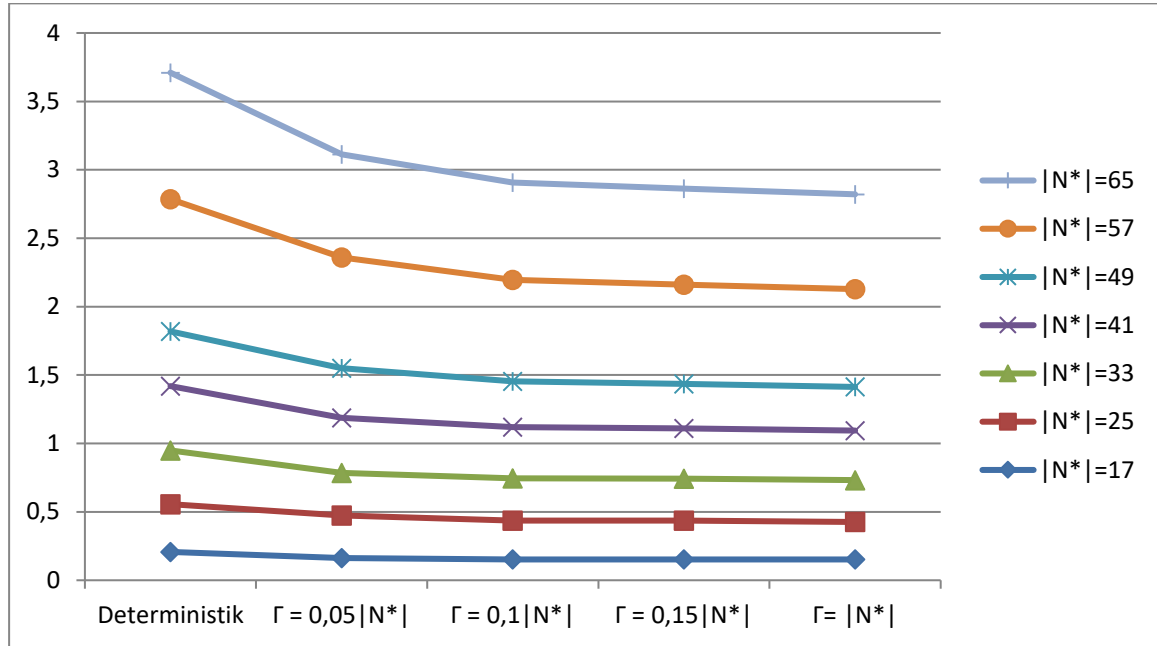
**Şekil 4.2 :**  $U^+$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.

Burada beklenildiği gibi bütün parametrelerin kesin olarak bilindiği deterministik durumlarda en iyi ağ ömrü değerleri elde edilmiştir.  $\Gamma$  değerlerinin ağ ömürleri üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için  $\Gamma \in \{0,25|N^*|; 0,3|N^*|; 0,4|N^*|\}$  senaryoları incelenmiştir. Ancak  $\Gamma$ 'nin farklı değerlerinde sonuçlar çoğunlukla aynı kalmış ya da ihmal edebilecek kadar küçük değişiklikler göstermiştir. Ayrıca ağ ömrü, enerjisi ilk önce tükenen sensörün ömrü ile ölçüldüğü için  $\Gamma$ 'nin nispeten büyük değerlerinde gürbüz tasarımının  $\Gamma$  değerine hassasiyetinin azaldığı da düşünülmektedir. Bu öngörüğü desteklemek adına  $\Gamma \in \{0,05|N^*|; 0,1|N^*|; 0,15|N^*|\}$  olacak şekilde daha küçük  $\Gamma$  değerleri ile testler tekrarlanmıştır ve sonuçları Ek 3'te sunulmaktadır. Ortalama değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4 :**  $U^+$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.

Örneklem Büüklüğü $N$	$T_{det}$	$T_{gür}$			
		$\Gamma = 0,05 N^* $	$\Gamma = 0,1 N^* $	$\Gamma = 0,15 N^* $	$\Gamma =  N^* $
17	0,207	0,162	0,152	0,152	0,152
25	0,349	0,312	0,284	0,283	0,274
33	0,393	0,311	0,308	0,307	0,306
41	0,470	0,403	0,376	0,367	0,362
49	0,400	0,362	0,333	0,326	0,358
57	0,966	0,810	0,743	0,725	0,715
65	0,925	0,753	0,711	0,702	0,693

Çizelge 4.4'te görülen ağ ömür değerleri Şekil 4.3'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3 :  $U^+$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.

Şekil 4.3'ten anlaşıldığı gibi en iyi ağ ömrü sonuçları yine deterministik durumlarda elde edilmektedir. Beklenildiği gibi gürbüzlüğün bedeli olarak  $\Gamma$  değeri büyüdükçe ağ ömrü kötüleşmektedir.

Farklı  $\Gamma$  değerleri için gürbüz modelin ağ ömründe görülen deterministik modele göre azalma oranları tespit edilmiş ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Her bir  $\Gamma$  için elde edilen ortalama ağ ömrünün deterministik modele ait ortalama değerden yüzde ne kadar az olduğu yani gürbüz tasarımın ağ ömrü cinsinden bedeli  $100 * (T_{det} - T_{gür}) / T_{det}$  formülü ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5 :  $U^+$  için ağ ömrü bakımından gürbüzlüğün % bedeli.

Örneklem Büyüküğü	$T_{gür}$			
	$\Gamma = 0,05 N^* $	$\Gamma = 0,1 N^* $	$\Gamma = 0,15 N^* $	$\Gamma =  N^* $
17	21,74	26,57	26,57	26,57
25	10,60	18,62	18,91	21,49
33	20,87	21,63	21,88	22,14
41	14,26	20,00	21,91	22,98
49	9,50	16,75	18,50	20,25
57	16,15	23,08	24,95	25,98
65	18,59	23,14	24,11	25,08
<b>Ortalama</b>	<b>15,96</b>	<b>21,40</b>	<b>22,40</b>	<b>23,50</b>

Çizelge 4.5'te ifade edilen oransal azalmalardan da görülmektedir ki  $\Gamma$  değerleri yani nihai tasarımın yönetmesi gerek zorlayıcı gerçekleştirmelerin sayısı arttıkça  $T_{gür}$  azalmaktadır. Ayrıca marjinal değişiklikler de  $\Gamma$  büyüdükçe azalmaktadır. Örneğin  $\Gamma = 0,05|N^*|$ 'dan  $\Gamma = 0,1|N^*|$ 'a geçildiğindeki artış oranı  $\Gamma = 0,1|N^*|$ 'dan  $\Gamma = 0,15|N^*|$ 'a geçilirkenki artış oranından çok daha fazladır. Yani  $T_{gür}$  değerleri  $\Gamma$  değerlerinin artmasıyla azalan bir oranda azalma eğilimi göstermektedir. Bu da Şekil 4.2'deki bir noktadan sonra sabitlenen  $T_{gür}$  değerleri ile uyumludur.

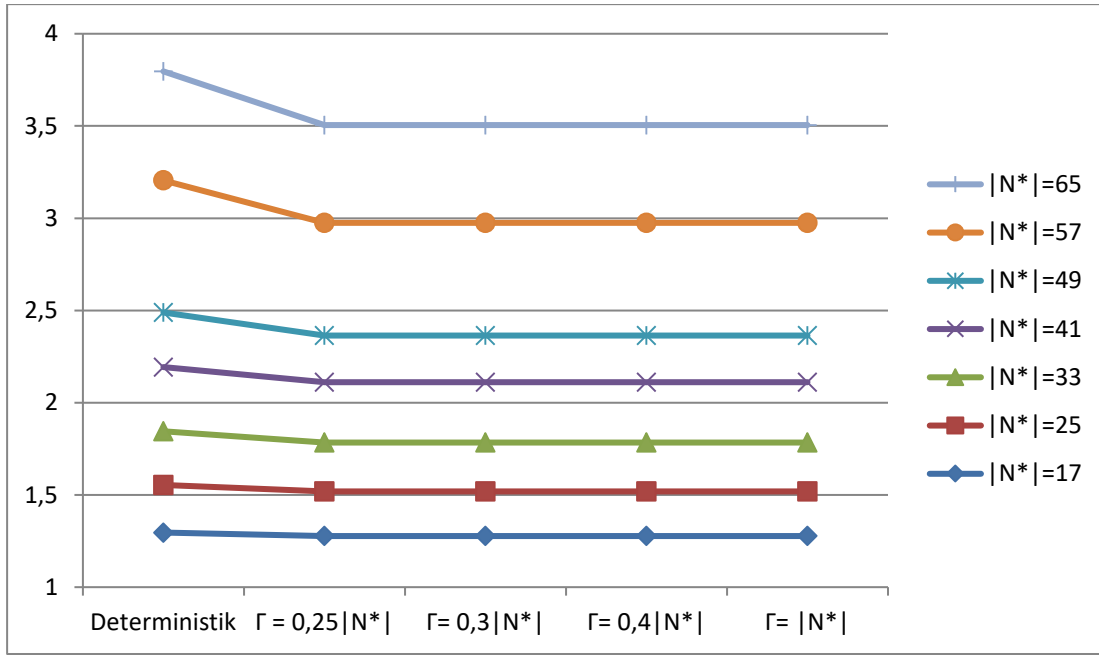
#### 4.3.1.2 $U^\pm = \{S \in R^{|N^*|}: S_i - \hat{S}_i \leq S_i \leq S_i + \hat{S}_i \forall i \in N^*\}$ iken $\Gamma$ Değerlerinin Ağ Ömrüne Etkisi

Ele alınan ikinci belirsizlik kümesi tanımında veri üretim hızlarında  $\pm$  sapmalar olabileceği öngörülmüştür. Dolayısıyla gürbüz modelde  $S_i$ ,  $\pm \hat{S}_i$  oranında sapmaya uğrayabilirken, deterministik modelde  $S_i = \underline{S}_i + \widehat{S}_i/2$  olacağı kabul edilmiştir. Her bir örneklem büyüklüğü için beşer farklı örnek oluşturulmu ve ortalama ağ ömürleri hesaplanarak Ek 4'te sunulmuştur. Farklı  $\Gamma$  değerleri için ağ ömürleri incelenerek aşağıdaki Çizelge 4.6 oluşturulmuştur:

**Çizelge 4.6 :**  $U^\pm$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için ortalama ağ ömrü değerleri.

Örneklem Büyüküğü $N$	$T_{det}$	$T_{gür}$			
		$\Gamma = 0,25 N^* $	$\Gamma = 0,3 N^* $	$\Gamma = 0,4 N^* $	$\Gamma =  N^* $
17	1,296	1,277	1,277	1,277	1,277
25	0,258	0,242	0,242	0,242	0,242
33	0,291	0,265	0,265	0,265	0,265
41	0,348	0,327	0,327	0,327	0,327
49	0,296	0,253	0,253	0,253	0,253
57	0,716	0,611	0,611	0,611	0,611
65	0,591	0,530	0,530	0,530	0,530

Çizelge 4.6'da görülen ağ ömür değerleri Şekil 4.4'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



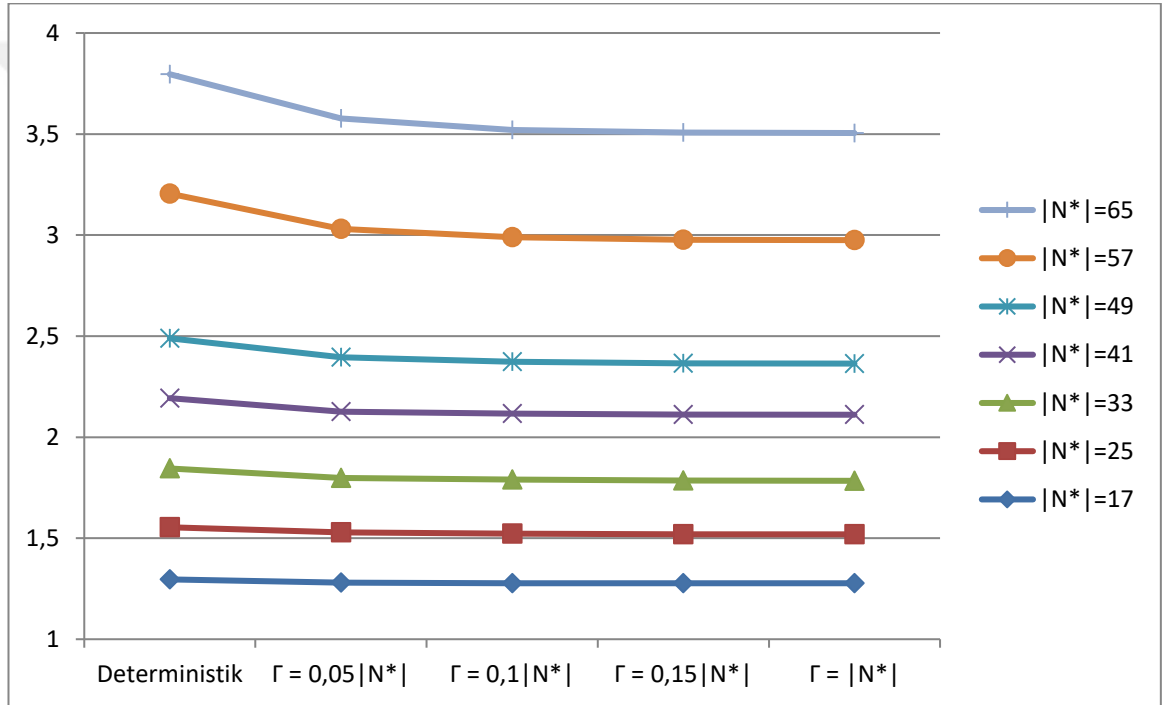
**Şekil 4.4 :**  $U^\pm$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.

Burada beklenildiği gibi bütün parametrelerin kesin olarak bilindiği deterministik durumlarda en iyi ağ ömrü değerleri elde edilmiştir.  $\Gamma$  değerlerinin ağ ömürleri üzerindeki etkisini incelemek için  $\Gamma \in \{0,25|N^*|; 0,3|N^*|; 0,4|N^*|\}$  durumları incelenmiştir. Ancak daha önce de olduğu gibi  $\Gamma$ 'nin farklı değerlerinde sonuçlar çoğunlukla aynı kalmış ya da ihmal edebilecek kadar küçük değişiklikler göstermiştir. Bu durum; yine ağ ömrünü kritik şekilde etkileyen düğümlerin, ağın aktif halde çalışmaya başladığı ilk zamanlarda enerjisini bitirdiğini göstermektedir.  $U^+$  kümesinin kullanıldığı test sonuçları ile benzer şekilde ağ ömrü, enerjisi ilk önce tükenen sensörün ömrü ile ölçüldüğü için  $\Gamma$ 'nin nispeten büyük değerlerinde gürbüz tasarımın  $\Gamma$  değerine hassasiyetinin azaldığı tekrardan düşünülmektedir. Bu öngörüğü desteklemek adına  $\Gamma \in \{0,05|N^*|; 0,1|N^*|; 0,15|N^*|\}$  olacak şekilde daha küçük  $\Gamma$  değerleri ile testler tekrarlanmıştır. Detaylı sonuçlar Ek 5'te sunulmakla birlikte ortalama değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

**Çizelge 4.7 :**  $U^\pm$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.

Örneklem Büyüküğü $N$	$T_{det}$	$T_{gür}$			
		$\Gamma = 0,05 N^* $	$\Gamma = 0,1 N^* $	$\Gamma = 0,15 N^* $	$\Gamma =  N^* $
17	1,296	1,280	1,277	1,277	1,277
25	0,258	0,248	0,246	0,243	0,242
33	0,291	0,270	0,267	0,265	0,265
41	0,348	0,328	0,327	0,327	0,327
49	0,296	0,270	0,256	0,253	0,253
57	0,716	0,635	0,616	0,612	0,611
65	0,591	0,546	0,531	0,530	0,530

Çizelge 4.7’de görülen ağ ömür değerleri Şekil 4.5’te grafiksel olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.5 :**  $U^\pm$  için farklı  $\Gamma$  değerleri için farklı örneklem büyüklüklerinin ağ ömürleri.

Şekil 4.5’ten anlaşıldığı gibi en iyi ağ ömrü sonuçları yine deterministik durumlarda elde edilmektedir. Beklenildiği gibi gürbüzlüğün bedeli olarak  $\Gamma$  değeri büyüdükçe ağ ömrü kötüleşmekte ve modelin korunaklılığı artmaktadır.

Farklı  $\Gamma$  değerleri için gürbüz modelin ağ ömründeki azalma oranları tespit edilmiş ve Çizelge 4.8’de verilmiştir. Her bir  $\Gamma$  için elde edilen ortalama ağ ömrünün deterministik modele ait ortalama değerden yüzde ne kadar az olduğu  $100 * (T_{det} - T_{gür}) / T_{det}$  formülü ile hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.8 :**  $U^\pm$  için ağ ömrü bakımından gürbüzlüğün % bedeli.

Örneklem Büyüklüğü	$T_{gür}$			
	$\Gamma = 0,05 N^* $	$\Gamma = 0,1 N^* $	$\Gamma = 0,15 N^* $	$\Gamma =  N^* $
17	1,23	1,47	1,47	1,47
25	3,88	4,65	5,81	6,20
33	7,22	8,25	8,93	8,93
41	5,75	6,03	6,03	6,03
49	8,78	13,51	14,53	14,53
57	11,31	13,97	14,53	14,66
65	7,61	10,15	10,32	10,32
<b>Ortalama</b>	<b>6,54</b>	<b>8,29</b>	<b>8,80</b>	<b>8,88</b>

Tekrardan bu belirsizlik kümesi için de  $T_{gür}$  değerleri  $\Gamma$  değerlerinin artmasıyla amaç fonksiyonu değerinin kötüleştiğini göstermektedir.

### 4.3.2 Ağ Ömrü Performanslarının Karşılaştırılması

#### 4.3.2.1 $U^+ = \{S \in R^{|N^*|} : \underline{S}_i \leq S_i \leq \underline{S}_i + \hat{S}_i \forall i \in N^*\}$ iken Ağ Ömrü Performanslarının Karşılaştırılması

Bir önceki bölümde elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi beklendiği gibi ağın farklı senaryolara karşı korunaklılığının artırılabilmesi adına ağ ömründen feraget edilmesinin gerekeceği yani  $T_{gür} \leq T_{det}$  ilişkisi test sonuçlarımızda da ortaya çıkmıştır. Tezin bu bölümünde ağ ömründeki kaybın gerekliliğini araştırmak amacıyla çeşitli senaryolar test edilecektir.

Bu testler, birim zamanda üretilen veri miktarının farklı sebeplerle saptmaya uğraması durumunda, yani gerçek hayatta beklenenden farklı veri üretimi söz konusu olduğunda, deterministik modelin önerdiği rotaların performansının nasıl etkileneceğini anlamak amacıyla yapılacaktır. Bunun için en fazla  $\Gamma$  tane algılayıcı düğümün beklenen veri üretim hızının  $S_i = 1$ 'den farklı değerler aldığı senaryolar incelenecektir. Belirsizlik dikkate alınarak oluşturulan bu senaryo, test sonuçlarının daha kolay takip edilebilmesi adına,  $\Gamma$ -senaryo olarak isimlendirilmekte ve burada  $\Gamma$ , kaç tane algılayıcı düğümün parametre değerinde sapma olduğunu göstermektedir. Bu senaryonun uygulandığı modelin ağ ömrü de  $T_{det}(\Gamma)$  olarak ifade edilecektir.

Veri üretim miktarındaki sapmanın deterministik model üzerinde zorlayıcı bir etki oluşturacağı düşünülmektedir, ancak bu senaryoyu daha zorlayıcı hale getirmek için trafik yoğunluğu yüksek olan düğümlerin üretim miktarında sapma gerçekleştirilmesi



amaçlanmaktadır. Bu aşamada 9 düğümlü bir örneklem oluşturulmuştur. Daha sonra bu örneklem üzerinde deterministik model CPLEX 12.8 ile çözülerek optimal rotanın yanısıra optimal ağ ömrü  $T_{det} = 0,117$  olarak belirlenmiştir. Daha zorlayıcı bir senaryo elde edebilmek için; önce ticari çözücünden elde edilen optimal rota, sabit  $S_i = 1$  değeri ile birlikte dikkate alınarak her bir sensörün veri trafiğine göre birim zamandaki enerji tüketimi Eşitlik (3.7)'den faydalanarak belirlenmiştir. Ardından sensörlerin başlangıçta sahip oldukları enerji miktarları ve birim zamandaki enerji tüketimlerine göre ömürleri ayrı ayrı belirlenerek Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.9 :** Deterministik modelde algılayıcı düğümlerin ömrü.

Algılayıcı Düğüm Numaraları	Algılayıcı Düğümlerin Ömrü
1	0,945
2	0,277
3	0,117
4	0,117
5	0,117
6	4,785
7	41,800
8	0,136

Çizelge 4.9'dan görüldüğü gibi 3, 4 ve 5 numaralı algılayıcı düğümlerin enerjisi diğerlerine göre daha önce tükenmektedir, dolayısıyla ağın ömrü bu algılayıcı düğümlerin ömrüne eşittir ve  $T_{det} = 0,117$ 'dir. Bundan sonra senaryonun devamında enerjileri erken tükenen bu üç düğümün veri üretim miktarı değerlerinin beklenen değerden sapmaya uğraması sağlanmıştır. Bu sensörlerin seçilmesinin sebebi zorlayıcı bir senaryo elde edilmesinin amaçlanmasıdır. Sapmaya uğramış  $S_i$  değerleri ile ticari çözücünün en başta belirlediği optimal yollar aynı örneklem üzerinde yeniden çözdürülmüş ve Çizelge 4.10'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Böylelikle gerçek hayatta ortaya çıkması olası olan girdi verilerindeki sapmaların ağ ömrü üzerindeki etkisi görülmeye çalışılmıştır.

**Çizelge 4.10 :** Farklı veri üretim miktarına sahip düğümlerin sayısının ağ ömrüne etkisi.

Ağ Ömürleri	
$T_{det}$	0,117
$T_{det}(1)$	0,095
$T_{det}(2)$	0,092
$T_{det}(3)$	0,092

$T_{det}(l) \forall l = 1,2,3$  veri üretim hızı beklenenden farklı olan  $l$  tane algılayıcı düğüm olduğu durumda optimal ağlarü değerini temsil etmektedir. Burada  $T_{det}(1)$  durumunda 3 numaralı algılayıcı düğüm,  $T_{det}(2)$  durumunda 3 ve 5 numaralı algılayıcı düğüm ve  $T_{det}(3)$  durumunda 3, 4 ve 5 numaralı algılayıcı düğümlerin beklenenden farklı değerler alması sağlanmıştır. 3, 4 ve 5 numaralı düğümlerin enerjilerinin önce tükendiği Çizelge 4.9'dan görülmektedir.  $T_{det}(2)$  ve  $T_{det}(3)$ 'ün aynı değere sahip olması, 5 numaralı algılayıcı düğümün enerjisinin önce tükenmesi nedeniyle ağ ömrünün 5 numaralı düğümün ömrüne eşit olmasından kaynaklanmaktadır. Yani 4 numaralı düğümün daha fazla veri üretmesi 5 numaralı düğümden önce enerjisinin bitmesine neden olmamıştır; ağın ömrü halen 5 numaralı düğümün ömrüne eşittir.

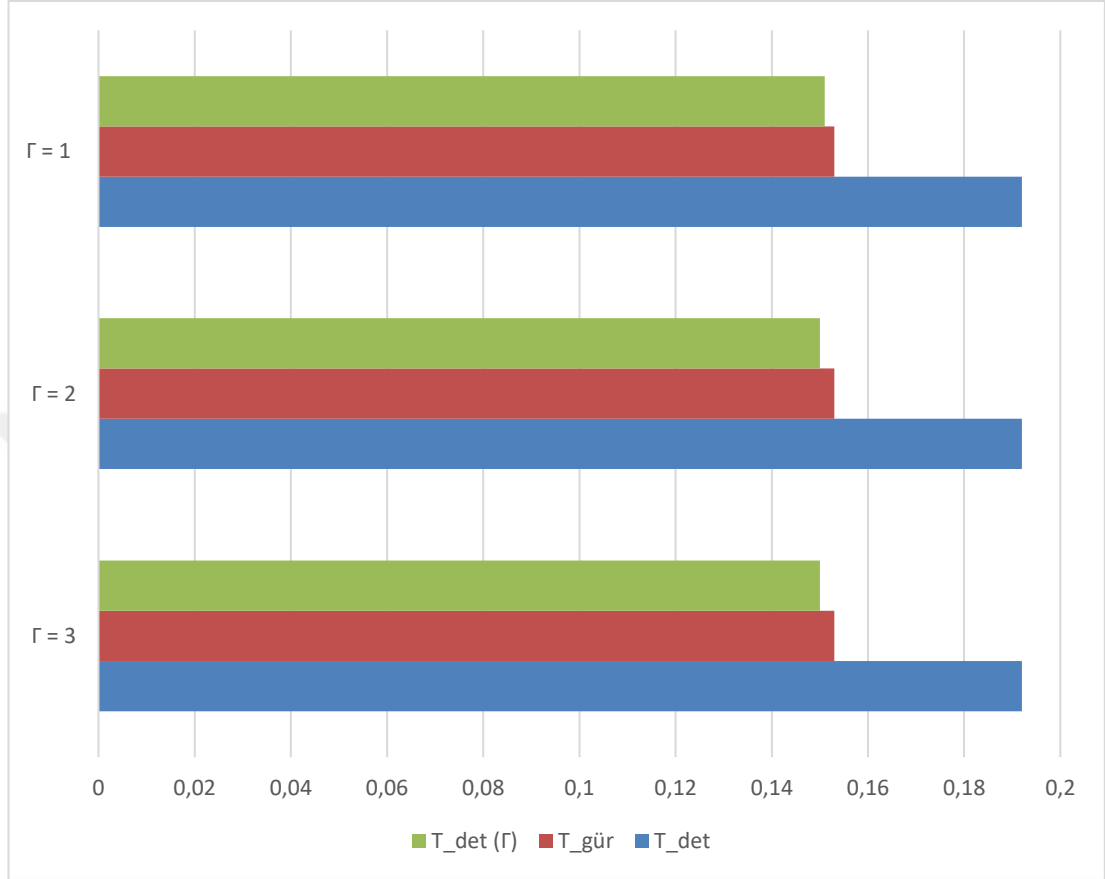
Sonrasında  $\Gamma$ -senaryonun ağ ömrü değerleri  $\Gamma$ -gürbüz model ile karşılaştırılmak istenmiştir. Aynı örnekleme üzerinde  $\Gamma = 1,2,3$  için ağ ömrü değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

**Çizelge 4.11 :**  $U^+$  ile  $\Gamma$ -gürbüz ve deterministik model ağ ömürleri karşılaştırması.

	Ağ Ömürleri		
	$\Gamma = 1$	$\Gamma = 2$	$\Gamma = 3$
$T_{det}$	0,117	0,117	0,117
$T_{gür}$	0,098	0,093	0,093
$T_{det}(\Gamma)$	0,095	0,092	0,092

Görüldüğü gibi  $\Gamma$ 'nın tüm değerleri için ağ ömürleri arasındaki ilişki  $T_{det}(\Gamma) \leq T_{gür} \leq T_{det}$  şeklindedir. Oluşturulan senaryodaki ağ ömrü değerinin,  $\Gamma$ -gürbüz modelden elde edilen ağ ömrü değerinden daha kötü olduğu görülmektedir. Ayrıca 3

farklı, 9 düğümden oluşan örneklem için anlatılan işlem tekrarlanarak  $\Gamma$ -senaryonun,  $\Gamma$ -gürbüz modelin ve deterministik modelin ağ ömrü değerleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.6 :**  $U^+$  için  $\Gamma$ -gürbüz ve deterministik model ağ ömürleri karşılaştırması.

Elde edilen sonuç değişmemiş ve  $T_{det}(\Gamma) \leq T_{gür} \leq T_{det}$  şeklinde olmuştur. Bu durum göstermektedir ki deterministik durumda girdi değerlerindeki sapmalar sonucunda elde edilen ağ ömrü,  $\Gamma$ -gürbüz model ile elde edilen ağ ömründen daha iyi değildir. Sapmanın gerçekleşmeyeceğini umarak veri kaybı riskini almak yerine gürbüz bir model tasarlanması daha avantajlıdır. Burada gözlemlenen farkın nispeten küçük olması incelenen KVAA'nın 9 sensörlük nispeten küçük bir ağ olmasından da kaynaklanmaktadır. Daha büyük örneklerde bu farkın çok daha belirgin olması beklenmektedir.

Modeller arası ortalama ağ ömrü değerleri incelendiğinde en iyi ağ ömrüne, belirsizliğin ihmal edilmesinden dolayı, deterministik modelin sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple de ağ ömürlerine ait karşılaştırmalar deterministik model esas alınarak yapılmıştır. Belirsizliğin dikkate alındığı gürbüz model ile  $\Gamma$ -senaryonun

ağ ömürlerinde görülen azalma oranları tespit edilmiştir. Burada  $X$ 'in gürbüz model ya da  $\Gamma$ -senaryodan herhangi biri olduğu varsayılırsa, her bir model için elde edilen ortalama ağ ömrünün deterministik modele ait ortalama değerden yüzde ne kadar az olduğu  $100(T_{det} - T_X) / T_{det}$  formülü ile hesaplanmış ve Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

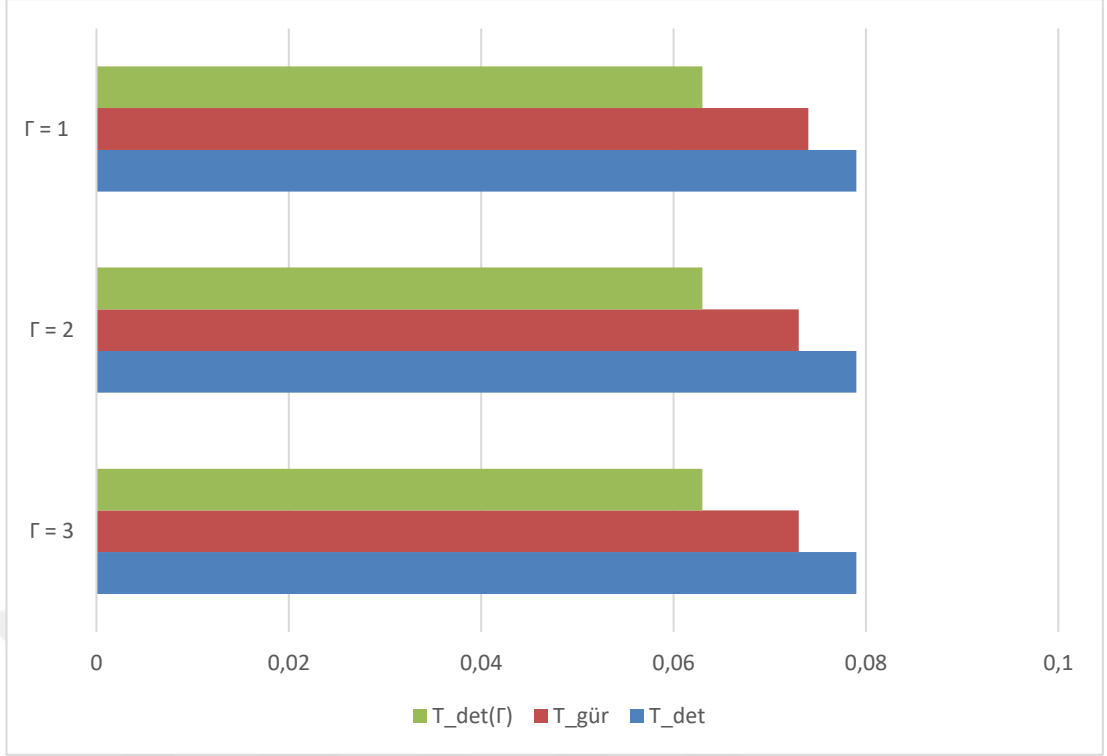
**Çizelge 4.12 :**  $U^+$  için deterministik modele göre diğer modellerin ağ ömürlerindeki oransal azalma.

$\Gamma$	$\%T_{gür}$	$\%T_{det(\Gamma)}$
1	20,31	21,35
2	20,31	21,88
3	20,31	21,88
<b>Ortalama</b>	<b>20,31</b>	<b>21,70</b>

Deterministik modele göre gürbüz model  $\Gamma$ 'nın tüm değerlerinde %20,31'lik bir azalma göstermiştir. Girdi verilerinde sapma yaşayan  $\Gamma$ -senaryodaki modelin ağ ömrü ise ortalama %21,70'lik bir azalma göstermiştir. Bu sonuçta göstermektedir ki gürbüz model, belirsizliği daha iyi karşılayabilmekte; deterministik model, verilerde sapma olması durumunda teorikte beklenen performansı gösterememekle birlikte gürbüz modelden de daha kötü bir sonuç vermektedir.

#### 4.3.1.2 $U^\pm = \{S \in R^{|N^*|} : S_i - \hat{S}_i \leq S_i \leq S_i + \hat{S}_i \forall i \in N^*\}$ iken Ağ Ömrü Performanslarının Karşılaştırılması

Bu aşamada gürbüz modelde  $S_i$ ,  $\{S \in R^{|N^*|} : S_i - \hat{S}_i \leq S_i \leq S_i + \hat{S}_i \forall i \in N^*\}$  aralığında değerler alması sağlanırken, deterministik modelde de  $S_i = \underline{S}_i + \overline{S}_i / 2$  olması sağlanarak tekrar 3 farklı, 9 düğümden oluşan örneklem için trafik yoğunluğu fazla olan sensörlerde sapma olması sağlanan  $\Gamma$ -senaryonun,  $\Gamma$ -gürbüz modelin ve deterministik modelin ağ ömrü değerleri incelenmiş ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



**Şekil 4.7 :**  $U^\pm$  için  $\Gamma$ -gürbüz ve deterministik model ağ ömürleri karşılaştırması.

Modeller arası ortalama ağ ömrü değerleri incelendiğinde en iyi ağ ömrüne belirsizliğin ihmal edilmesinden dolayı yine deterministik modelin sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple de ağ ömürlerine ait karşılaştırmalar tekrar deterministik model esas alınarak yapılmıştır. Belirsizliğin dikkate alındığı gürbüz model ile  $\Gamma$ -senaryonun ağ ömürlerinde görülen azalma oranları tespit edilmiştir. Burada  $X$ 'in gürbüz model ya da  $\Gamma$ -senaryodan herhangi biri olduğu varsayılırsa, her bir model için elde edilen ortalama ağ ömrünün deterministik modele ait ortalama değerden yüzde ne kadar az olduğu  $100 * (T_{det} - T_x) / T_{det}$  formülü ile hesaplanmış ve Çizelge 4.13'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.13 :**  $U^\pm$  için deterministik modele göre diğer modellerin ağ ömürlerindeki oransal azalma.

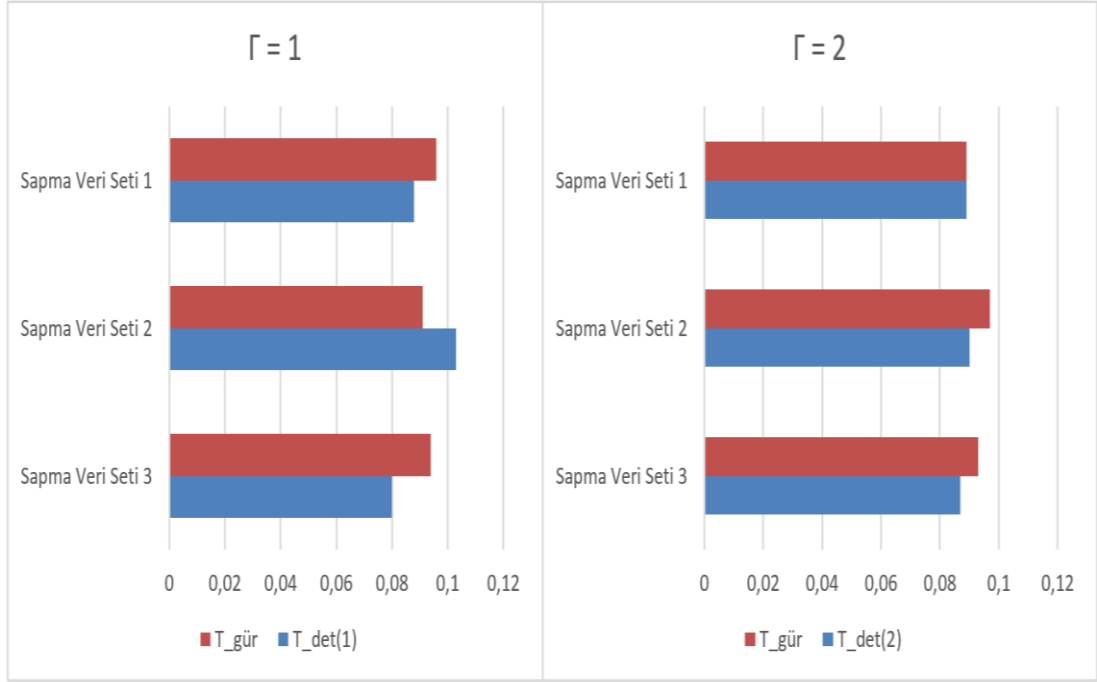
$\Gamma$	$\%T_{gür}$	$\%T_{det(\Gamma)}$
1	5,99	19,86
2	12,08	17,89
3	12,08	17,89
<b>Ortalama</b>	<b>10,05</b>	<b>18,55</b>

Deterministik modele göre gürbüz model ortalama %10,05'lik bir azalma göstermiştir. Girdi verilerinde sapma yaşayan  $\Gamma$ -senaryodaki modelin ağ ömrü ise ortalama %18,55'lik bir azalma göstermiştir. Gürbüz model, belirsizlikle daha iyi başa çıkabilmekte; deterministik model ise, verilerde sapma olması durumunda teorikte beklenen performansı gösterememekle birlikte gürbüz modelden de daha kötü bir sonuç vermektedir. Ayrıca bu durum göstermektedir ki belirsizlik ihmal edilerek yapılan tasarımda beklenen ağ ömrü uygulama esnasında veride ortaya çıkan sapma durumunda hesaplanan ağ ömründen yaklaşık %18 daha kısadır.

Bu kısma kadar deterministik modelde verinin sapmaya uğraması durumu analiz edilmiştir. Bu noktada eğer parametre değerleri tam olarak deterministik modelde beklenildiği değerlere eşit olursa, gürbüz modelin nasıl bir performans göstereceği incelenecektir. Bunun için gürbüz model tarafından önerilen optimal rota ile  $S_i = 1$  parametre değeri kullanılarak model yeniden 9 düğümlü 5 örneklem üzerinde çözdürülmüş ve  $\Gamma = 1,2,3$ 'olduğu her bir durum için ortalama  $T_{det} = 0,164$  ve  $T_{gür} = 0,152$  olarak bulunmuştur. Optimal gürbüz rotanın kullanıldığı modellerde, deterministik modele göre gürbüz modelin ağ ömründeki oransal azalma  $100(T_{det} - T_{gür}) / T_{det}$  formülü ile hesaplanmış ve  $\Gamma$ 'nın tüm değerleri için 7,32 bulunmuştur. Bu da göstermektedir ki, veri üretim hızlarında bir sapma görülmediği zaman  $T_{gür}$  değeri  $T_{det}$ 'ten %7,32 daha küçüktür.

#### 4.3.3 Farklı Veri Setlerinin Ağ Ömrüne Etkisi

Rastgele oluşturulan sapma veri setlerinin sonuçlar üzerinde herhangi bir etkisi olup olmadığını araştırmak için  $[0,1-0,5]$  aralığında 3 farklı veri seti rastgele olarak belirlemiş ve sonuçlar karşılaştırılarak ve Şekil 4.8'de verilmiştir. İkili karşılaştırmalar aynı veri kümesi için iki modelin performansı incelenerek yapılmıştır. Karşılaştırma yapılan her durum için aynı veri seti kullanılmıştır.



**Şekil 4.8 :** Farklı veri setlerinin ağ ömrüne etkisi.

Hem  $\Gamma = 1$  için hem de  $\Gamma = 2$  için en iyi  $T_{det(\Gamma)}$  sonucu 2. sapma veri setinin kullanıldığı durumda görülmüştür.  $T_{gür}$  için ise  $\Gamma = 1$  iken en iyi sonuç 3. sapma veri seti ile elde edilirken  $\Gamma = 2$  için 2. sapma veri seti ile elde edilmiştir. Sonuç olarak  $\Gamma$ -senaryodaki ağ ömrü performansı farklı sapma miktarına göre değişiklik gösterebilmesine rağmen, deterministik modelin ağ ömründen daha kötüdür. Beklenen değerde oluşan sapmalar farklı olsa da, modelin beklenen performansı gösterememesine sebep olmaktadır.

#### 4.3.4 Genel Değerlendirme

Test sonuçlarında genel olarak  $T_{gür} \leq T_{det}$  ilişkisi görülmüştür. Beklenildiği gibi bunun nedeni gürbüz modelde veri üretim hızlarındaki belirsizliğin dikkate alınması nedeniyle parametrelerde beklenenden farklı gerçekleştirmeler olduğunda ağın iletişim performansının devamlılığını sağlayabilmek adına nispeten temkinli bir çözüm üretilmesidir. Bir başka deyişle, ağ güvenilirliğinin ve müsaitliğinin artırılması adına olası ağ ömrü değerinden feragat edilmesidir.

Ayrıca yapılan test sonuçlarından genel olarak görülmüştür ki deterministik model, belirsizlik kaynaklı modeli zorlayan girdi veri değerleri ile karşılaştığında gerçekleşecek ağ ömrü optimal deterministik ağ ömründen daha kısadır. Aynı

zamanda gürbüz modelin önerdiği optimal tasarımın ağ ömrü değerinden de daha kötü bir performans göstermektedir. Farklı belirsizlik kümelerinin tanımlanması bu durumu değiştirmemiştir.

Ağ ömrü üzerinde farklı  $S$  değerlerine sahip veri setlerinin de etkisi incelenmiş ve sonuçta farklı  $S$  değerleri ile farklı ağ ömrü süreleri elde edilmiştir. Ancak  $T_{det}(\Gamma) \leq T_{gür} \leq T_{det}$  ilişkisi bütün veri setleri için geçerliliğini korumuştur.

Bu bölümde KAA'nın özel bir alt dalı olan KVAA, olay-odaklı ölçüm özelliklerinden dolayı uygulama alanı olarak seçilmiş ve insan vücudu üzerine yerleştirilen örneklerle çeşitli testler yapılarak modellerin ağ performansı değerlendirilmiştir. Bir sonraki bölümde ise tez kapsamındaki genel sonuçlar verilecek ve gelecek çalışmalarda araştırılması planlanan konulardan bahsedilecektir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, KAA tasarımındaki iki temel sorun olan enerji verimli iletim ve veri belirsizliği en iyileme çerçevesinde ele alınmıştır. Geliştirilen yöntemler genel KAA'lar için uygulanabilir olsa da veribelirsizliğinin ihmal edilmesinin sonuçları bakımından hayati olabilecek olması nedeniyle KVAA uygulamaları özelinde analizler yapılmıştır.

KAA'lar birbirleri ile iletişim halinde olan sınırlı enerjiye sahip otonom sensörlerden oluşurlar. Sensörlerin enerjilerinin tükenmesi durumunda enerji kaynaklarının yenilenmesi çoğu uygulamada pratik ve kolay uygulanabilir olmamaktadır. Dolayısıyla sensörlerin var olan enerjilerini en verimli şekilde kullanmaları sağlanarak KAA'nın ömrünün maksimum olması istenmektedir. Bu kapsamda literatürde enerji etkin veri iletimi yapılan matematiksel modeller mevcuttur.

Enerji tüketimini kontrol edebilmek adına sensörlerin çalışma prensiplerine dair farkı düzenlemeler vardır. Bunlardan birisi de sensörlerin sürekli değil gözlem alanları içerisinde bir "olay" olduğunda bunu algılayarak iletmesidir. Örneğin KVAA'larda bazı vücut sensörleri, tüm okumaların sürekli olarak iletilmesini sağlamak yerine, yalnızca olağandışı bir durum ortaya çıktığında veri üretecek şekilde, yani olay-odaklı ölçüm yapacak şekilde, yapılandırılabilir. Bu durumda verinin oluşacağı zamanın ve miktarının belli olmamasından dolayı veri üretim miktarı üzerinde bir belirsizlik doğmaktadır. Kablosuz biyosensörler tarafından üretilen veri miktarının, bu doğrultuda belirsiz olduğunu kabul etmek daha doğaldır.

KVAA tasarımı ile ilgili mevcut sınırlı çalışmalar içerisinde trafik belirsizliğinin, yani ağ üzerinden yönlendirilmesi gereken veri hacminin, genel olarak önceden bilinmemesi gerçeğinin yeterince dikkate alınmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, gerçekte planlandığı gibi uygulanabilir olmayan ve pratikte beklenildiği derecede etkin olmayacak çözümler üretme riski alınmış olmaktadır. Olaya dayalı ölçüm yapan biyosensörler söz konusu olduğunda, gerçek veri miktarları beklenenden daha fazla olursa, KVAA'nın kapasitesi üretilen verileri yönetmek için yetersiz kalabilir. Geleneksel deterministik modelde bütün girdi verilerinin net ve kesin olarak bilindiği

varsayımından kaynaklı, pratikte istenilen performansı gösteremeyen ağ tasarımları elde etme riskiyle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu sebeple belirsizlik söz konusu olduğunda kullanılan optimizasyon metotlarından olan gürbüz optimizasyon teorisinden bu çalışma kapsamında yararlanılarak belirsizliğin negatif etkisinden kaçınılmaya çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında veri üretim hızlarının kesin olarak bilinmediği ve fakat farklı belirsizlik kümeleri ile tanımlanabileceği kabul edilerek enerji verimli  $\Gamma$ -gürbüz bir model sunulmuş, böylelikle istenilen korunaklılık düzeyine sahip bir tasarım elde edilmiştir.

Gürbüz ve deterministik tasarımların ağ ömrü bakımından performanslarını değerlendirmek amacıyla, 1,75 m uzunluğundaki bir erkek bireyin vücudu üzerine rastgele saçılmış algılayıcı düğümler ile verilerin toplandığı bir adet BS'den oluşan KVAA örneklemi oluşturularak hem deterministik model hem de gürbüz model CPLEX 12.8 ticari çözücüsünde çözdürülmüştür. Beklenildiği gibi deterministik model ağ ömrü bakımından gürbüz modele kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Diğer yandan gerçekleşen veri üretim hızlarının deterministik modelde beklenenden farklı olduğu durumda gürbüz tasarımın daha etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Test sonuçları üzerinde farklı metriklerin etkisi olabilir fikrinden yola çıkılarak farklı örneklem büyüklükleri üzerinde farklı  $\Gamma$  değerleriyle çeşitli senaryolar denenmiştir. Böylelikle korunaklılık seviyesi arttıkça ağ ömrünün nasıl etkilenebileceği incelenmiştir. Ortaya çıkan ağ ömrü sonuçları, tanımlanan her iki belirsizlik kümesi içinde,  $\Gamma$  değeriyle birlikte azalma eğilimi gösterirken bir noktadan sonra sabitlenmektedir.

Veri üretim miktarındaki belirsizlik ele alınırken beklenen değerlerin [0,1-05] aralığında rastgele şekilde sapmalarına izin verilmiştir. Buradaki rastgelelikten dolayı veri setlerinin ağ ömrü üzerinde etkisi olabileceği düşünülmüş ve araştırılmıştır. Farklı veri setlerinin kullanılarak aynı örneklemin incelenmesi sonucunda yine deterministik modelin, belirsizlik ile gürbüz modelden daha iyi başa çıkamadığı görülmüştür.

Sonuç olarak, veri üretim belirsizliğinin bu kadar net görülebildiği KVAA'larda, deterministik yaklaşım ile elde edilen optimal tasarımların gerçekleşen veri üretim hızlarının varsayılandan farklı olmaları durumunda beklenen performansı gösteremediği görülmüştür. Bu durum söz konusu KVAA olunca, yani insan sağlığı

açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmesi sebebiyle istenmemektedir. Ağ ömrünün en iyilenmesi hem maddi kaynakların verimli kullanılması hem de insan sağlığında sorun teşkil etmemesi açısından önemlidir. Ancak gerçek hayatta deterministik modeldeki optimal ağ ömrüne hiçbir zaman ulaşılama ihtimali göz ardı edilecek kadar küçük bir olasılık değildir. Bu bağlamda, teorideki ağ ömründen küçük bir ödün vererek tasarımların daha korunaklı hale getirilmesi, en kötü durumda bile iyi bir performans elde edilmesi çok daha makuldür. Veri akışının aniden kesilmesi yerine en azından gürbüz modelin verdiği ağ ömrü süresi baz alınarak sensörlerin kontrolü gerçekleştirilebilirse sistemin kesintisiz çalışması sağlanabilir.

KVAA teknolojisi KAA'lar içerisinde yeni yeni gelişme gösteren bir alandır. KVAA alanında optimizasyon problemleri bile çok yaygın çalışılmıyorken olay-odaklı yaklaşımın benimsendiği trafik belirsizliğinin dikkate alındığı problemler üzerine optimizasyon problemleri neredeyse hiç çalışılmamıştır. Literatürde konuyla doğrudan ilgili olduğu düşünülen sadece iki çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalar ortaya koydukları gürbüz modelin ticari çözümler ile çözülmesinin çok zor olduğunu belirterek sezgisellere yönelmişlerdir. Yapılan bu tez çalışmasının, KVAA'lar üzerinde hem deterministik bir model hem de gürbüz bir model sunması ve matematiksel modellerin çözülerek optimal sonuçlara ulaşılmış olması bakımından literatüre katkı sağlaması beklenilmektedir.

Gelecek çalışmalarda KVAA'lar üzerinde başka bir belirsizlik konusu olan sensörlerin vücut içerisinde uzuvların hareketinden dolayı sabit kalamaması ele alınarak enerji verimli bir optimal ağ tasarımı probleminin incelenmesi planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Benefit, A.**, The evolution of wireless sensor networks, Silicon Lab. Inc., Austin, TX, USA, White Paper Rev 1.0, 1–5. [Internet]. Erişim Tarihi: Temmuz, 2020. Erişim Adresi: <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>
- [2] **Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. ve Cayirci, E.**, (2002). Wireless sensor networks: a survey, *Computer networks*, 38(4), 393-422.
- [3] **Küçüköner, E. M. ve Yavuz, E.**, (2016). Yaşlı ve engelli hastalar için uzaktan takip sistemi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(2), 99-104.
- [4] **Türker, G. F. ve Kutlu, A.**, (2012). Giyilebilir EKG uygulaması ve kullanılabilir kablosuz iletişim teknolojilerinin karşılaştırılması, *Akademik Bilişim*.
- [5] **Walsh, M., Hayes, M. ve Nelson, J.**, (2009). Robust performance for an energy sensitive wireless body area network—an anti-windup approach, *International Journal of Control*, 82(1), 59-73.
- [6] **Zhang, Y., Zhang, B. ve Zhang, S.**, (2017). A lifetime maximization relay selection scheme in wireless body area networks, *Sensors*, 17(6), 1267.
- [7] **Engmann, F., Katsriku, F. A., Abdulai, J. D., Adu-Manu, K. S. ve Banaseka, F. K.**, (2018). Prolonging the lifetime of wireless sensor networks: A review of current techniques, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 23.
- [8] **Bradai, N., Fourati, L. C., ve Kamoun, L.**, (2014). Investigation and performance analysis of MAC protocols for WBAN networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 46, 362-373.
- [9] **García, J. ve Peña, A.**, (2018). Robust optimization: concepts and applications, *Nature-inspired Methods for Stochastic, Robust and Dynamic Optimization*, 7.
- [10] **Bertsimas, D. ve Sim, M.**, (2004). The price of robustness. *Operations research*, 52(1), 35-53.
- [11] **Ghamari, M., Janko, B., Sherratt, R. S., Harwin, W., Piechockic, R. ve Soltanpur, C.**, (2016). A survey on wireless body area networks for ehealthcare systems in residential environments. *Sensors*, 16(6), 831.
- [12] **Kadel, R., Islam, N., Ahmed, K. ve Halder, S. J.**, (2019). Opportunities and Challenges for Error Correction Scheme for Wireless Body Area Network-A Survey, *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 8(1), 1.
- [13] **Qu, Y., Zheng, G., Ma, H., Wang, X., Ji, B. ve Wu, H.**, (2019). A survey of routing protocols in WBAN for healthcare applications, *Sensors*, 19(7), 1638.

- [14] **Yuan, X., Li, C., Ye, Q., Zhang, K., Cheng, N., Zhang, N., ve Shen, X.,** (2018). Performance analysis of IEEE 802.15. 6-based coexisting mobile WBANs with prioritized traffic and dynamic interference. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(8), 5637-5652.
- [15] **Roy, M., Chowdhury, C., ve Aslam, N.,** (2017). Designing an energy efficient WBAN routing protocol. In *2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)* 298-305.
- [16] **Jiang, W., Wang, Z., Feng, M., ve Miao, T.,** (2017). A survey of thermal-aware routing protocols in wireless body area networks. In *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, 2,17-21.
- [17] **Ordonez, F. ve Krishnamachari, B.,** (2004). Optimal information extraction in energy-limited wireless sensor networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(6), 1121-1129.
- [18] **Krause, A., Guestrin, C., Gupta, A. ve Kleinberg, J.,** (2006). Near-optimal sensor placements: Maximizing information while minimizing communication cost. In *Proceedings of the 5th international conference on Information processing in sensor networks*, 2-10.
- [19] **Hong, B. ve Prasanna, V. K.,** (2005). Maximum data gathering in networked sensor systems, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 1(1), 57-80.
- [20] **Doshi, S. ve Brown, T. X.,** (2002). Minimum energy routing schemes for a wireless ad hoc network, *IEEE INFOCOM*, 2, 1.
- [21] **Hua, C. ve Yum, T. S. P.,** (2005). Optimal routing for maximizing lifetime of wireless sensor networks, *IEEE INFOCOM*.
- [22] **Sankar, A. ve Liu, Z.,** (2004). Maximum lifetime routing in wireless ad-hoc networks. In *IEEE INFOCOM*, 2, 1089-1097.
- [23] **Madan, R. ve Lall, S.,** (2006). Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 5(8), 2185-2193.
- [24] **Giridhar, A. ve Kumar, P. R.,** (2005). Maximizing the functional lifetime of sensor networks, In *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 5-12.
- [25] **Subramanian, R. ve Fekri, F.,** (2006). Sleep scheduling and lifetime maximization in sensor networks: fundamental limits and optimal solutions. *5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 218-225
- [26] **Ghosh, A., Khalid, S. ve Harigovindan, V. P.,** (2015). Performance analysis of wireless body area network with thermal energy harvesting, *IEEE*, 916-920
- [27] **Fei, Z., Li, B., Yang, S., Xing, C., Chen, H., ve Hanzo, L.,** (2016). A survey of multi-objective optimization in wireless sensor networks: Metrics, algorithms, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 550-586.

- [28] **Zorzi, M., ve Rao, R. R.**, (2003). Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance. *IEEE transactions on Mobile Computing*, 2(4), 349-365.
- [29] **Yu, Y., Krishnamachari, B., ve Prasanna, V. K.**, (2004). Energy-latency tradeoffs for data gathering in wireless sensor networks. In *IEEE INFOCOM 2004*, Cilt 1.
- [30] **Yao, Y., Cao, Q., ve Vasilakos, A. V.**, (2014). EDAL: An energy-efficient, delay-aware, and lifetime-balancing data collection protocol for heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE/ACM transactions on networking*, 23(3), 810-823.
- [31] **Suto, K., Nishiyama, H., Kato, N., ve Huang, C. W.**, (2015). An energy-efficient and delay-aware wireless computing system for industrial wireless sensor networks. *IEEE Access*, 3, 1026-1035.
- [32] **Nama, H., Chiang, M., ve Mandayam, N.**, (2006). Utility-lifetime trade-off in self-regulating wireless sensor networks: A cross-layer design approach. In *2006 IEEE International Conference on Communications* 8, 3511-3516.
- [33] **Xie, D., Wei, W., Wang, Y., ve Zhu, H.**, (2013). Tradeoff between throughput and energy consumption in multirate wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 13(10), 3667-3676.
- [34] **Liao, S., ve Zhang, Q.**, (2014). A multiutility framework with application for studying tradeoff between utility and lifetime in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(10), 4701-4711.
- [35] **Tsouri, G. R., Prieto, A. ve Argade, N.**, (2012). On increasing network lifetime in body area networks using global routing with energy consumption balancing, *Sensors*, 12(10), 13088-13108.
- [36] **Reusens, E., Joseph, W., Latré, B., Braem, B., Vermeeren, G., Tanghe, E., ... ve Blondia, C.**, (2009). Characterization of on-body communication channel and energy efficient topology design for wireless body area networks, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 13(6), 933-945.
- [37] **Ehyaie, A., Hashemi, M. ve Khadivi, P.**, (2009). Using relay network to increase life time in wireless body area sensor networks, *IEEE*, 1-6.
- [38] **Chai, R., Wang, P., Huang, Z. ve Su, C.**, (2014). Network lifetime maximization based joint resource optimization for wireless body area networks, *IEEE*, 1088-1092.
- [39] **Wu, G., Chen, Z., Guo, L. ve Wu, J.**, (2018). An Optimal Online Resource Allocation Algorithm for Energy Harvesting Body Area Networks, *Algorithms*, 11(2), 14.
- [40] **Yaqoob, M. M., Fatima, K., Shamshirband, S., Mosavi, A. ve Khurshid, W.**, (2019). AMHRP: Adaptive Multi-Hop Routing Protocol to Improve Network Lifetime for Multi-Hop Wireless Body Area Network.
- [41] **Elias, J., ve Mehaoua, A.**, (2012)., Energy-aware topology design for wireless body area networks. In *2012 IEEE international conference on communications (ICC)*, 3409-3410

- [42] **Wang, L. ve Luo, H.**, (2014). Robust linear programming with norm uncertainty, *Journal of Applied Mathematics*.
- [43] **Ben-Tal, A. ve Nemirovski, A.**, (1999). Robust solutions of uncertain linear programs, *Operations research letters*, 25(1), 1-13.
- [44] **Ben-Tal, A. ve Nemirovski, A.**, (1998). Robust convex optimization. *Mathematics of operations research*, 23(4), 769-805.
- [45] **El Ghaoui, L., Oustry, F. ve Lebret, H.**, (1998). Robust solutions to uncertain semidefinite programs, *SIAM Journal on Optimization*, 9(1), 33-52.
- [46] **El Ghaoui, L. ve Lebret, H.**, (1997). Robust solutions to least-squares problems with uncertain data, *SIAM Journal on matrix analysis and applications*, 18(4), 1035-1064.
- [47] **Bertsimas, D., Pachamanova, D. ve Sim, M.**, (2004). Robust linear optimization under general norms. *Operations Research Letters*, 32(6), 510-516.
- [48] **Goldfarb, D. ve Iyengar, G.**, (2003). Robust portfolio selection problems. *Mathematics of operations research*, 28(1), 1-38.
- [49] **Bertsimas, D. ve Thiele, A.**, (2004). A robust optimization approach to supply chain management. In *International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization*, 86-100.
- [50] **El Ghaoui, L. ve Nilim, A.**, (2005). Robust solutions to markov decision problems with uncertain transition matrices. *Operations Research*, 53(5), 780-798.
- [51] **Bertsimas, D. ve Sim, M.**, (2003). Robust discrete optimization and network flows. *Mathematical programming*, 98(1-3), 49-71.
- [52] **Flushing, E. F. ve Di Caro, G. A.**, (2013). Relay node placement for performance enhancement with uncertain demand: A robust optimization approach. In *2013 11th International Symposium and Workshops on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, 556-563.
- [53] **D'andreamiovanni, F. ve Nardin, A.**, (2015). Towards the fast and robust optimal design of wireless body area networks. *Applied Soft Computing*, 37, 971-982.
- [54] **Cheng, Z., Perillo, M. ve Heinzelman, W. B.**, (2008). General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies. *IEEE Transactions on mobile computing*, 7(4), 484-497.
- [55] **Ben-Tal, A., El Ghaoui, L. ve Nemirovski, A.**, (2009). *Robust optimization*, Princeton University Press, Cilt 28.
- [56] **Bertsimas D., Brown D. ve Caramanis C.**, (2011). Theory and Applications of Robust Optimization. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 53(3), 454 - 501.
- [57] **Ye W. ve Ordenez F.**, (2008). Robust Optimization Models for Energy-limited Wireless Sensor Networks under Distance Uncertainty. *IEEE Transactions on WirelessCom*, 7(6); 2161– 2169.
- [58] **Düzgün R.**, (2012). *Robust Optimization With Multible Ranges and Chance Constraints*. Degree of Doctor of Philosophy Thesis, Lehigh University, 115.

- [59] **Moazeni, M.**, (2006). *Flexible Robustness in Linear Optimization*. Doktora tezi. Waterloo, Ontario, Canada,
- [60] **Kodjo, A.**, (2014). *Dimensionnement et optimisation des réseaux de collecte sans fil* (doktora Tezi). Nice.





## EKLER

EK 1: Örnekleme kümelerinin oluşturulduğu algoritma.

EK 2:  $U^+$  için  $\Gamma \in \{0,25|N^*|; 0,3|N^*|; 0,4|N^*|\}$  iken farklı örneklem büyüklüklerinde ağ ömrü değerleri.

EK 3:  $U^+$  için  $\Gamma \in \{0,05|N^*|; 0,1|N^*|; 0,15|N^*|\}$  iken farklı örneklem büyüklüklerinde ağ ömrü değerleri.

EK 4:  $U^\pm$  için  $\Gamma \in \{0,25|N^*|; 0,3|N^*|; 0,4|N^*|\}$  iken farklı örneklem büyüklüklerinde ağ ömrü değerleri.

EK 5:  $U^\pm$  için  $\Gamma \in \{0,05|N^*|; 0,1|N^*|; 0,15|N^*|\}$  iken farklı örneklem büyüklüklerinde ağ ömrü değerleri.

## EK 1

```
//Baş Bölümü
// x eksenini -10, 10 arasında
// y eksenini 46, 70 arasında
xci = randomno.nextDouble() * 20 - 10;
yci = randomno.nextDouble() * (70 - 46) + 46;

// Sağ Kol Bölümü
// x > 20, y < 42, 0.91 x - y - 38.2 < 0
// Bu durumda 20 < x < 88.13 olmalı
// ve 0.91 x - 38.2 < y < 42
xci = randomno.nextDouble() * (88.13 - 20) + 20;
yci = randomno.nextDouble() * (42 - (0.91 *
xci - 38.2)) + 0.91 * xci - 38.2;

// Sol Bacak Bölümü
// x eksenini -20, -5 arasında
// y eksenini -105, -24 arasında
xci = randomno.nextDouble() * (-5 + 20) - 20;      ** Koordinatların oluşturulması
yci = randomno.nextDouble() * (-24 + 105) - 105;

// Sağ Kol Bölümü
// x eksenini 5, 20 arasında
// y eksenini -105, -24 arasında
xci = randomno.nextDouble() * (20 - 5) + 5;
yci = randomno.nextDouble() * (-24 + 105) - 105;

// Gövde Bölümü
// x eksenini -20, 20 arasında
// y eksenini -25, 45 arasında
xci = randomno.nextDouble() * 40 - 20;
yci = randomno.nextDouble() * (45 + 25) - 25;

Forall  $\forall i \in N$ ;
Forall  $\forall j \in N$ ;

 $d_{ij} = \sqrt{(xc_i - xc_j)^2 + (yc_i - yc_j)^2}$  &  $d_{ij} = d_{ji}$       ** Mesafelerin belirlenmesi
If  $d_{ij} \leq IMM$ ;
Then  $a_{ij} = 1$  &  $a_{ij} = a_{ji}$       ** Ayrıtların belirlenmesi
Forall  $\forall (i, j) \in A$ ;

 $PTX_{ij} = 16.7 + 1.97d_{ij}^{3.38}$ ;      ** Transfer enerjisi
If  $j \neq BS$ ;
Then  $PTX_{ij} = PTX_{ji}$ ;
```

Şekil Ek.1 : Örnekleme kümelerinin üretildiği algoritma.

**EK 2****Çizelge Ek.2 : 17 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 17$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,267	0,285	0,121	0,232	0,129	0,207
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,185	0,205	0,084	0,196	0,090	0,152
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,185	0,205	0,084	0,196	0,090	0,152
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,185	0,205	0,084	0,196	0,090	0,152
$\Gamma =  N^* $	0,185	0,204	0,084	0,196	0,090	0,152

**Çizelge Ek.2 : 25 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 25$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,104	0,456	0,536	0,533	0,116	0,349
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,084	0,369	0,425	0,429	0,086	0,279
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,084	0,358	0,425	0,429	0,086	0,276
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,084	0,352	0,425	0,429	0,086	0,275
$\Gamma =  N^* $	0,084	0,350	0,424	0,428	0,086	0,274

**Çizelge Ek.2 : 33 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 33$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,168	0,139	0,866	0,403	0,389	0,393
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,145	0,109	0,666	0,305	0,308	0,307
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,145	0,109	0,666	0,305	0,308	0,307
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,145	0,109	0,666	0,305	0,308	0,307
$\Gamma =  N^* $	0,145	0,109	0,663	0,305	0,307	0,306

**Çizelge Ek.2 : 41 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 41$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,539	0,273	0,569	0,174	0,796	0,470
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,398	0,213	0,449	0,133	0,627	0,364
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,398	0,213	0,449	0,133	0,626	0,364
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,398	0,213	0,449	0,133	0,626	0,364
$\Gamma =  N^* $	0,397	0,212	0,447	0,133	0,623	0,362

**Çizelge Ek.2 : 49 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 49$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,292	0,502	0,573	0,120	0,514	0,400
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,244	0,383	0,436	0,096	0,440	0,320
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,244	0,383	0,436	0,096	0,440	0,320
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,244	0,383	0,436	0,096	0,440	0,320
$\Gamma =  N^* $	0,243	0,382	0,434	0,096	0,438	0,319

**Çizelge Ek.2 : 57 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 57$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	1,007	0,640	1,305	1,456	0,423	0,966
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,740	0,515	0,959	1,049	0,341	0,721
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,740	0,515	0,959	1,049	0,341	0,721
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,740	0,515	0,959	1,049	0,341	0,721
$\Gamma =  N^* $	0,734	0,512	0,949	1,037	0,340	0,715

**Çizelge Ek.2 : 65 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 65$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,719	0,937	1,038	0,415	1,517	0,925
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,558	0,721	0,768	0,301	1,154	0,700
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,558	0,721	0,768	0,301	1,154	0,700
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,558	0,721	0,768	0,301	1,154	0,700
$\Gamma =  N^* $	0,554	0,715	0,761	0,300	1,137	0,693

### EK 3

**Çizelge Ek.3 : 17 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^* =17$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,267	0,285	0,121	0,232	0,129	0,207
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,210	0,205	0,097	0,196	0,102	0,162
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,185	0,205	0,084	0,196	0,090	0,152
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,185	0,205	0,084	0,196	0,090	0,152
$\Gamma =  N^* $	0,185	0,204	0,084	0,196	0,090	0,152

**Çizelge Ek.3 : 25 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 25$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,104	0,456	0,536	0,533	0,116	0,349
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,095	0,420	0,456	0,484	0,106	0,312
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,084	0,392	0,425	0,429	0,093	0,284
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,084	0,388	0,425	0,429	0,089	0,283
$\Gamma =  N^* $	0,084	0,350	0,424	0,428	0,086	0,274

**Çizelge Ek.3 : 33 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 33$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,168	0,139	0,866	0,403	0,389	0,393
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,145	0,121	0,666	0,305	0,319	0,311
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,145	0,117	0,666	0,305	0,308	0,308
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,145	0,110	0,666	0,305	0,308	0,307
$\Gamma =  N^* $	0,145	0,109	0,663	0,305	0,307	0,306

**Çizelge Ek.3 : 41 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 41$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,539	0,273	0,569	0,174	0,796	0,470
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,440	0,223	0,491	0,157	0,703	0,403
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,405	0,213	0,458	0,147	0,658	0,376
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,398	0,213	0,449	0,140	0,634	0,367
$\Gamma =  N^* $	0,397	0,212	0,447	0,133	0,623	0,362

**Çizelge Ek.3 : 49 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 49$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,292	0,502	0,573	0,120	0,514	0,400
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,263	0,450	0,526	0,100	0,470	0,362
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,244	0,406	0,478	0,096	0,440	0,333
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,244	0,393	0,456	0,096	0,440	0,326
$\Gamma =  N^* $	0,243	0,382	0,434	0,096	0,438	0,319

**Çizelge Ek.3 : 57 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 57$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	1,007	0,640	1,305	1,456	0,423	0,966
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,894	0,558	1,092	1,139	0,367	0,810
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,813	0,521	0,985	1,052	0,345	0,743
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,762	0,515	0,959	1,049	0,341	0,725
$\Gamma =  N^* $	0,734	0,512	0,949	1,037	0,340	0,715

**Çizelge Ek.3 : 65 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 65$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,719	0,937	1,038	0,415	1,517	0,925
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,558	0,761	0,907	0,387	1,154	0,753
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,558	0,721	0,813	0,310	1,154	0,711
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,558	0,721	0,775	0,301	1,154	0,702
$\Gamma =  N^* $	0,554	0,715	0,761	0,300	1,137	0,693

**EK 4****Çizelge Ek.4 : 17 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 17$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,198	0,211	0,090	0,172	5,811	1,296
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,163	0,164	0,074	0,172	5,811	1,277
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,163	0,164	0,074	0,172	5,811	1,277
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,163	0,164	0,074	0,172	5,811	1,277
$\Gamma =  N^* $	0,163	0,164	0,074	0,172	5,811	1,277

**Çizelge Ek.4 : 25 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 25$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,077	0,338	0,397	0,395	0,086	0,258
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,070	0,300	0,397	0,363	0,079	0,242
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,070	0,298	0,397	0,363	0,079	0,242
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,070	0,298	0,397	0,363	0,079	0,242
$\Gamma =  N^* $	0,070	0,298	0,397	0,363	0,079	0,242

**Çizelge Ek.4 : 33 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 33$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,124	0,103	0,641	0,299	0,288	0,291
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,124	0,084	0,554	0,285	0,279	0,265
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,124	0,084	0,554	0,285	0,279	0,265
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,124	0,084	0,554	0,285	0,279	0,265
$\Gamma =  N^* $	0,124	0,084	0,554	0,285	0,279	0,265

**Çizelge Ek.4 : 41 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 41$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,400	0,202	0,421	0,129	0,589	0,348
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,371	0,185	0,398	0,119	0,560	0,327
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,371	0,185	0,398	0,119	0,560	0,327
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,371	0,185	0,398	0,119	0,560	0,327
$\Gamma =  N^* $	0,371	0,185	0,398	0,119	0,560	0,327

**Çizelge Ek.4 : 49 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 49$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,216	0,372	0,424	0,089	0,381	0,296
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,180	0,318	0,364	0,077	0,323	0,253
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,180	0,318	0,364	0,077	0,323	0,253
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,180	0,318	0,364	0,077	0,323	0,253
$\Gamma =  N^* $	0,180	0,318	0,364	0,077	0,323	0,253

**Çizelge Ek.4 : 57 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 57$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,746	0,474	0,966	1,079	0,313	0,716
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,616	0,413	0,817	0,933	0,274	0,611
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,616	0,413	0,817	0,933	0,274	0,611
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,616	0,413	0,817	0,933	0,274	0,611
$\Gamma =  N^* $	0,616	0,413	0,817	0,933	0,274	0,611

**Çizelge Ek.4 : 65 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 65$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,533	0,694	0,769	0,307	0,651	0,591
$\Gamma = 0,25 N^* $	0,533	0,629	0,667	0,261	0,559	0,530
$\Gamma = 0,3 N^* $	0,533	0,629	0,667	0,261	0,559	0,530
$\Gamma = 0,4 N^* $	0,533	0,629	0,667	0,261	0,559	0,530
$\Gamma =  N^* $	0,533	0,629	0,667	0,261	0,559	0,530



**EK 5****Çizelge Ek.5 : 17 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^* =17$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,198	0,211	0,090	0,172	5,811	1,296
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,173	0,164	0,078	0,172	5,811	1,280
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,163	0,164	0,074	0,172	5,811	1,277
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,163	0,164	0,074	0,172	5,811	1,277
$\Gamma =  N^* $	0,163	0,164	0,074	0,172	5,811	1,277

**Çizelge Ek.5 : 25 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 25$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,077	0,338	0,397	0,395	0,086	0,258
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,070	0,327	0,397	0,363	0,081	0,248
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,070	0,318	0,397	0,363	0,079	0,246
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,070	0,306	0,397	0,363	0,079	0,243
$\Gamma =  N^* $	0,070	0,298	0,397	0,363	0,079	0,242

**Çizelge Ek.5 : 33 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 33$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,124	0,103	0,641	0,299	0,288	0,291
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,124	0,093	0,569	0,285	0,279	0,270
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,124	0,089	0,560	0,285	0,279	0,267
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,124	0,085	0,554	0,285	0,279	0,265
$\Gamma =  N^* $	0,124	0,084	0,554	0,285	0,279	0,265

**Çizelge Ek.5 : 41 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 41$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,400	0,202	0,421	0,129	0,589	0,348
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,371	0,185	0,398	0,122	0,564	0,328
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,371	0,185	0,398	0,119	0,560	0,327
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,371	0,185	0,398	0,119	0,560	0,327
$\Gamma =  N^* $	0,371	0,185	0,398	0,119	0,560	0,327

**Çizelge Ek.5 : 49 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 49$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,216	0,372	0,424	0,089	0,381	0,296
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,192	0,349	0,398	0,077	0,334	0,270
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,180	0,327	0,374	0,077	0,323	0,256
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,180	0,318	0,364	0,077	0,323	0,253
$\Gamma =  N^* $	0,180	0,318	0,364	0,077	0,323	0,253

**Çizelge Ek.5 : 57 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 57$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,746	0,474	0,966	1,079	0,313	0,716
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,683	0,413	0,856	0,949	0,274	0,635
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,645	0,413	0,817	0,933	0,274	0,616
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,622	0,413	0,817	0,933	0,274	0,612
$\Gamma =  N^* $	0,616	0,413	0,817	0,933	0,274	0,611

**Çizelge Ek.5 : 65 düğümlü örneklem için ağ ömrü değerleri.**

$ N^*  = 65$	1	2	3	4	5	Ortalama
deterministik	0,533	0,694	0,769	0,307	0,651	0,591
$\Gamma = 0,05 N^* $	0,533	0,629	0,697	0,276	0,596	0,546
$\Gamma = 0,1 N^* $	0,533	0,629	0,668	0,261	0,566	0,531
$\Gamma = 0,15 N^* $	0,533	0,629	0,667	0,261	0,559	0,530
$\Gamma =  N^* $	0,533	0,629	0,667	0,261	0,559	0,530

