

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA YÖNLÜ ANTEN KULLANIMI VE
UÇTAN UCA GECİKMİYİ KISITLAMANIN FARKLI PERFORMANS
METRİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Kerem YUMUŞAK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Ali Murat DEMİRTAŞ

ARALIK 2022



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA YÖNLÜ ANTEN KULLANIMI VE UÇTAN UCA GECİKMEYİ KISITLAMAMANIN FARKLI PERFORMANS METRİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Ahmet Kerem YUMUŞAK

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Ali Murat DEMİRTAŞ

Tarih: Aralık 2022

Kablosuz haberleşme ve Nesnelerin İnterneti'nde (IoT) önemli bir yere sahip olan Kablosuz Sensör Ağları (KSA), sağladıkları farklı avantajlar sayesinde güncelliğini korumakta ve gelecek için de potansiyel yeni çalışma alanlarının oluşmasına olanak sağlamaktadır. Pil ömrünün kısıtlı olduğu KSA'da optimizasyon ve enerji verimliliği son derece önem taşımaktadır. Günümüzde kullanılan KSA her ne kadar birçok farklı alanda kullanılabilir de bazı özel durumlar için güncellemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında ele alınan özel durumların ilki, Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC) mimarisinde de belirtilen düşük gecikmeyle haberleşme yapılabilmesi ve bu sayede veri tazeliğinin sağlanmasıdır. Bahsedilen durumu sağlayabilmek amacıyla bu tez çalışmasında, her bir sensörde üretilen verinin baz istasyonuna iletilmesi için gereken gecikmenin ya da uçtan uca gecikmenin (UUG) kısıtlanması önerilmektedir. Bu tezde ele alınan ikinci özel durum ise KSA'daki tümyönlü antenlerin yetersiz kaldığı yerler için performansın artırılmasıdır. KSA'da bir düğümün, çevresindeki birçok düğümle haberleşmesi istenildiği için anten tipi olarak genellikle tümyönlü anten tercih edilmektedir. Öte yandan ilgili anten tipinin seçilmesi yüzünden diğer haberleşme sistemlerinde erişilen düşük bit hata oranlarına (BER) ulaşamamaktadır. Ayrıca tümyönlü anten kullanımdan ötürü, KSA'daki farklı düğümler arasındaki haberleşme sırasında meydana gelen girişimin üstesinden gelen yöntemler daha sınırlı ve verimsiz olmaktadır. Buna ek olarak ilgili anten ile bütün

yönlerde haberleşme yapılması dolayısıyla gereksiz enerji kaybı meydana gelmektedir. İkinci özel durumda yer alan bu sıkıntıların üstesinden gelmek için yönlü anten kullanılması teşvik edilmektedir. Yönlü anten kullanımı sayesinde, tümyönlü antenli durumlarda erişilemeyecek düşük BER'e ulaşılması sağlanmaktadır. Yönlü antenin kullanmak bize girişimin etkisinden kurtulmak için farklı çalışma imkânları sağlayarak daha verimli yöntemlerin oluşturulmasına da olanak sağlamaktadır. Bu aşamada UUG'yi sınırlamak, daha verimli yöntemlerin oluşturulması için ayrıca faydalı olmaktadır. Bunlara ek olarak sadece belli bir yönde haberleşmeye olanak sağlanması sayesinde enerji verimliliği de artmaktadır. Bütün bu bahsedilen durumlar göz önüne alarak bu tez çalışması özelinde dört farklı çalışma gerçekleştirilmektedir: İlk çalışmada sadece tümyönlü anten kullanılarak gecikmeyi kısıtlamanın yaşam süresine etkisi incelenmektedir. Bu çalışmaya göre gecikmeyi kısıtlamanın yaşam süresi üzerinde negatif bir etkisi olduğu görülmektedir. Ayrıca KSA'daki düğüm sayısını artırmanın da yaşam süresini artırdığı görülmektedir. İkinci çalışmada UUG'yi kısıtlamanın yaşam süresi ve ortalama BER üzerindeki etkisi incelenmektedir. İlgili çalışmada her senaryo için hem tümyönlü hem de yönlü antenler kullanılarak yönlü antenlerin sağladığı avantajlar ön plana çıkarılmaktadır. Bu çalışmada UUG'yi kısıtlamanın yaşam süresini azaltırken ortalama BER'i de artırdığı gözükmektedir. Ayrıca yönlü anten kullanılan senaryolarda yaşam süresinde büyük artış gözlenirken BER'de de büyük düşüş gözlenmektedir. Üçüncü çalışmada sadece yönlü anten kullanılmakla birlikte iki farklı inceleme yapılmaktadır. İlk incelemede sensör ağı yoğunluğu göz önüne alınarak belli bir BER ile iletişimin gerçekleşebilmesi için gerekli minimum UUG hesaplanmaktadır. İkinci incelemedeyse UUG'yi ve BER'i kısıtlamanın yaşam süresi üzerindeki etkisi incelenmektedir. Her iki incelemede de yönlü antenin sağladığı avantajlardan yararlanılarak kısıt için çok düşük BER değerleri kullanılabilir. Bu çalışma sonucunda KSA'daki düğüm sayısı arttıkça belli bir BER'e ulaşmak için gerekli minimum UUG'nin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, UUG'nin yanı sıra BER'i kısıtlamanın da yaşam süresini düşürdüğü gözlenmektedir. Son çalışmada ise yönlü anten kullanımının ve UUG'yi kısıtlamanın bize sağladığı avantajlar göz önüne alınarak girişimi engellemek için iki farklı yöntem ele alınmaktadır. Bu yöntemlerin ilki için halihazırda popüler bir yöntem olan Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA) tercih edilmektedir. İkinci yöntem ise bu tez için tasarlanıp yönlü antenlerin avantajlarından daha fazla yararlanan ve verimi artırmak için kullanılan Girişim

Engelleyici Model'dir (GEM). Her iki yöntemin kullanılması sonucu hesaplanan veri hızı ve yaşam süresi karşılaştırılarak performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Buna göre GEM kullanılarak TDMA'e kıyasla daha yüksek veri hızına erişilmektedir. Ayrıca GEM'in, TDMA ile aynı veri hızına sahip olduğu durumlarda da yaşam süresinde artış meydana gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz sensör ağları, Gecikme, Uçtan uca gecikme, Yönlü anten, Yaşam süresi, Bit hata oranı, Girişim, Veri hızı, MIP, Veri tazeliği, Nesnelerin İnterneti





ABSTRACT

Master of Science

THE IMPACT OF DIRECTIONAL ANTENNA USE AND RESTRICTION OF END-TO-END DELAY ON DIFFERENT PERFORMANCE METRICS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Ahmet Kerem YUMUŞAK

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

Supervisor: Dr. Ali Murat DEMİRTAŞ

Date: December 2022

Wireless Sensor Networks (WSN), which have an important place in terms of wireless communication and the internet of things (IoT), are still up-to-date due to their various advantages and allow new potential workspace areas for the future. Due to limited battery life, optimization and energy efficiency are very important in the WSN. Although the current WSN can be used in many different areas, updates are needed for some special cases. The first of the special cases that are dealt with in this thesis is to be able to communicate with the low delay specified in the Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC) architecture, thus ensuring data freshness. To achieve the aforementioned situation in this thesis, it is recommended to restrict the delay or end-to-end (E2E) delay that is required for transmitting the data from each generator sensor to the base station. The second special case discussed in this thesis is to increase the performance for the places where the omnidirectional antennas in the WSN are insufficient. Since it is desired for a node to communicate with many nodes around it, an omnidirectional antenna is generally preferred as the antenna type for the WSN. On the other hand, the low bit error rates (BER) that are achieved in other communication systems cannot be achieved for this antenna type. In addition, due to the use of omnidirectional antennas, methods for dealing with interference between different nodes in the WSN are more limited and inefficient. Furthermore, unnecessary

energy loss occurs due to communication within all directions for this antenna type. In order to overcome these problems in the second special case, the use of directional antennas is encouraged. Thanks to the use of the directional antenna, low bit error rates that cannot be reached in cases with omnidirectional antennas are achieved. Using a directional antenna also allows us to create more efficient methods by providing different working opportunities to get rid of the effect of interference. Limiting the E2E delay at this stage is also beneficial for creating more efficient methods. In addition to these, energy efficiency is also increased thanks to the possibility of communication in only a certain direction. Considering all these mentioned situations, four different studies are carried out for this thesis: In the first study, the effect of restricting the delay on the lifetime is examined while using only omnidirectional antennas. In this study, it is seen that restricting the delay has a negative effect on the lifetime. Furthermore, it is observed that increasing the number of nodes in the WSN also increases the lifetime. The second study examines the effect of restricting E2E delay on the lifetime and average BER. In the related study, the advantages of directional antennas are highlighted by using both omnidirectional and directional antennas for each scenario. In this study, it is observed that restricting the E2E delay not only reduces lifetime but also increases average BER. In addition, a large increase in the lifetime and a large decrease in average BER is observed while using directional antennas. In the third study, only directional antennas are used, but two different analyses are carried out. In the first analysis, the minimum E2E delay required for communication with a particular BER is calculated, considering the density of the sensor network. The second analysis examines the impact of restricting E2E delay and BER on the lifetime. In both analyses, very low BER values can be used for the restriction by taking advantage of the benefits provided by the directional antenna. As a result of this study, it is seen that as the number of nodes in the WSN increases, the minimum E2E delay required to reach a certain BER decreases. Additionally, it is seen that restricting BER decreases the lifetime like the E2E delay restriction. In the last study, considering the advantages of using directional antennas and limiting the E2E delay, two different methods are discussed to prevent interference. For the first of these methods, Time Division Multiple Access (TDMA), which is currently a popular method, is preferred. The second method is the Interference Preventing Model (IPM), which is designed for this thesis and makes more use of the advantages of directional antennas so that efficiency can be increased.

Performance evaluation is made by comparing the bit rates and lifetimes that are calculated by using both methods. Accordingly, a higher bit rate is achieved by using IPM compared to TDMA. Moreover, in cases where IPM has the same bit rate as TDMA, there is an increase in lifetime.

Keywords: Wireless sensor networks, Delay, End-to-end delay, Directional antenna, Lifetime, Bit error rate, Interference, Bit rate, MIP, Data freshness, Internet of Things





TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Dr. Ali Murat DEMİRTAŞ'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.





İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	3
1.1.1. KSA’da yaşam süresi	3
1.1.2. KSA’da veri tazeliği.....	3
1.1.3. KSA’da bit hata oranı	4
1.1.4. KSA’da yönlü anten modeli.....	5
1.1.5. KSA’da girişim	6
1.1.6. KSA’da TDMA.....	6
1.1.7. KSA’da veri hızı	7
1.2. Teorik Çalışmalar.....	7
1.2.1. Düşük gecikme.....	8
1.2.2. Karesel genlik kiplemesi (QAM).....	8
1.2.3. QAM bit hata oranı	11
1.2.4. Tümyönlü ve yönlü anten hakkında.....	12
1.2.5. Yönlü anten kazancı.....	13
1.2.6. Picocell.....	15
1.2.7. Milimetrik dalga ve 5G NR FR 2 bantları	15
1.2.8. Girişim / Semboller arası girişim	16
1.2.9. Veri hızı.....	16
1.2.10. Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA).....	16
1.3. Kullanılan Metotlar/Platformlar.....	17
2. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA KAYNAK DÜĞÜMDEN BAZ İSTASYONUNA KADAR OLAN GECİKMENİN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ	19
2.1. Amaç	19
2.2. Çalışma.....	19
2.2.1. Gecikme	19
2.2.2. Enerji modeli.....	20
2.2.3. KSA’nın tanımlanışı	21
2.2.4. KSA topolojisi.....	21
2.2.5. Yaşam süresi	22
2.2.6. Optimizasyon modeli	22
2.3. Sonuçlar	25
2.3.1. Yaşam süresi-düğüm sayısı grafiği	25
2.3.2. Yaşam süresi artış yüzdesi-düğüm sayısı grafiği	26
3. YÖNLÜ ANTEN KULLANILAN KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA UÇTAN UCA GECİKMENİN YAŞAM SÜRESİ VE ORTALAMA BİT HATA ORANINA ETKİSİ	29
3.1. Amaç	29
3.2. Çalışma.....	29
3.2.1. Uçtan uca gecikme	29
3.2.2. Enerji modeli.....	30
3.2.3. KSA’nın tanımlanışı	30

3.2.4	KSA topolojisi.....	30
3.2.5	Yaşam süresi	31
3.2.6	Yönlü anten kazancı ve avantajları	31
3.2.7	Fiziksel katman ve SNR hesabı.....	32
3.2.8	Ortalama bit hata oranı hesabı.....	33
3.2.9	Optimizasyon modeli	34
3.3	Sonuçlar.....	35
3.3.1	Normalize edilmiş yaşam süresi–düğüm sayısı grafiği.....	35
3.3.2	Ortalama BER-UUG kısıtı grafiği.....	36
4.	YÖNLÜ ANTEN KULLANILAN KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA BİT HATA ORANINI VE UÇTAN UCA GECİKMİYİ KISITLAMANIN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ.....	39
4.1	Amaç	39
4.2	Çalışma.....	40
4.2.1	Uçtan uca gecikme	40
4.2.2	Enerji modeli	40
4.2.3	KSA'nın tanımlanışı.....	40
4.2.4	KSA topolojisi.....	40
4.2.5	Yaşam süresi	40
4.2.6	Yönlü anten kazancı ve avantajları	40
4.2.7	Fiziksel katman ve SNR hesabı.....	41
4.2.8	Bit hata oranı kısıtı	41
4.2.9	Optimizasyon modelleri	41
4.2.9.1	Uçtan uca gecikmeyi enküçükleme modeli.....	42
4.2.9.2	Yaşam süresini enbüyükleme modeli.....	43
4.3	Sonuçlar.....	45
4.3.1	Minimum uçtan uca gecikme–düğüm sayısı grafiği	45
4.3.2	Normalize yaşam süresi–bit hata oranı grafikleri	46
4.3.2.1	Minimum UUG kısıtlı durumla UUG kısıtsız durumun karşılaştırılması	46
4.3.2.2	3'lü UUG kısıtlı durumla UUG kısıtsız durumun karşılaştırılması.....	47
4.3.2.3	4'lü UUG kısıtlı durumla UUG kısıtsız durumun karşılaştırılması.....	48
5.	YÖNLÜ ANTEN KULLANILAN VE UÇTAN UCA GECİKMENİN KISITLANDIĞI KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA GİRİŞİMİ ENGELLEMEK İÇİN KULLANILAN FARKLI YÖNTEMLERİN VERİ HIZI VE YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ	51
5.1	Amaç	51
5.2	Çalışma.....	52
5.2.1	Uçtan uca gecikme	52
5.2.2	Enerji modeli	52
5.2.3	KSA'nın tanımlanışı.....	52
5.2.4	KSA topolojisi.....	52
5.2.5	Üretilen bit miktarı	52
5.2.6	Yönlü antenin avantajları	53
5.2.7	Fiziksel katman ve SNR hesabı.....	53
5.2.8	Bit hata oranı kısıtı	53
5.2.9	Optimizasyon modeli	53
5.2.10	Girişimi engellemek için kullanılan yöntemler hakkında	53
5.2.10.1	TDMA	54
5.2.10.2	Girişim Engelleyici Model (GEM)	56

5.2.10.3	GEM'in kuralları.....	56
5.2.10.4	GEM hakkında genel bilgiler.....	58
5.2.10.5	GEM'in kullanılma şekli.....	59
5.2.10.6	GEM algoritması.....	60
5.2.10.7	GEM için örnek.....	70
5.2.11	Toplam Geçen Süre (TGS).....	71
5.2.12	Yaşam süresi.....	72
5.2.13	Veri hızı.....	73
5.3	Sonuçlar.....	73
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1:Yönlü Antenler İçin Radyasyon Modelleri.....	5
Şekil 1.2: Kiplemelerin Geometrik Gösterimleri.....	9
Şekil 1.3: Periyot Süresince Geçerli Darbe Fonksiyonu.....	9
Şekil 1.4: QAM Fonksiyonel Blok Diyagramı.....	10
Şekil 1.5: Farklı QAM'ler İçin Bit Hata Oranları.....	11
Şekil 1.6: 64 QAM İçin Geometrik Gösterim.....	11
Şekil 1.7: Antenlerin Radyasyon Şekilleri.....	13
Şekil 1.8: Yönlü Anten Hüzmesinin Yüzey Alanının Gösterimi.....	13
Şekil 1.9: Steradyanın Görsel Olarak Gösterimi.....	14
Şekil 1.10: Semboller Arası Girişim Örneği.....	16
Şekil 2.1: 60 Dügümlü Topolojide 2'li Gecikme Örneği.....	22
Şekil 2.2: Model 1.....	24
Şekil 2.3: Dügüm Sayısının Farklı Gecikmeler İçin Yaşam Süresine Etkisi.....	26
Şekil 2.4: Dügüm Sayısının Farklı Gecikmeler İçin YSA'ya Etkisi.....	27
Şekil 3.1: Uçtan Uca Bit Hata Oranının Görselleştirilmesi.....	33
Şekil 3.2: Model 2.....	34
Şekil 3.3: Dügüm Sayısının Farklı UUG Kısıtları ve Anten Tipleri İçin Yaşam Süresine Etkisi.....	35
Şekil 3.4: UUG Kısıtının Farklı Dügüm Sayıları ve Anten Tipleri İçin Ortalama BER'e Etkisi.....	37
Şekil 4.1: Model 3.....	43
Şekil 4.2: Model 4.....	44
Şekil 4.3: Dügüm Sayısının Minimum UUG'ye Etkisi.....	45
Şekil 4.4: Bit Hata Oranının Farklı Dügüm Sayıları İçin Normalize Yaşam Süresine Etkisi (Minimum UUG Kısıtlı ve Kısıtsız Durumlar İçin).....	47
Şekil 4.5: Bit Hata Oranının Farklı Dügüm Sayıları İçin Normalize Yaşam Süresine Etkisi (3'lü UUG Kısıtlı ve Kısıtsız Durumlar İçin).....	48
Şekil 4.6: Bit Hata Oranının Farklı Dügüm Sayıları İçin Normalize Yaşam Süresine Etkisi (4'lü UUG Kısıtlı ve Kısıtsız Durumlar İçin).....	49
Şekil 5.1: TDMA Uygulanan Senaryo İçin Zaman Dilimi Ataması.....	55
Şekil 5.2: TDMA Yöntemindeki Farklı Zaman Dilimlerinin Kullanıldığı Hüzmeler.....	55
Şekil 5.3: Kural 1'in Görselleştirilmesi.....	57
Şekil 5.4: Kural 2'nin Görselleştirilmesi.....	57
Şekil 5.5: Kural 3'ün Görselleştirilmesi.....	58
Şekil 5.6: GEM'in Kullanılması İçin Akış Şeması.....	60
Şekil 5.7: Direkt Baz İstasyonuna İletim Yapan Hüzmeler Dışındaki Hüzmelerin Görselleştirilmesi.....	62
Şekil 5.8: Birinci Adım'a Göre Geçici Zaman Dilimi Atamasının Görselleştirilmesi.....	63
Şekil 5.9: İkinci Adım'ın Görselleştirilmesi.....	66
Şekil 5.10: Üçüncü Adım'ın Görselleştirilmesi.....	67
Şekil 5.11: Dördüncü Adım'ın Görselleştirilmesi.....	68
Şekil 5.12: GEM Algoritması Uygulanan Senaryo İçin Zaman Dilimi Ataması.....	70

Şekil 5.13: GEM Yöntemindeki Farklı Zaman Dilimlerinin Kullanıldığı Hüzmeler	70
Şekil 5.14: Şekil 5.1'deki Senaryoda Düğüm 17'nin Veri İletimi	72



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: MICA 2 Ayrık Enerji Seviyeleri Tablosu	20
Çizelge 3.1: Fiziksel Katman İçin Kullanılan Parametreler	32
Çizelge 3.2: Sinyal Gürültü Oranı Hesabı	33
Çizelge 5.1: (3,6) Düğüm Çifti İçin İletilen ve Alınan Hüzmelerin Zaman Dilimleri	64
Çizelge 5.2: Normalize Edilmiş Üretilen Bit Sayısı ve TGS Değerleri	73
Çizelge 5.3: Normalize Edilmiş Veri Hızı ve Yaşam Süresi Değerleri	75
Çizelge 5.4: Aynı Veri Hızına Sahip 2 UUG'li TDMA ve 4 UUG'li GEM	76





KISALTMALAR

5G NR FR	: 5G Yeni Radyo Frekans Aralığı (5G New Radio Frequency Range)
BER	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BER_{req}	: Sağlanması gereken bit hata oranı
BER_{UU}	: Uçtan Uca Bit Hata Oranı
FSPL	: Serbest Uzay Yol Kaybı (Free Space Path Loss)
GEM	: Girişim Engelleyici Model
GZD	: Geçici Zaman Dilimleri
HS	: Hüzme Sayısı
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
İAZ	: İletilen ve Alınanların Zamanları
KSA	: Kablosuz Sensör Ağları
KZ	: Kesişenlerin Zamanları
MIP	: Karışık Tamsayı Programlama (Mixed Integer Programming)
QAM	: Karesel Genlik Kipleme (Quadrature Amplitude Modulation)
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
TGS	: Toplam Geçen Süre
URLLC	: Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (Ultra-Reliable Low-Latency Communication)
UUG	: Uçtan Uca Gecikme
UUG^k	: k düğümü tarafından iletilen verilerin baz istasyonuna iletilmesi için gerekli uçtan uca gecikme
UUG^{max}	: İzin verilen maksimum uçtan uca gecikme miktarı
YSAY	: Yaşam Süresi Artış Yüzdesi
ZD	: Zaman Dilimi



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
c	Işık hızı
d	Düğümler arası mesafe
d_{yeni}	Yönlü anten sayesinde düğümler arasında iletişime izin verilen yeni uzaklık
e_t	Bit iletimi esnasında verici devresinde harcanan enerji
e_d	Biti belli bir mesafeye iletmek için harcanan enerji
e_d^{yeni}	Yönlü anten sayesinde biti belli bir mesafeye iletmek için harcanan yeni enerji
E_{tx}	İletme enerjisi
E_{rx}	Alma enerjisi
f	Frekans
k	Boltzman sabiti
l	MICA 2 Ayrık Enerji Seviyesi
$R_{max}(l)$	MICA 2 Ayrık Enerji Seviyesi l için gönderici ve alıcı düğümler arasında izin verilen maksimum mesafe
λ	Yol kaybı katsayısı
$f_{i,j}^k$	k düğümünde üretilip i düğümünden j düğümüne iletilen veriler
$a_{i,j}^k$	k düğümünde üretilen verinin i düğümünden j düğümüne iletilip iletilmediğini gösteren ikili değişken
e_i	i düğümünün başlangıçtaki pil enerjisi
$g_{i,j}^k$	k düğümünde üretilip i düğümünden j düğümüne iletilen bit
B	Bant genişliği
T	Alıcıdaki sıcaklık
L_p	Veri paketindeki bit sayısı
$i \in W$	Başka düğümlere veri ileten düğümler
$j \in V$	Başka düğümlerden veri alımı yapan düğümler
$k \in W$	Kendi verisini üreten düğümler (sensörler)
$m \in Y$	Kullanılan farklı zaman dilimleri
$n \in X$	Kullanılan farklı geçici zaman dilimleri



1. GİRİŞ

Kablosuz Sensör Ağları (KSA), ortamın fiziksel koşullarını tespit etmek ve toplanan verileri haberleşme amacıyla merkezi bir konuma aktarmak için kullanılan, mekânsal olarak dağılmış sensörlerdir. Burada, sensörlerde üretilen veriler direkt olarak ya da başka sensörler vasıtasıyla baz istasyonuna ulaştırılmaktadır [1]. İlk olarak askeri amaçlar için tasarlanmış olsalar da kullanım alanları sürekli olarak artış göstermektedir. Günümüzde akıllı ev sistemleri, araç takibi ve tıbbi görüntüleme gibi farklı kullanım alanları olan KSA, bu sayede Nesnelerin İnternet'inin (IoT) temel yapı bloklarından birini oluşturmaktadır [2]. Halen askeri alanlarda da yaygın olarak kullanılan KSA, sualtı [3] ve insansız hava araçlarına [4] entegre edilebilmesi sayesinde farklı çevresel durumlarda kullanılabilir. Akademik ve endüstriyel alanda son derece popüler olan KSA, optimizasyon [5], güvenilirlik [6] ve güvenlik [7] gibi farklı açılardan araştırılmaktadır. Son gelişmeler sayesinde KSA'nın ses [8] ve video iletimi [9] için kullanılmasının yanı sıra doğal afet takibi [10] gibi son derece kritik alanlarda kullanılması KSA'nın gelecekte de güncelliğini koruyacağı hakkında bize fikir vermektedir. Bahsedilen özelliklere ek olarak daha birçok kullanım alanı bulunan KSA'nın bazen özel durumlarda kullanılabilmesi için bazı güncellemeler yapılması gerekmektedir.

Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, KSA'nın iki farklı özel duruma uygun olması için güncellemeler yapılması amaçlanmaktadır. Bu özel durumların ilki KSA'nın Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC) mimarisinde de belirtilen düşük gecikmeyle haberleşme yapılabilmesi ve bu sayede veri tazeliğinin sağlanabilmesidir. Bu özel durumu sağlayabilmek için kullanılacağı yerlere göre sensörlerde üretilen verilerin baz istasyonuna iletilmesi için gereken gecikmeyi ya da uçtan uca gecikmeyi (UUG) kısıtlamanın üzerinde durulmaktadır. İkinci özel durum ise, KSA haberleşmesinde kullanılan tümyönlü antenlerin yetersiz kaldığı yerler için performansın artırılmasıdır. KSA'da herhangi bir düğümün çevresindeki düğümlerle haberleşebilmesi için genelde tümyönlü anten tercih edilmektedir. Bununla birlikte ilgili antenin kullanıldığı

KSA'da, başka haberleşme sistemleri için ulaşılabilen bit hata oranlarına (BER) ulaşamamaktadır. Ayrıca tümyönlü anten içeren KSA'da, diğer haberleşme sistemlerinde de görülen, girişimin meydana gelmemesi için TDMA kullanılmakta ve bu da bütün verilerin baz istasyonuna iletilme süresini artırırken veri hızını azaltarak verimi düşürmektedir. Ayrıca tümyönlü anten ile bütün yönlerde haberleşme yapılması yüzünden gereksiz enerji kaybı da meydana gelmektedir. KSA'da bulunan düğümlerdeki bataryanın kısıtlı ve değiştirilmesinin zor olması dolayısıyla enerji kaybı burada ayrıca sıkıntı yaratmaktadır. Bahsedilen sıkıntıların üstesinden gelmek için KSA'da yönlü anten kullanılması teşvik edilmektedir. Bu sayede tümyönlü antenli KSA'nın erişemeyeceği düşük BER'e erişilebilmektedir. Ayrıca girişimin etkisinden kurtulmak için verimi daha yüksek çalışmaların yapılmasına imkân sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak yönlü antenin sadece belli bir doğrultuda haberleşmeye olanak sağlaması sayesinde enerji verimliliği de gerçekleşmektedir. Bu tez çalışmasında bahsedilen güncellemelerin sağladığı avantajlar göz önüne alınarak dört farklı çalışma yapılmaktadır: İlk çalışmada sadece tümyönlü anten kullanılmakta ve gecikmeyi kısıtlamanın yaşam süresine etkisi üzerinde durulmaktadır. Daha sonraki çalışmada UUG'yi kısıtlamanın yaşam süresi ve ortalama BER üzerindeki etkisi incelenmektedir. İlgili çalışmada her senaryo için hem tümyönlü hem de yönlü antenler kullanıldığından yönlü antenlerin tümyönlü antenlere göre üstünlüğü belirtilmektedir. Üçüncü çalışmada yönlü antenin sağladığı avantajlardan yararlanılarak iki farklı durum incelenmektedir. İlk durum için sensör ağı yoğunluğu göz önüne alınıp çok düşük bir BER ile iletişimin gerçekleşebilmesi için gerekli minimum UUG hesaplanmaktadır. İkinci durumda da UUG'yi ve BER'i kısıtlamanın yaşam süresi üzerindeki etkisi incelenmektedir. Burada düğümler, tümyönlü antenleri senaryoların ulaşamadığı düşük BER kısıtları ile haberleşmeye zorlanmaktadır. Dördüncü çalışmada ise hem yönlü anten kullanımının hem de UUG'yi kısıtlamanın bize sağladığı avantajlardan birlikte yararlanılarak girişimi engelleyen iki farklı yöntem üzerinde durulmaktadır. Bu yöntemlerin ilkinde popüler bir yöntem olan Time Division Multiple Access (TDMA) kullanılırken diğerinde ise bu tez çalışması için oluşturulan Girişim Engelleyici Model (GEM) yöntemi ile yönlü antenlerin sağladığı avantajlardan daha çok yararlanılarak verimin artırılması amaçlanmaktadır. İki farklı durumda veri iletimi esnasında kullanılan veri hızları ve yaşam süreleri karşılaştırıldıktan sonra GEM modelinin sağladığı avantajlar paylaşılmaktadır.

1.1. Literatür Araştırması

1.1.1. KSA'da yaşam süresi

Sınırlı güce ve pil değişimi için uygun olmayan çevresel koşullara sahip olan KSA'da yaşam süresinin maksimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde farklı metodolojilerin kullanılmasının yaşam süresine etkisi araştırılmıştır [11], [12], [13], [14], [15]. Örnek olarak, eğer iletim enerjisi devre enerjisine kıyasla küçükse [12], yaşam süresini maksimize etmek için çok sekmeli yönlendirme tercih edilmektedir. Ek olarak Çalışma [13]'te görüldüğü üzere, ağ için toplam atlama sayısının minimize edilmesi, sensör ağı yaşam süresinin yaklaşık %40 oranında azalmasına neden olmaktadır. Öte yandan bu çalışmada toplam gecikme ele alındığı için düşük gecikme-yaşam süresi ödünleşmesi tam olarak incelenememektedir. Bununla birlikte yaşam süresinin optimize edilmesi için Çalışma [14]'te genetik algoritma kullanılması teşvik edilirken Çalışma [15]'te KSA için birden fazla baz istasyonunun kullanılması önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında [13]'ten farklı olarak toplam gecikme süresini değil, her bir sensörde üretilen verinin baz istasyonuna iletilmesi için gerekli gecikmeyi/UUG'yi ve ayrıca bu iletim esnasında meydana gelen BER'i kısıtlamanın yaşam süresine etkisi incelenmektedir. Ayrıca yönlü antenin sağladığı enerji verimliliğinden yararlanılarak yaşam süresi artırılmaya çalışılmaktadır. Bunlara ek olarak girişimi engellemek için bu tezde önerilen iki ayrı yöntemin yaşam süresine etkisi de araştırılmaktadır.

1.1.2. KSA'da veri tazeliği

Veri tazeliği bilişim sistemleri için önemli veri kalitesi özelliklerinden biridir [16]. Gecikme ve çıktı optimizasyonu ile doğrudan ilgili olan bu konseptte, hemen kullanılabilir ve kullanışlı mevcut verilere sahip olmak amaçlanmaktadır [17]. KSA'da veri tazeliği üzerine literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır [17], [18], [19]. Çalışma [17]'de yazarların önerdikleri Data Freshness Aware Content-Centric Networking (DFCCN) protokolünde veri tazeliğini incelemek için uçtan uca gecikme ele alınmaktadır. Çalışma [18], insansız hava araçlarında taze veri için uygun rota planlamasının öneminden bahsedilmektedir. Çalışma [19] ise, fog layer'da veri tazeliğinin n maksimize edilmesi amacıyla publish/subscribe (P/S)'e dayalı gözlem şeması önermektedir.

Bu tez çalışması esnasında da veri tazeliği ele alınırken, [17] ile benzer yaklaşım uygulanarak uçtan uca gecikme ele alınacaktır. Öte yandan [17], [18], ve [19]'un aksine, bu tez çalışmasında düşük gecikme gereksinimini sağlamak ve bu sayede uygun veri tazeliğini sağlamak için sensör düğümü tarafından üretilen verinin belli bir gecikme ya da UUG eşiğini aşmadan baz istasyonuna iletilmesi sağlanmaktadır. Bu kısıtlamanın kullanılmadığı durumlarda, oluşturulan verilerin tamamı olmasa da bazıları daha uzun gecikmelere sahip olabilmekte ve KSA'nın tamamında veri tazeliği sağlanamamaktadır. Bu yüzden, bütün sensör düğümlerinin baz istasyonuna aynı anda veri iletilmesinin gerektiği durumlarda kısıtlamanın kullanılmaması büyük sıkıntılar meydana getirebilmektedir. Örnek olarak, bir orman yangınının meydana gelip gelmediğini tespit etmek için sensörler tarafından ölçülen sıcaklığa aynı anda erişilmesi, yangının tamamen kontrol altına alınması açısından son derece önem taşımaktadır. Gecikme kısıtlamasını kullanmanın bir başka avantajı da gizli dinleme gibi ağlara yönelik olası saldırıların [20] gerçekleşmesini önlemesidir. Bu tip senaryolarda yönlü antenlerin kullanılması, ayrıca büyük avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle bu tezde (tezin ilk çalışması hariç), yönlü antenlerin kullanıldığı senaryolar için farklı UUG kısıtları uygulanmaktadır. Burada bahsedilen yönlü antenlerin kullanıldığı KSA'da UUG'nin kısıtlanması, bilindiği kadarıyla, ilk kez bu tezde gerçekleştirilmektedir. Bu sayede ilgili tezde, çok düşük BER değerlerine ulaşabilmek için gerekli minimum UUG miktarları da incelenebilmektedir. Bunlar göz önüne alınarak, veri tazeliği ve URLLC açısından yenilikçi bir tez çalışması amaçlanmakta ve farklı gecikme/UUG kısıtlarının, yaşam süresi, BER ve veri hızına (girişimin engellendiği durumlarda) etkisi incelenmektedir.

1.1.3. KSA'da bit hata oranı

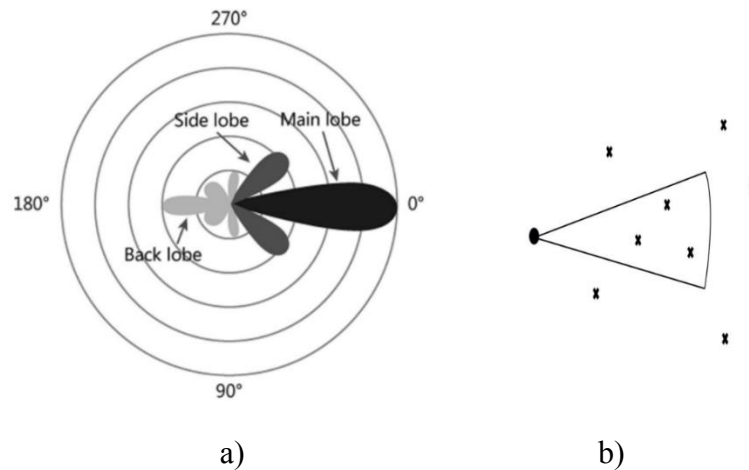
KSA, kablosuz haberleşmenin önemli yapıtaşlarından olduğu için KSA'da BER'i inceleyen farklı literatür çalışmaları bulunmaktadır [21], [22], [23]. Çalışma [21]'de yazarlar, ortak bir girişim kaynağının bulunması halinde KSA'daki BER'i incelemektedir. Çalışma [22]'de, farklı paket boyutları ve uzaklıklar için KSA'daki BER incelemektedir. Bunlara ek olarak Çalışma [23]'te de KSA ve kooperatif KSA'daki yaşam süresi ve BER ödünleşmesi incelenmektedir.

Her üç kaynak da BER'i farklı açılardan incelemesine rağmen hiçbirinde haberleşme sistemlerinde gereken maksimum bit hata oranı olan 10^{-9} 'a [24] ulaşamamaktadır.

Özellikle Çalışma [8]'deki KSA'da ses iletimi ve Çalışma [9]'daki KSA'da video aktarımı esnasında düşük hata oranına ulaşılması son derece önemli olmaktadır. Bu yüzden, bu tez çalışmasında [21], [22] ve [23]'ün aksine yönlü anten kullanımı tercih edilerek bahsedilen 10^{-9} 'luk BER'e ulaşılması hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında ayrıca KSA'daki her bir sensörde üretilen verinin baz istasyonuna iletilmesi için önceden belirlenen bir BER'in üstüne çıkmaması sağlanmaktadır. Bu sayede, KSA'daki her bir sensörde üretilen verinin iletilmesi esnasında meydana gelen BER kontrol altına alınabilmektedir.

1.1.4. KSA'da yönlü anten modeli

Gerçek hayatta kullanılan yönlü antenlerin radyasyon modeli, Şekil 1.1-a'da görülmektedir. İlgili modelde ana lobun yanı sıra yan loblar ve arka lob bulunmaktadır. Çalışma [25] ve [26]'da KSA'da yönlü antenin teorik bir şekilde incelenebilmesi için Şekil 1.1-b'de görülen yaklaşık model kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında da yine teorik bir çalışma gerçekleştirilmekle birlikte [25] ve [26]'nın aksine bit hata oranının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve farklı düğümler arasında meydana gelen girişimin verimli bir şekilde engellenmesi hedeflenmektedir. İlgili tez çalışmasında, birbirine girişim uygulayabilecek çok fazla düğüm bulunduğu Şekil 1.1-b'deki modelin kullanılmasına karar verilmiştir. Bununla birlikte [25] ve [26]'ya ek olarak ana lob dışındaki lobların sebep olduğu kayıplar da göz önüne alınacaktır.



Şekil 1.1:Yönlü Antenler İçin Radyasyon Modelleri: a) Gerçek Radyasyon Modeli b) Yaklaşık Radyasyon Modeli

1.1.5. KSA’da girişim

Haberleşme sistemleri için istenilmeyen bir durum olan girişim, KSA’da da meydana gelmektedir. Literatürde KSA’daki girişimi engellemek için ya da etkisini incelemek için farklı çalışmalar bulunmaktadır [27], [28], [29], [30]. Çalışma [27]’de yazarlar ağ katmanında kullanılmak üzere ağaç topolojisi için bir protokol yığını önermektedir. İlgili model sayesinde girişim kaynaklı sıkıntılar oluşmaya başladıktan kısa bir süre sonra KSA kendisini tekrar güvenilir hale getirebilmektedir. Çalışma [28]’de ağ yoğunluğu ile girişim gücü arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bir başka çalışmada yazarlar [29], tümyönlü anten ile veri iletimi gerçekleştirilirken girişim bölgesinde yer alan komşu düğümlere iletimin engellenip enerji verimliliğinin sağlandığı LMR (Location Multicast Routing) yöntemini önermektedir. Bununla birlikte Çalışma [30]’da ise yazarlar, girişime karşı konulması için kanal atlama özelliğine sahip Pseudo-Random Hopping (PRH), Latin Rectangular Based Channel Hopping (LRCH) ve geliştirilmiş LRCH algoritmalarını teşvik ettikten sonra yöntemleri birbiriyle kıyaslamaktadır.

Bahsedilen çalışmalarda girişimi engellemek/azaltmak için farklı yöntemler kullanılsa da hiçbir çalışmada yönlü anten kullanmanın etkisi incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında, girişimi engellemek için yönlü antenlerin avantajlarından yararlanılarak oluşturulan GEM yöntemi sayesinde aynı anda gerçekleşen veri akışı miktarının artması amaçlanmaktadır. Bu sayede KSA’da üretilen verilerin baz istasyonuna iletilmesi için gereken süre azaltılarak veri hızının artırılması hedeflenmektedir.

1.1.6. KSA’da TDMA

Kullanıcıların aynı frekans üzerinde farklı zaman dilimlerini kullanarak haberleşmesini sağlayan TDMA yöntemini, KSA’ya modifiye entegre eden farklı literatür çalışmaları bulunmaktadır [31], [32]. Çalışma [31]’de olaya dayalı TDMA yöntemi önerilmektedir. Bu sayede KSA’daki kaynak düğüm sayısına göre TDMA çerçeve uzunluğu değiştirilerek kanal verimliliği artırılabilir. Çalışma [31]’de önerilen bit işlem tablosuna dayalı TDMA sayesinde enerji verimliliğinin arttığından bahsedilmektedir. Öte yandan diğer bir çalışmada [32], TDMA’ye bağlı Ortam Erişim Kontrolü (MAC) kullanılırken veri agregasyonu ve mekânsal yeniden kullanım göz önüne alınmaktadır. Bu sayede çalışmada önerilen lineer programlama modelinden

yararlanılarak endüstriyel KSA'da zaman dilimi ataması problemine bir çözüm sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında da, farklı sensörler arasındaki girişimi engellemek için kullanılan iki yöntemden biri TDMA iken diğeri ise TDMA'ye alternatif olması amacıyla bu tez için tasarlanan GEM yöntemidir. Bu sayede GEM'in, TDMA'ye göre sahip olduğu avantajlar incelenebilmektedir.

1.1.7. KSA'da veri hızı

Haberleşme sistemleri için önemli parametrelerden biri olan veri hızı, KSA için literatürde farklı şekillerde incelenmektedir [33], [34], [35]. Çalışma [33]'te, bant genişliği tahsis protokolü kullanılırken ağı bant genişliği sınırlamasını yansıtmak için veri hızından yararlanılmaktadır. Çalışma [34]'de yazarlar, kısa görev döngüsüne sahip düşük bütçeli ticari KSA'da yüksek veri hızına sahip vericiler kullanmanın enerji verimliliği açısından en uygun çözüm olduğundan bahsetmektedir. Öte yandan Çalışma [35]'te belirtilen ADR (Adaptive Data Rate) isimli algoritma sayesinde, Alınan İşaret Güç Göstergesi'ne (RSSI) göre veri hızı ayarlanabilmektedir. Bu sayede, KSA'nın harcadığı gücün büyük oranda azalmasına yardımcı olunmaktadır. Bu tezde, veri hızının artırılması için KSA'da yönlü anten kullanılırken uçtan uca gecikmenin kısıtlandığı GEM yönteminin sağladığı avantajlardan da yararlanılmaktadır.

1.2 Teorik Çalışmalar

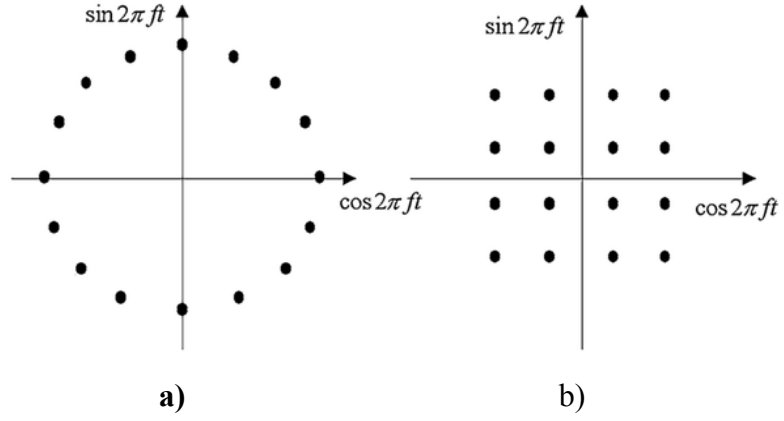
Bu kısımda tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için yapılan teorik çalışmalar belirtilmektedir. İlk olarak tez çalışmasında amaçlanan düşük gecikme konsepti hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Daha sonra sensörlerin haberleşmesi için seçilen QAM kipleme ve ilgili kipleme sonucu meydana gelen BER'in hesaplanması detaylı olarak açıklanmaktadır. Devamında, yönlü antenlerin tümyönlü antenlere karşı sahip oldukları avantajlar belirtilerek bu tezde amaçlanan performans iyileştirmesine nasıl bir katkıda bulunacakları açıklanmaktadır. Daha sonra ise steradyan konseptinden yararlanılarak yönlü anten kazancı hesabı gösterilmektedir. Bunun devamında, fiziksel katmanına ait olan picocell, milimetrik dalga, 5G Yeni Radyo Frekans Aralığı (5G NR FR 2) bantları gibi etkenler ele alınmaktadır. Son olarak girişim hakkında bilgi verilip girişimin engellendiği kısımlarda performans metriği olarak kullanılan veri hızı ve girişimi engellemek için popüler bir yöntem olan TDMA'den bahsedilmektedir.

1.2.1 Düşük gecikme

Düşük gecikme özellikle URLLC mimarisinde amaçlanan önemli gereksinimlerden biridir. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve buluta dayalı Radyo Erişim Şebekesi (C-RAN) gibi kablosuz haberleşmenin sağlandığı farklı durumlarda düşük gecikmeye sahip olmak büyük önem taşımaktadır. Bahsedilen teknolojilerde her geçen gün meydana gelen gelişmeler göz önüne alındığında, düşük gecikme ile haberleşmenin gelecekte daha da önemli bir yere sahip olması beklenmektedir.

1.2.2 Karesel genlik kiplemesi (QAM)

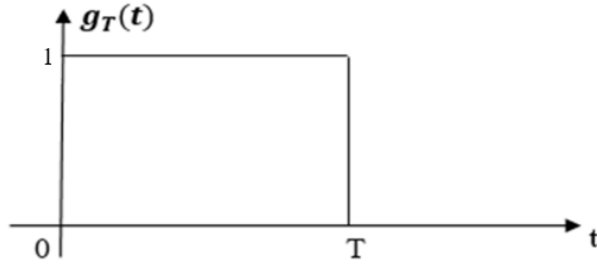
Bu çalışma esnasında sensör düğümleri arasındaki haberleşme için karesel genlik kiplemesi (QAM) tercih edilmektedir [36]. İlgili kiplemenin seçilmesinin en önemli sebebi, faz kaydırmalı kipleme (PSK) ve genlik kaydırmalı kiplemenin (ASK) aksine, genlik ve faz kiplemelerinin ikisinin de kullanılmasıdır. Bu sayede bahsedilen kiplemelere kıyasla QAM kullanmak kullanıcıya daha fazla imkân sağlamaktadır. Örnek olarak PSK kiplemesi, farklı fazda sinyal dalgalarının kullanımına olanak sağlasa da bütün sinyal dalgalarının aynı enerjiye (ϵ_s) sahip olma zorunluluğu bulunmaktadır. QAM sayesinde sinyal dalgalarının geometrik gösterimlerinde yer alan sinyal noktalarının ϵ_s yarıçaplı bir çember (Şekil 1.2-a) içinde bulunma zorunluluğu ortadan kalkmaktadır. Dolayısıyla Şekil 1.2-b'deki gibi sinyal dalgalarının vektörel gösterimleri sırasında farklı fazdaki sinyal noktalarının yanı sıra farklı enerjiye sahip sinyal noktaları da ayrıca gösterilebilmektedir. Benzer şekilde ASK'da da sinyal dalgaları farklı enerjiye sahip olabilseler bile farklı fazın kullanılamaması yüzünden sinyal noktalarının geometrik gösterimi daha kısıtlı olmaktadır. Şekil 1.2-b'de görüldüğü üzere farklı fazların kullanabilmesi sayesinde aynı enerjiye sahip farklı sinyal noktaları da birbirinden ayrılmaktadır. Bahsedilen avantajlar sayesinde QAM ile diğer kiplemelere nazaran daha az enerji miktarı ve daha düşük hata oranıyla haberleşme gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 1.2: Kiplerlerin Geometrik Gösterimleri: a) 16 PSK b) 16 QAM

Herhangi bir M-QAM için her bir sembol, $k = \log_2 M$ tane bit ile gösterilebilmektedir. QAM ile iletilen sinyal dalgaları en basit olarak Eşitlik (1.1)'de görülmektedir. İlgili eşitlikte A_{mc} ve A_{ms} , k-bit sekansları sinyal genliklerine haritalandırılırken elde edilen genlik seviyesi setlerini temsil etmektedir. Burada $g_T(t)$ ile belirtilen ve periyot süresince geçerli olan darbe fonksiyonu Şekil 1.3'te gösterilmektedir.

$$u_m(t) = A_{mc}g_T(t) \cos 2\pi f_c t - A_{ms}g_T(t) \sin 2\pi f_c t, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1.1)$$

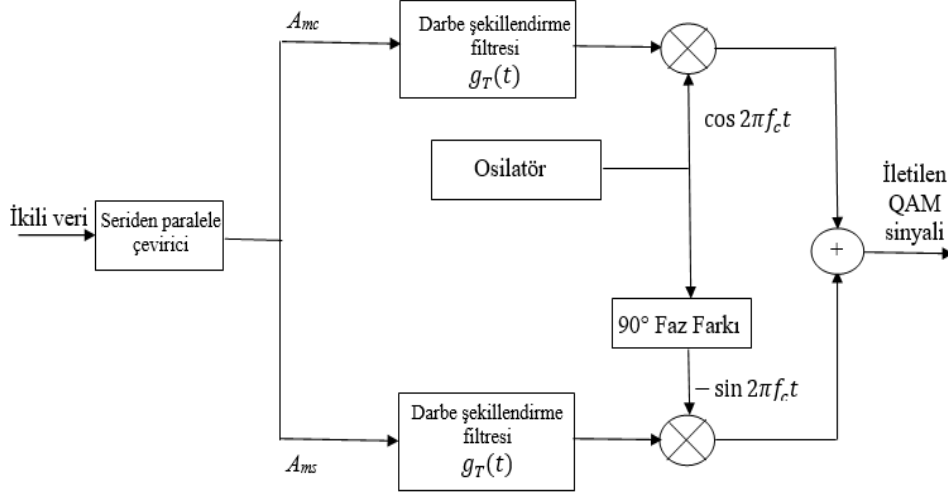


Şekil 1.3: Periyot Süresince Geçerli Darbe Fonksiyonu

Eğer QAM, önceden bahsedildiği üzere, dijital genlik kiplemesi ve dijital faz kiplemesinin bir araya getirilmiş hali şeklinde yazılırsa Eşitlik (1.2) elde edilmektedir. İlgili eşitlikte A_m farklı genlik setlerini belirtilirken θ_n de farklı faz farklarını temsil etmektedir.

$$u_{mn}(t) = A_m g_T(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_n), \quad m = 1, 2, \dots, M_1; \quad n = 1, 2, \dots, M_2 \quad (1.2)$$

QAM’de kullanılan modülâtörün fonksiyonel blok diyagram Şekil 1.4’te görülmektedir. Burada aynı taşıyıcı frekansa sahip sinüs ve kosinüs sinyallerini üretmek için osilatörle üretilen sinyale 90° faz farkı uygulanmaktadır.



Şekil 1.4: QAM Fonksiyonel Blok Diyagramı

Eğer QAM sinyalleri vektörel olarak gösterilmek isteniyorsa birbirine dik baz fonksiyonlarından yararlanılmalıdır. Örnek olarak 4 QAM için ortogonal baz fonksiyonları, Eşitlik (1.3) ve (1.4)’teki gibi seçilebilmektedir.

$$\psi_1(t) = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_s}} g_T(t) \cos 2\pi f_c t \quad (1.3)$$

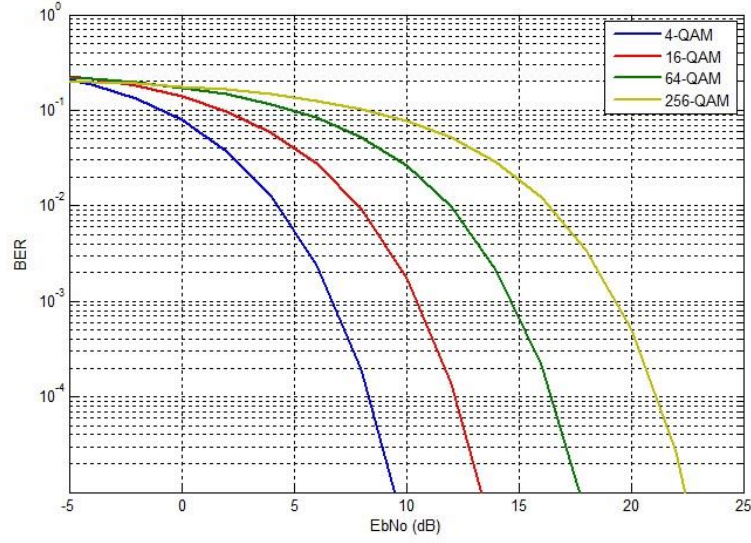
$$\psi_2(t) = -\sqrt{\frac{1}{\epsilon_s}} g_T(t) \sin 2\pi f_c t \quad (1.4)$$

İlgili baz fonksiyonları için M=4 olmak üzere, sinyaller Eşitlik (1.5)’teki gibi gösterilebilmektedir.

$$s_m = (\sqrt{\epsilon_s} A_{mc}, \sqrt{\epsilon_s} A_{ms}), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1.5)$$

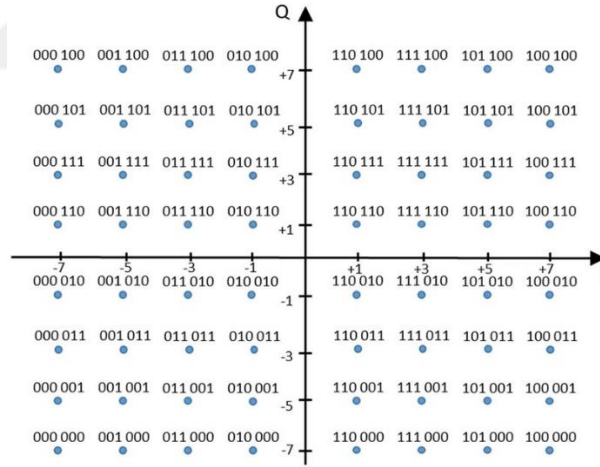
Farklı M-QAM’ler için M’in artması durumunda taşıyıcı sinyaller üzerinde daha fazla bit iletimi yapılabildiği için veri hızı artmaktadır. Bununla birlikte M’in artması durumunda, Şekil 1.5’te görüleceği üzere [37], aynı bit hata oranına ulaşmak için daha

yüksek SNR kullanmak gerekmektedir.



Şekil 1.5: Farklı QAM'ler İçin Bit Hata Oranları

Bu bilgiler doğrultusunda, tez çalışmasında kullanılacak kipleme için Şekil 1.6'da da görülebilen 64 QAM tercih edilmektedir.



Şekil 1.6: 64 QAM İçin Geometrik Gösterim

1.2.3 QAM bit hata oranı

Yukarıdaki kısımda da bahsedildiği üzere, tez çalışması esnasında sensör düğümleri birbirleri arasında haberleşirken 64 QAM kullanmaktadır. QAM için bit hata oranı, Eşitlik (1.6)'daki gibi hesaplanmaktadır [36]. İlgili eşitsizlikte E_b/N_o , bit başına düşen Sinyal Gürültü Oranı'nı (SNR) temsil ederken, $\log_2(M)$ ile tek bir sembol için

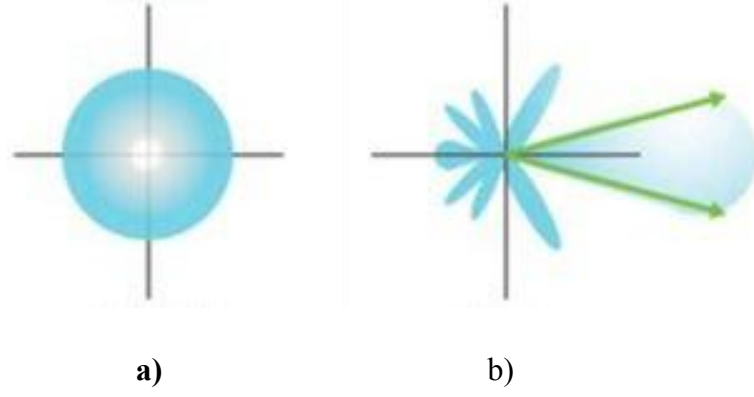
kullanılan bit sayısı belirtilmektedir. Bu çalışma özelinde 64 QAM kullanıldığı için Eşitlik (1.6)'da M=64 alınmaktadır.

$$BER = \frac{1 - \left(1 - 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{(M-1) N_o}}\right)\right)^2}{\log_2(M)} \quad (1.6)$$

1.2.4 Tümyönlü ve yönlü anten hakkında

Tümyönlü ve yönlü anten modellerin farklı özellikleri ve kullanım alanları bulunmaktadır [38]. Tümyönlü antenler Şekil 1.7-a'da görüleceği üzere düzgün bir şekilde belli bir yarıçapa sahip dairesel alana iletim yapabilmektedir. Dairesel alanın her bir bölgesine iletişim yapılabilse de iletim mesafesinin kısıtlı olması yönlü antenler için bir dezavantajdır. Buna ek olarak tümyönlü antenlerin anten kazancı 0 desibel izotropik (dBi) olarak kabul edildiği için haberleşme esnasında düşük bit hata oranına ulaşılması güçleşmektedir. Tümyönlü antenlerin aksine yönlü antenler, Şekil 1.7-b'de görüldüğü üzere, belli bir yönde daha efektif bir şekilde haberleşme sağlanabilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu tez çalışması esnasında yönlü anten kullanımının teşvik edilmesinin birden fazla sebebi bulunmaktadır. Tümyönlü antenlere kıyasla yönlü antenler:

- Aynı iletim enerjisi için daha uzağa iletim yapabilmektedir.
- Aynı mesafelere iletim yapılırken daha az enerji kullanımına olanak sağlamaktadır.
- Sağladıkları anten kazancı sayesinde iletilen sinyallerin SNR'ını artırdığı için daha düşük bit hata oranına olanak sağlamaktadır.
- Belli bir yönde haberleşmeye olanak sağladığı için girişim gibi istenilmeyen durumların engellenmesinde ya da etkisinin azaltılmasında kolaylık sağlamaktadır.

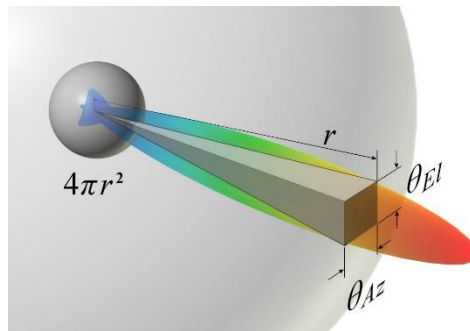


Şekil 1.7: Antenlerin Radyasyon Şekilleri: a) Tümyönlü Anten b) Yönlü Anten

1.2.5 Yönlü anten kazancı

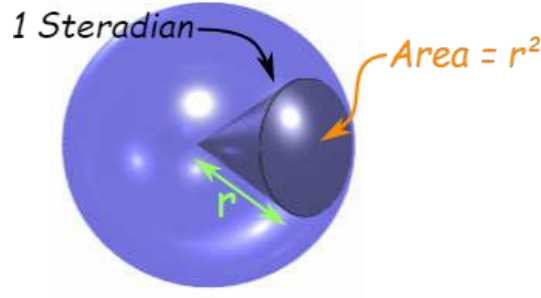
Antenlerin en önemli performans parametrelerinden olan anten kazancı hesaplanırken, Eşitlik (1.7)'deki orantıdan yararlanılmaktadır [39]. Yönlü anten hüzmesinin yüzey alanı Şekil 1.8'de detaylı olarak gösterilirken kürenin yüzey alanı da hüzmenin üzerinde bulunduğu küre için hesaplanmaktadır. Bu kısımda kürenin yüzey alanı ve hüzmenin küre üzerindeki yüzey alanı derece² cinsinden yazılmalıdır. Herhangi bir kürenin yüzey alanının derece² cinsinden hesaplanabilmesi için öncelikle steradyan (kare radyan) cinsinden yazılması gerekmektedir.

$$\text{Anten Kazancı} \propto \frac{\text{Küre Yüzey Alanı}}{\text{Hüzme Yüzey Alanı}} \quad (1.7)$$



Şekil 1.8: Yönlü Anten Hüzmesinin Yüzey Alanının Gösterimi

Boyutsuz bir büyüklük olan steradyan Şekil 1.9'da da görüleceği üzere, bir kürenin merkezini tepe olarak alıp küre yüzeyi üzerinde bu kürenin yarıçapına eşit bir kare kadar alan ayıran uzay açısı eşit bir katı açı ölçü birimidir [40].



Şekil 1.9: Steradyanın Görsel Olarak Gösterimi

Yarıçapı r olan herhangi bir kürenin yüzey alanı (A) $4\pi r^2$ olmaktadır. Bu yüzey alanını steradyan cinsinden ifade etmek için gerekli Ω değeri, Eşitlik (1.8) ile ifade edilmektedir. Bu sayede herhangi bir kürenin yüzey alanı, yarıçaptan bağımsız olarak 4π steradyan olarak hesaplanmaktadır.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \quad (1.8)$$

Öte yandan bir steradyan aynı zamanda $\left(\frac{180}{\pi}\right)^2$, ne eşit olduğu için aynı kürenin yüzey alanı derece² cinsinden Eşitlik (1.9)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$Küre Yüzey Alanı = 4\pi \text{ steradyan} = 4\pi \times \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 = 41253 \text{ derece}^2 \quad (1.9)$$

Anten kazancı için Eşitlik (1.9)'da hesaplanan değerini yanı sıra yönlü anten hüzmesinin azimut açısı (θ_1), yükseliş açısı (θ_2) ve anten verimliliği (η) kullanılmaktadır.

Hüzmenin küre üzerindeki yüzey alanının Şekil 1.8'deki gibi dikdörtgen olarak kabul edildiği durumda [39] antenin anten kazancı, Eşitlik (1.10) ile belirtilmektedir.

$$Anten Kazancı = \eta \left(\frac{Küre Yüzey Alanı}{Hüzme Yüzey Alanı} \right) \cong \eta \left(\frac{41253}{\theta_1 \theta_2} \right) \quad (1.10)$$

Anten Kazancını hesaplarken η , [41]'de önerildiği üzere 0.65 alınırsa, yeni anten kazancı Eşitlik (1.11)'deki gibi olmaktadır

$$Anten\ Kazancı \cong \frac{27000}{\theta_1 \theta_2} \quad (1.11)$$

İlgili anten kazancı, SNR hesabında kullanılabilmesi için dBi olarak hesaplandığında ise Eşitlik (1.12) elde edilmektedir.

$$Anten\ Kazancı\ (dBi) \cong 10 \log_{10} \left(\frac{27000}{\theta_1 \theta_2} \right) \quad (1.12)$$

1.2.6 Picocell

Çalışma esnasında yönlü antenlerin kullanıldığı durumlarda picocell ortam tercih edilmektedir [49]. İlgili ortamda baz istasyonu merkezde bulunurken kullanıcılar, yarıçapı 100 ile 250 metre arasında değişen bir çemberin üzerinde konumlandırılmaktadır. İlgili ortam için iletim gücü 24 dBm iken kullanıcı sayısı genellikle 30 ile 64 arasında değişiklik göstermektedir. Ofisler, alışveriş merkezleri ve tren istasyonları gibi özellikle kapalı alanlar için uygun olan picocell, microcell ve macrococell gibi alternatiflere göre daha küçük bir alanda faaliyet göstermektedir. Dolayısıyla, Eşitlik (1.13)'te yer alan Serbest Uzay Yol Kaybı (FSPL) denkleminde göre [43] alıcı ve vericiler arasındaki mesafenin (d) FSPL'ye etkisi daha az olacağından daha yüksek frekanslı (f) sinyallerin kullanılmasına imkân sağlanmaktadır.

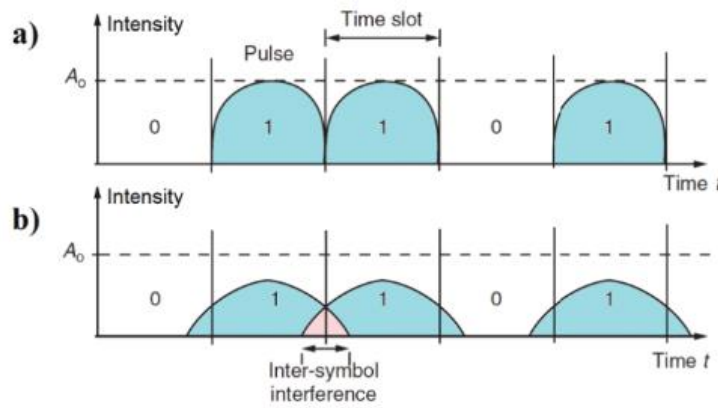
$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \quad (1.13)$$

1.2.7 Milimetrik dalga ve 5G NR FR 2 bantları

Bu çalışma esnasında sinyaller arası haberleşme için 5G NR FR 2 bantları üzerinde durulmaktadır. İlgili frekans bantları içerisinde milimetrik dalgalar (24 GHz ve üzeri) bulundurmaktadır [42]. Bu sayede kullanacağımız sensör ağında veri hızı yüksek olmakla birlikte düşük bekleme süresi elde edilecektir. KSA için ilgili bantlar içinde n261 numaralı K_a-band seçilmektedir. Belirtilen bant özelinde taşıyıcı frekans için 28 GHz kullanılırken bant genişliği için 50, 100, 200 veya 400 MHz'in kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Tez çalışması esnasında bant genişliği için 200 MHz kullanılmaktadır.

1.2.8 Girişim / Semboller arası girişim

İki veya daha çok sinyal dalgasının birbiriyle örtüşmesi ya da üst üste binmesi sonucu meydana gelmektedir [43]. Sinyal dalgaları arasındaki faz farkına bağlı olarak kimi zaman dalgalar birbirini kuvvetlendirirken bazen de birbirlerini yok ederler. Farklı bilgileri içeren sinyal dalgalarında girişimin meydana gelmesi durumunda hata oranının artması gibi olumsuz sonuçlar meydana gelebilmektedir. Ayrı bir girişim türü olan semboller arası girişimde (ISI), Şekil 1.10'da de görüleceği üzere, arka arkaya gelen semboller arasındaki girişim yüzünden bozukluk meydana gelmektedir [44]. Bu bozuklukların sinyaller üzerinde istenilmeyen bir gürültü etkisi olduğu için bu durumun üstesinden gelmek amacıyla sinyale tampon zaman adı verilen fazladan bir zamanın eklenmesi gibi çözümler kullanılmaktadır [44].



Intersymbol interference: a-input bit sequence; b-output bit sequence affected by ISI [1]

Şekil 1.10: Semboller Arası Girişim Örneği

1.2.9 Veri hızı

Haberleşme sistemleri için önemli performans metriklerinden bir olmakla birlikte birim zaman içinde taşınan ya da işlenen bit sayısını temsil etmektedir [45].

1.2.10 Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA)

TDMA sayesinde birden fazla sayıda kullanıcı, farklı zaman dilimlerini kullanarak aynı radyo frekansı üzerinden haberleşme gerçekleştirebilmektedir [46]. Aynı zaman zarfında farklı radyo frekansları üzerinden haberleşmeyi sağlayan Frekans Bölmeli

Çoklu Erişim'e (FDMA) alternatif olan bu yöntemde her bir kullanıcıya bant genişliğinin tamamının tahsis edilmesi mümkün olmaktadır. Bu sayede kanal üzerinden iletebilecek veri miktarı artabilmektedir. Her bir kullanıcıya farklı zaman dilimleri ataması sayesinde Zaman Bölmeli Çoklama (TDM) ile benzerlik gösteren bu yöntemde TDM'in aksine, kendi zaman diliminde veri iletimini tamamlayan kullanıcı bir daha iletim yapmak için diğer kullanıcıların iletim yapmasını beklemelidir. Dolayısıyla aynı haberleşme kanalını kullanan farklı kullanıcıların ilettiği veriler arasında ISI'nın oluşmasının önüne geçilebilmektedir. Buna ek olarak, kullanıcılar iletim enerjisini sadece kendi zaman diliminde harcayabildiği için TDMA, enerji verimliliği açısından da verimli bir yöntemdir. TDMA'in sağladığı birçok avantajla birlikte meydana getirdiği bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Örnek olarak girişimi engellemek için art arda gelen zaman dilimleri arasında tampon zamanın eklenmesi gerekmektedir. Bu fazladan zaman, veri iletimi süresini artırmasının yanı sıra fazladan enerji harcanmasına da neden olmaktadır. Bir diğer dezavantaj da çok fazla kullanıcının yer aldığı durumlarda kullanıcıların bekleme süreleri arttığı için, veri hızında ve kullanıcıya sunulan hizmette düşüş gözlenmesidir.

1.3. Kullanılan Metotlar/Platformlar

İlgili tez çalışması esnasında düzgün rastgele dağılımlı topolojilerin üretilmesi, KSA'nın fiziksel katmanı ve interferansın engellenmesi için MATLAB'dan yararlanılmaktadır. Farklı amaçlarla kullanılan optimizasyon modelleri Karmaşık Tamsayılı Programlama (MIP) mantığına göre oluşturulurken platform olarak GAMS (General Algebraic Modelling System)'ten yararlanılmaktadır. Optimizasyon esnasında ayrıca CPLEX çözücüsünden yararlanılmaktadır.



2. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA KAYNAK DÜĞÜMDEN BAZ İSTASYONUNA KADAR OLAN GECİKMENİN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ

Bu bölüm özelindeki çalışmalar SIU 2022 Konferansı'nda sunulan "Analysis of the Effect of Delay from Source Node to Sink on Lifetime in Wireless Sensor Networks" isimli bildirden türetilmiştir.

2.1 Amaç

Bu bölümde KSA'daki her bir sensörün, kendi verilerini baz istasyonuna iletmesi için gereken gecikmeyi kısıtlamanın yaşam süresi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Uygulanan bir gecikme kısıtı, sensörlerin verilerini iletmek için kullanabileceği maksimum gecikmeyi temsil etmektedir. Bununla birlikte bazı sensörler, verilerini daha az gecikmeye ile de baz istasyonuna iletebilmektedirler. Gecikme kısıtlamaları için atlama sayıları 2, 4 ve 8 olarak seçilerek farklı gecikme kısıtlamalarının etkisi incelenmektedir. Her bir gecikme kısıtı için 20, 30, 40, 50 ve 60'ar düğümlü topolojiler kullanılarak sensör ağı yoğunluğunun yaşam süresine etkisi de incelenmiştir. Bu bölümde, bundan sonraki bölümlerin aksine, sensörlerin veri iletimi için sadece tümyönlü anten kullanılmaktadır. İlgili bölüm için, düğümler arasında girişimin olmadığı varsayılmaktadır.

2.2 Çalışma

2.2.1 Gecikme

Bu bölüm özelinde KSA'nın düşük gecikme ve veri tazeliği prensipleriyle uyumlu olması için üretici sensörden baz istasyonuna olan gecikme ele alınmaktadır. Çalışma [12] ve [13]'te kullanılan metotlar, KSA'nın tamamı için gecikmeyi incelemek açısından kullanışlı olup, önemli sonuçlara varılabilmektedir. Öte yandan KSA'da her bir sensörün ürettiği veriler için düşük gecikmeyi sağlamak son derece önemlidir. Dolayısıyla, sensör ağında düşük gecikme ele alınırken her bir düğümün ürettiği verilerin gecikmesinin kısıtlanması bize daha doğru sonuçlar sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında gecikme, kaynak düğümden baz istasyonu kadar olan atlama sayısı

olarak seçilmektedir. Bu sayede herhangi bir düğümde üretilen veriler, baz istasyonuna kadar iletilirken toplam atlama sayısı kısıtını geçmemek koşuluyla birden fazla patikayı kullanabilmektedirler.

2.2.2 Enerji modeli

Bu bölümde, düğümlerin harcadığı veri iletim enerjisini karakterize etmek için bir ayrık enerji modeli olan MICA2 Ayrık Enerji Seviyeleri kullanılmaktadır [47]. İlgili model Çizelge 2.1’de detaylı olarak gösterilmektedir. Bu modelde l enerji seviyelerini, $R_{max}(l)$ ise seçilen enerji seviyesi l için gönderici ve alıcı düğümler arasında izin verilen maksimum mesafeyi belirtmektedir. Bu bilgiler neticesinde, l enerji seviyesi için i düğümünden j düğümüne bir bit iletmek amacıyla harcanan iletim enerjisi, nano joule cinsinden $E_{tx}^{i,j}(l)$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Çizelge 2.1: MICA 2 Ayrık Enerji Seviyeleri Tablosu

l	$R_{max}(l)$	$E_{tx}^{i,j}(l)$	l	$R_{max}(l)$	$E_{tx}^{i,j}(l)$
1	19.30	671.88	14	41.19	843.75
2	20.46	687.50	15	43.67	867.19
3	21.69	703.13	16	46.29	1078.13
4	22.69	705.73	17	49.07	1132.81
5	24.38	710.94	18	52.01	1135.42
6	25.84	723.96	19	55.13	1179.69
7	27.39	726.56	20	58.44	1234.38
8	29.03	742.19	21	61.95	1312.50
9	30.78	757.81	22	65.67	1343.75
10	32.62	773.44	23	69.61	1445.31
11	34.58	789.06	24	73.79	1500.01
12	36.66	812.50	25	78.22	1664.06
13	38.86	828.13	26	82.92	1984.38

Enerji seviyeleri hesaplanırken Algoritma 1’den yararlanılmaktadır. İlgili algoritmada d_{ij} , i düğümü ile j düğümü arasındaki mesafeyi metre cinsinden temsil etmektedir. Buna göre d_{ij} ’nin belirli bir eşik mesafesinden (82.92m) büyük olması durumunda, düğümlerin birbirleriyle haberleşmediği varsayılmaktadır. Aksi takdirde, enerji seviyesi, izin verilen maksimum mesafeye göre belirlenmektedir. Örnek olarak $d_{ij} = 50m$ ise, $49.07m < 50m < 52.01m$ olduğundan, gerekli enerji seviyesi için $l = 18$ seçildiği için bir bitin iletimi için harcanan enerji $E_{tx}^{i,j}(18) = 1135.42 nJ$ olarak hesaplanmaktadır. MICA 2 enerji seviyelerine uygun olacak şekilde her bir düğüm için bit alım enerjisi E_{rx} , mesafeye bakılmaksızın 923 nJ olarak belirlenmektedir.

Algoritma 1: Enerji Seviyelerini Seçen Algoritma

```
if  $d_{ij} < 0$  OR  $d_{ij} > 82.92m$  then  
|   Enerji seviyesi =  $\infty$ ;  
else  
|   if  $R_{max}(m-1) < d_{ij} \leq R_{max}(m)$  then  
|   |   Enerji seviyesi =  $m$ ;  
|   end  
end
```

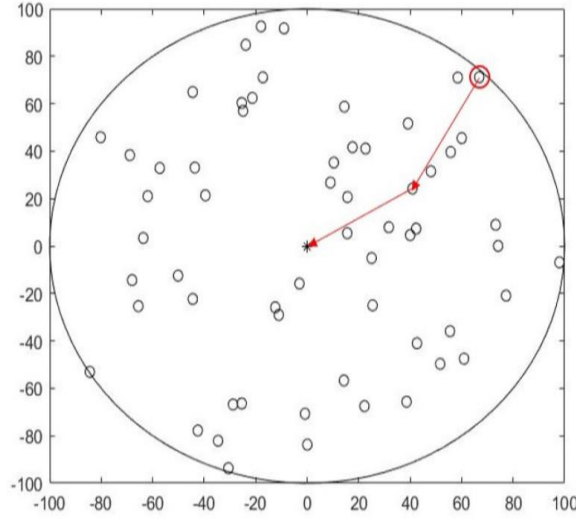
2.2.3 KSA'nın tanımlanışı

Bu tez çalışması özelinde, ağ grafiği $G(V,A)$, sensör ağı topolojisi içinde yer alan düğümleri ve bağlantıları temsil etmektedir. Buna göre, V , ağ grafiğindeki düğümleri, A düğümler arasındaki tüm bağlantıları tanımlamaktadır. Buna ek olarak, W , baz istasyonu haricindeki bütün düğümleri temsil etmektedir. Sonuç olarak W 'deki sensör düğümler; veri iletme ve veri alımı özelliklerine ek olarak kendi verilerini de üretebilirken V/W 'e karşılık gelen baz istasyonunun sadece veri alımı özelliği bulunduğundan kendi verisini üretme ya da veri iletme özelliği bulunmamaktadır. Sensör ağı topolojisi için, $i \in W$ ve $j \in V$ ile sırasıyla o anda veri ileten ve veri alan düğümler temsil etmektedir. Bununla birlikte $k \in W$ de kendi verisini üretme özelliğine sahip sensör düğümlerini tanımlamaktadır. İçinde bulunan düğüm sayısı DS olarak tanımlanan sensör ağında, ilk düğüm baz istasyonu olarak seçilmektedir. Dolayısıyla her bir $i \in W$, $j \in V$ için sensör ağının genel gösterimi $V = \{N_1, N_2, \dots, N_{DS}\}$, $W = \{N_2, N_3, \dots, N_{DS}\}$ ve $A = (i \rightarrow j)$ şeklinde yapılmaktadır.

2.2.4 KSA topolojisi

Bu bölüm özelinde dairesel topolojiler oluşturulurken KSA'nın yarıçapı (R), bütün topolojiler için 100 metre olarak belirlenmektedir. Bu sayede her bir düğüm en fazla 2 gecikme ile baz istasyonuna veri aktarabilmektedir. Kaynak düğümler, düzgün bir rastgele dağılımla daire içinde dağıtıldıktan sonra baz istasyonu, dairenin merkezine yerleştirilmektedir. Her kaynak düğüm N_k , $2 \leq k \leq DS$ şeklinde numaralandırılmakla birlikte baz istasyonuna ρ_k uzaklıkta bulunmakta ve baz istasyonu ile arasında θ_k derecelik bir açı oluşmaktadır. Burada θ_k , $[0-2\Pi]$ arasında düzgün bir rastgele dağılıma sahiptir. Aynı şekilde baz istasyonuna uzaklıklar hesaplanırken, $\rho_k = R\sqrt{u_k}$ eşitliği sağlanmaktadır. Burada u_k , $[0-1]$ arasında düzgün bir rastgele dağılıma sahip

olmaktadır. Farklı sensör ağı yoğunluğunun etkisini incelemek için 20, 30, 40, 50, ve 60'ar düğümlü topolojiler oluşturulmaktadır. Sonuçların daha sağlıklı olması açısından 40 farklı topoloji üzerinden çalışmalar gerçekleştirilip ortalama değerler kullanılmaktadır. 60 düğümlü bir topolojide herhangi bir sensörün verilerini baz istasyonuna 2'li gecikme ile ilettiği senaryo, Şekil 2.1'de örneklenmektedir.



Şekil 2.1: 60 Düğümlü Topolojide 2'li Gecikme Örneği

2.2.5 Yaşam süresi

Bu bölümde yaşam süresi hesaplanırken enerjisi ilk biten düğümün yaşam süresi baz alınmaktadır. Her bir sensörün birim zamanda bir veri biti ürettiği varsayılmaktadır. Dolayısıyla KSA'nın yaşam süresi hesaplanırken enerjisi ilk tükenen düğümün bu süreç zarfında ürettiği toplam bit sayısı göz önüne alınmaktadır. Bu sayede optimizasyon modelleri kullanılarak KSA'daki enerjisi ilk biten sensörün ürettiği bit sayısı enbüyüklenirken aynı zamanda KSA'nın yaşam süresi de enbüyüklenmektedir.

2.2.6 Optimizasyon modeli

MIP sayesinde yaşam süresi (t) maksimize edilirken aşağıdaki Model 1'de yer alan eşitliklerden yararlanılmaktadır. Bahsedilen eşitliklerde f_{ij}^k ile k düğümünde üretilmiş ve $i \in W$ düğümünden $j \in V$ düğümüne iletilen tamsayı veriler temsil etmektedir. Sensör ağındaki $k \in W$ düğümünde üretilen verilerin, veri akışının korunması prensiplerine göre baz istasyonuna ulaştırılması istenilmektedir. Buna ek olarak veri akışı esnasında röle düğümleri için, giren ve çıkan veri akışlarının birbirine eşit olma

gereksinimi bulunmaktadır. İlgili koşulların sağlanması için Eşitlik (2.1) kullanılmaktadır.

$$\sum_{j \in V} f_{ij}^k - \sum_{j \in W} f_{ji}^k = \begin{cases} t, & i = 0 \\ -t, & i = k, \forall i, \forall k \in W \\ 0, & \text{değilse} \end{cases} \quad (2.1)$$

Sensör ağındaki veri trafiği esnasında döngülerin engellenmesi hedeflenmektedir. Bunun için Eşitlik (2.2)'de görüleceği üzere $k \in W$ düğümünde üretilen verilerin bir daha aynı düğüme dönmemesinin önüne geçilmektedir.

$$\sum_{j \in W} f_{jk}^k = 0, \forall k \in W \quad (2.2)$$

Veri trafiği esnasında ayrıca veri depolanmasının önüne geçilerek verilerin baz istasyonuna en hızlı şekilde iletilmesi için Eşitlik (2.3)'den yararlanılmaktadır. Bahsedilen eşitlik sayesinde herhangi bir düğümün kendisine veri iletemeyeceği ifade edilmiştir.

$$\sum_{j \in V} f_{jj}^k = 0, \forall k \in W \quad (2.3)$$

Sensör ağındaki düğümlerin, verilerini baz istasyonuna iletirken ve başka düğümler için röle görevi görürken harcaabilecekleri toplam enerji önceden bellidir. Buna göre, $i \in W$ düğümünün harcaabileceği iletme ve alma enerjilerinin toplamının, başlangıç enerjisi e_i 'den küçük olması gerekmektedir. İlgili işlemin gerçekleştirilmesi için kullanılan Eşitlik (2.4)'te veri paketindeki bit sayısı (L_p) 1024 bit olarak seçilmektedir. Ayrıca $i \in W$ için e_i 'nin değeri, 2 adet AA pilin enerjisine eşdeğer olan 25 kJ 'e karşılık gelmektedir.

$$L_p \sum_{k \in W} \left(\sum_{j \in V} E_{tx}^{ij} f_{ij}^k + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji}^k \right) \leq e_i, \forall i \in W \quad (2.4)$$

Bu bölümde kaynak düğümden baz istasyonuna olan gecikmeyi sınırlandırmak hedeflenmektedir. Bunun için herhangi düğümde üretilen verinin belirli bir atlama sayısını aşmadan baz istasyonuna ulaşması amaçlanmaktadır. İlgili koşulu sağlamak için Eşitlik (2.5) ve (2.6)'dan yararlanılmaktadır. Burada Eşitlik (2.5) ile $k \in W$ düğümünde üretilen verinin $i \in W$ düğümünden $j \in V$ düğüme iletilip iletilmediği belirlenmektedir. Bu eşitlikte oluşturulan ikili değişken a_{ij}^k , Eşitlik (2.6) sayesinde

gecikme miktarına göre kısıtlanmaktadır. Bunlara ek olarak a_{ij}^k 'nin doğru bir şekilde 0 ya da 1 değerlerini aldığından emin olmak için yeterince büyük bir sabit olan G 'den yararlanılmaktadır. Bu sayede Eşitlik (2.6) ile $k \in W$ düğümünden baz istasyonuna olan atlama sayısının *Gecikme* isimli sabitten büyük olması engellenerek gecikme kısıtı gerçekleştirilmektedir.

$$f_{ij}^k \leq G a_{ij}^k, \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} a_{ij}^k \leq Gecikme, \forall k \in W \quad (2.6)$$

Sensör ağındaki hiçbir veri akışının sıfırdan küçük olamayacağını belirtmek amacıyla Eşitlik (2.7)'den yararlanılmaktadır.

$$f_{ij}^k \geq 0, \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V \quad (2.7)$$

Bu sayede t 'yi maksimize etmek için kullanılan optimizasyon modelinin tamamı Şekil 2.2'de görülmektedir.

$$\sum_{j \in V} f_{ij}^k - \sum_{j \in W} f_{ji}^k = \begin{cases} t & \text{if } i = k \\ -t & \text{if } i = 1 \forall i, \forall k \in W \\ 0 & \text{değilse} \end{cases}$$

$$\sum_{j \in W} f_{jk}^k = 0 \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{j \in V} f_{jj}^k = 0 \quad \forall k \in W$$

$$L_p \sum_{k \in W} \left(\sum_{j \in V} E_{tx}^{i,j} f_{ij}^k + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji}^k \right) \leq e_i \quad \forall i \in W$$

$$f_{ij}^k \leq G a_{ij}^k \quad \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} a_{ij}^k \leq Gecikme \quad \forall k \in W$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V$$

Şekil 2.2: Model 1

2.3 Sonuçlar

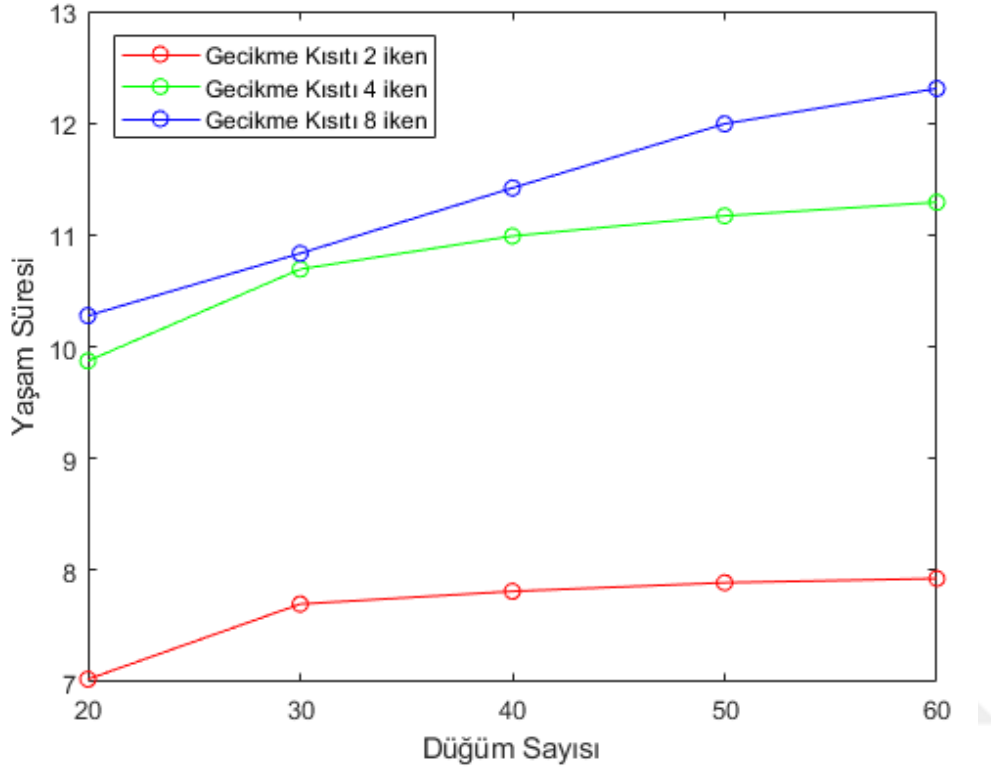
2.3.1 Yaşam süresi-düğüm sayısı grafiği

Şekil 2.3'te, farklı sayıda düğüme sahip topolojiler için farklı gecikme kısıtlamalarına karşılık gelen yaşam süreleri sunulmaktadır. Yaşam süresi grafiğindeki her bir değer, 10^6 saniyelik bir faktöre sahiptir. Farklı bütün gecikme değerleri için düğüm sayısını artırmak yaşam süresini de artırmaktadır. Bunun sebebi yeni eklenen düğümlerin, mevcut düğümlerin iş yükünü paylaşarak aşırı yüklenmeyi engellemesidir. Bununla birlikte gecikme kısıtının gevşetildiği durumlarda, düğüm sayısını artırmanın yaşam süresi artışına etkisi daha fazla olmaktadır. Örnek olarak maksimum gecikme miktarı 8 iken düğüm sayısını 20'den 60'a çıkarmak yaşam süresini %20 artırmaktadır. Öte yandan maksimum gecikme miktarının 2 ya da 4 olduğu durumlarda düğüm sayısını 20'den 60'a çıkarmak, yaşam süresine sırasıyla %13 ve %14.5 'lük katkı sağlamaktadır.

Düğüm sayısının sabitlendiği durumlarda, gecikme kısıtlamasını gevşetmenin yaşam süresine yine olumlu bir etkisi bulunmaktadır. Bunun nedeni, daha gevşek kısıtlamalarda, veri iletimi için kullanılabilir toplam kombinasyonların artması ve daha optimal yolların seçilmesine olanak sağlanmasıdır. Maksimum gecikme 2 olduğunda yaşam süresi, diğer kısıtlamalardaki yaşam sürelerine göre çok daha düşüktür. Örnek olarak, kısıtlamanın 2'den 8'e gevşetilmesi, yaşam süresini 20 düğüm topolojileri için yaklaşık %46 ve 60 düğüm topolojileri için de %55 kadar artırmaktadır. Bunun nedeni, genelde baz istasyonuna uzak düğümlerin, verilerini hedefe aktarmak için yüksek miktarda enerji harcamasına ihtiyaç duymalarıdır. Maksimum gecikmenin 2 olması, bu düğümler için fazla bir avantaj sağlamadığından, erken enerji tükenmesi sorunu hala belirgin olmaktadır. Gecikme kısıtının 4 ve 8 olduğu durumlarda yaşam sürelerinin, 2'li kısıta kıyasla, birbirine daha yakın olduğu görülmekle birlikte daha yoğun topolojilerde (50 ve 60 düğümlü), iki kısıt arasındaki farkın 8'li kısıt lehine arttığı görülmektedir.

Diğer bir önemli bulgu ise, sensör ağı yeterli yoğunluğa ulaşmaya başladıktan sonra, düğüm sayısını artırmanın yaşam süresine etkisinin daha az olmasıdır. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere gecikme kısıtının 2 olduğu durumda, 30 düğümden sonra yaşam süresi grafiği satüre olmaya başlamaktadır. Bu gecikme kısıtı için düğüm sayısını 30'dan 60'a çıkarmanın yaşam süresine etkisi %3'den azdır. Maksimum gecikme miktarının 4 olduğu senaryoda KSA, 30 düğümden kalabalık topolojilerden daha iyi

yararlanabilse de aynı düğüm artışı için kayda değer bir artış hala söz konusu değildir (%5.5). Diğer iki kısıta kıyasla, gecikme kısıtı 8 iken düğüm sayısı 30 düğümden 60 düğüme çıktığında ise diğer gecikmelere kıyasla daha iyi bir yaşam süresi artışının olduğu (%13.5) gözlenmektedir.

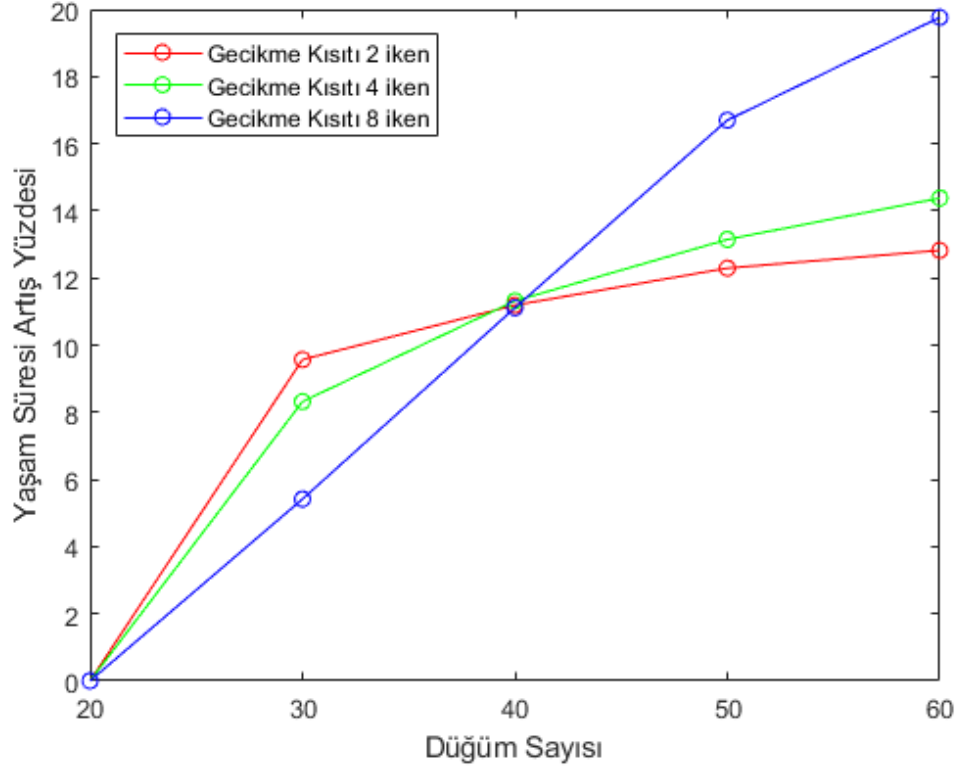


Şekil 2.3: Düğüm Sayısının Farklı Gecikmeler İçin Yaşam Süresine Etkisi

2.3.2 Yaşam süresi artış yüzdesi-düğüm sayısı grafiği

Yaşam Süresi Artış Yüzdesi (YSAY) grafiği Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Bu yüzdeleri bulurken her bir gecikme kısıtı için, 20 düğümün yaşam süresi temel kıstas değeri olarak seçilmiş ve diğer düğüm sayılarının yaşam süresi bu değer ile yüzdesel olarak kıyaslanmaktadır. Şekil 2.4, farklı kısıtlamalar için ağların davranışının düğüm sayısına göre farklı olduğunu göstermektedir. Görüldüğü üzere, ağda 30 düğüm varken en düşük YSAY, kısıtlamanın 8 olduğu durumdadır. 30 düğümlü ağda en yüksek YSAY ise kısıtlamanın 2 olduğu durumda gözlenmiştir. 2 kısıtlamalı ve 20 düğümlü sensör ağı veri iletimi konusunda diğer senaryolara göre en fazla sınırlandırılmış senaryo olduğundan yaşam süresi en düşük olan senaryodur. Dolayısıyla ilgili senaryoda düğüm sayısının 30'a çıkarılmasının YSAY'ye etkisi diğer senaryolara göre daha fazladır. Bununla birlikte, 40 düğümden sonra düğüm sayısını artırmanın en

fazla, kısıtlamanın 8 olduğu durumun YSA Y'sine fayda sağladığı görülmektedir. Bunun sebebi, görece daha fazla kısıtlanmış ağların (2 ve 4) yaşam süresi özelinde potansiyellerine daha erken ulaşmasıdır.



şekil 2.4: Düğüm Sayısının Farklı Gecikmeler İçin YSA Y'ye Etkisi



3. YÖNLÜ ANTEN KULLANILAN KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA UÇTAN UCA GECİKMENİN YAŞAM SÜRESİ VE ORTALAMA BİT HATA ORANINA ETKİSİ

Bu bölüm özelindeki çalışmalar BalkanCom 2022 Konferansı'nda sunulan "Effect of End-to-end Delay on Lifetime and Average Bit Error Rate in Directional Antenna Based Wireless Sensor Networks" isimli bildiriden türetilmiştir.

3.1 Amaç

Bu bölümde KSA'daki her bir sensörün, kendi verilerini baz istasyonuna iletmesi için gereken uçtan uca gecikmeyi kısıtlamanın yaşam süresi ve ortalama bit hata oranı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Uygulanan bir UUG kısıtı, sensörlerin verilerini iletmek için kullanabileceği maksimum UUG'yi temsil etmektedir. Bununla birlikte bazı sensörler, verilerini daha az UUG'yle de baz istasyonuna iletebilmektedir. Ortalama bit hata oranını hesaplamak için belli bir UUG kısıtına göre yaşam süresini enbüyükleyen durumlar kullanılmaktadır. UUG kısıtlamaları için 1, 2, 3 ve 4 seçilerek farklı UUG kısıtlamalarının etkisi incelenmektedir. Her bir UUG kısıtı için 40, 50 ve 60'ar düğümlü topolojiler kullanılarak sensör ağı yoğunluğunun yaşam süresine etkisi de incelenmektedir. Bu bölüm özelinde düğümler arası veri iletiminin hem tümyönlü antenlerle hem de yönlü antenlerle sağlandığı ayrı senaryolar oluşturulmaktadır. Bu sayede yönlü antenlerin BER'i düşürme ve enerji verimliliğini artırma gibi sağladığı avantajların görülmesi amaçlanmaktadır. Bu bölüm için, düğümler arasında girişimin olmadığı varsayılmaktadır.

3.2 Çalışma

3.2.1 Uçtan uca gecikme

Bu bölümde Çalışma [17] ile benzer bir yaklaşım benimsenerek düşük gecikme ve veri tazeliği prensipleri prensipleriyle uyumlu olması açısından uçtan uca gecikme kullanılmaktadır. Bu bölüm özelinde UUG, kaynak düğümden baz istasyonu kadar olan atlama olarak seçilmiştir. Herhangi bir UUG kısıtı uygulandığı zaman kendi kaynak düğümünde üretilen verilerin baz istasyonuna ulaşırken ilgili UUG'yi

aşmaması sağlanmaktadır. Burada herhangi bir düğümün kullanabileceği maksimum UUG miktarı, UUG^{max} ile belirtilmektedir. Bununla birlikte gecikmenin aksine kendi kaynak düğümü tarafından üretilen verilerin baz istasyonuna iletilirken tek bir patikayı kullandığı (dallanma olmadan) varsayılmaktadır. Bu sayede KSA’da düşük gecikme ve veri tazeliğinin sağlanması açısından daha verimli ve URLLC mimarisine daha uygun bir çalışma amaçlanmaktadır. Bu çalışma esnasında yaşam süresiyle alakalı çalışmalar esnasında 2, 3 ve 4 UUG kısıtlanmalı senaryolar kullanılırken BER ile ilgili çalışmalar için 1, 2, 3 ve 4 UUG’li kısıtlamalar kullanılmaktadır.

3.2.2 Enerji modeli

Çizelge 2.1’de gösterilen MICA 2 Ayrık Enerji Seviyeleri, ayrık değerlere sahip olduğundan yönlü antenin etkisini incelemeye uygun değildir. Bunun üstesinden gelebilmek için devamlı değerlere sahip bir model üzerinde durulmaktadır. Dolayısıyla, sensör düğümleri arasındaki iletim ve alma enerjileri için birinci derece radyo modeli (first-order radio model) seçilmektedir [48]. İlgili model kullanılarak tek bir bitin iletimi için harcanan enerji miktarı (E_{tx}) Eşitlik (3.1)’de görülmektedir.

$$E_{tx}(d) = e_t + e_d \times d^\lambda \quad (3.1)$$

Bu eşitliğe göre tek bir bitin iletimi esnasında verici devresinde harcanan enerji (e_t) 50 nJ/bit olmaktadır. Bunun yanısıra $e_d \times d^\lambda$ ile tek bir bitin d uzaklığa iletilmesi için gereken enerji hesaplanmaktadır. Bu kısım için e_d , $100pJ/bit/m^2$ olarak kullanılmaktadır. Boşlukta yayılım (free space propogation) için yol kaybı katsayısı (λ) 2 olarak seçilmektedir. Sensör düğümleri tarafından tek bir bitin alımı için harcanan alım enerjisi (E_{rx}), mesafeden bağımsız olarak 50 nJ/bit olarak kullanılmaktadır. Sensörlerin iletim mesafesi, birinci derece radyo modeli ve picocelle uyum sağlayacak şekilde 120m olarak tercih edilmektedir.

3.2.3 KSA’nın tanımlanışı

Bu bölümde KSA, Bölüm 2.2.3 ile aynı şekilde tanımlanmaktadır.

3.2.4 KSA topolojisi

Bu bölümde, Bölüm 2.2.4’e benzer şekilde düzgün rastgele dağılıma sahip dairesel topolojiler üretilmektedir. KSA yarıçapı, picocelle uyumlu olması için 200m olarak

seçilirken sensör ağı yoğunluğunu incelemek için 40, 50, ve 60'şar düğümlü topolojiler üretilmiştir. Sonuçların daha sağlıklı olması açısından 40 farklı topoloji üzerinden çalışmalar gerçekleştirilip ortalama değerler kullanılmaktadır.

3.2.5 Yaşam süresi

Bu bölümde yaşam süresi, Bölüm 2.2.5'teki gibi ele alınmaktadır.

3.2.6 Yönlü anten kazancı ve avantajları

Bu kısımda $\theta_1 = 20^\circ$ ve $\theta_2 = 180^\circ$ seçilmektedir. Bu sayede Eşitlik (1.11)'den yararlanılarak anten kazancı, tümyönlü antenli senaryoya göre 7.5 kat daha fazla olmaktadır. Benzer şekilde Eşitlik (1.12)'den yararlanarak dBi cinsinden *Verici Anten Kazancı* ve *Alıcı Anten Kazancı* da 8.75 dBi olarak hesaplanmaktadır. Bu anten kazançları sayesinde daha düşük BER ile haberleşmenin gerçekleşmesi amaçlanmaktadır.

Yönlü anten kullanmanın, enerji verimliği için sağladığı iki farklı avantaj sayesinde, yaşam süresine pozitif etkisi olmaktadır. İlk avantaj, aralarındaki belli uzaklık olan düğümler için, Eşitlik (3.1)'de belirtilen iletim enerjisindeki e_d 'yi azaltmasıdır. İlgili düşüş, Eşitlik (1.11)'e göre hesaplanan *Anten Kazancı* ile orantılı olmakla birlikte Eşitlik (3.2)'te görülebilmektedir.

$$e_d^{yeni} = \frac{e_d}{Anten\ Kazancı} \quad (3.2)$$

Yönlü antenin sağladığı ikinci avantaj ise belli bir iletim enerjisi için iletim mesafesini artırmasıdır. Tümyönlü antenlere sahip KSA'da, bazı röle düğümleri, baz istasyonuna uzak olan fazla miktarda düğümün verisini taşıyorsa bu rölelerde aşırı yüklenme meydana gelebilmektedir. Öte yandan yönlü antenler, uzaktaki düğümlerin verilerini doğrudan baz istasyonuna göndermesine de izin vererek bu aşırı yüklenmenin önüne geçebilmektedir. Bu sayede tümyönlü anten kullanılan senaryolara kıyasla yaşam süresi artabilmektedir. Bunu sağlamak için *Anten Kazancı* değişkenine göre oluşturulan yeni iletim mesafesi Eşitlik (3.3)'te görülmektedir. Bu sayede her bir düğümün önceden sahip olduğu maksimum iletim mesafesi (120m) anten kazancına bağlı olarak artırılmaktadır. Örnek olarak anten kazancınının 7.5 olduğu bu örnekte yeni iletim mesafesi sınırı yaklaşık 328 metre olmaktadır.

$$d_{yeni} = d \times \sqrt{\text{Anten Kazancı}} \quad (3.3)$$

3.2.7 Fiziksel katman ve SNR hesabı

İletim için seçilen n261 numaralı 5G NR FR2 bandına göre taşıyıcı sinyalin frekansı 28 GHz iken bant genişliği de 200 MHz olmaktadır. İletim Gücü, picocell kapasitesiyle uyumlu olarak 24 dBm olarak seçilmektedir. Bunların yanı sıra önceden belirtildiği üzere kipleme için 64 QAM kullanılırken yönlü antenlerin *Verici Anten Kazancı* ve *Alıcı Anten Kazancı* bölüm 3.2.6’da hesaplandığı üzere 8.75 dBi’dir. *Alıcıdaki Termal Gürültü*, dB cinsinden $10 \log_{10}(kTB) \cong -121 \text{ dB}$ olarak hesaplanmaktadır. Hesaplama yaparken dBm kullanmak istenildiği için ilgili değere 30 eklenerek yaklaşık olarak -91 dBm elde edilmektedir. *Alıcı Gürültü Figürü* ise seçilen 5G FR2 bandıyla uyumlu olacak şekilde 9 dB seçilmektedir. Fiziksel katmanda sabit olarak kullanılan parametrelerin tamamı Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Fiziksel Katman İçin Kullanılan Parametreler

FİZİKSEL KATMAN PARAMETRELERİ	
Taşıyıcı Frekans	28 GHz
Bant Genişliği (B)	200 MHz
Kipleme Tipi	64 QAM
Alıcıdaki Sıcaklık (T)	294 Kelvin
İletim Gücü	24 dBm
Verici Anten Kazancı	8.75 dBi
Alıcı Anten Kazancı	8.75 dBi
Alıcıdaki Termal Gürültü	-91 dBm
Alıcı Güç Figürü	9dB
Boltzman Sabiti (k)	1.38×10^{-23}

Bu tez çalışması esnasında düğümler arasındaki sinyallerin SNR’larını hesaplamak için link bütçe yönteminden yararlanılmaktadır [49]. Bu sayede Çizelge 3.1’deki fiziksel katman parametreleri kullanılarak SNR hesabı, Çizelge 3.2’deki gibi gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında sadece FSPL’nin alıcı ve verici düğümler arasındaki SNR’a etki ettiği varsayılmaktadır. Buna ek olarak, FSPL hesaplanırken taşıyıcı frekans 28 GHz’de sabit tutulduğu için SNR’a sadece düğümler arasındaki mesafenin etki ettiği kabul edilmektedir. Bu sayede farklı UUG kısıtlarını kullanmanın BER’e etkisi incelenebilmektedir.

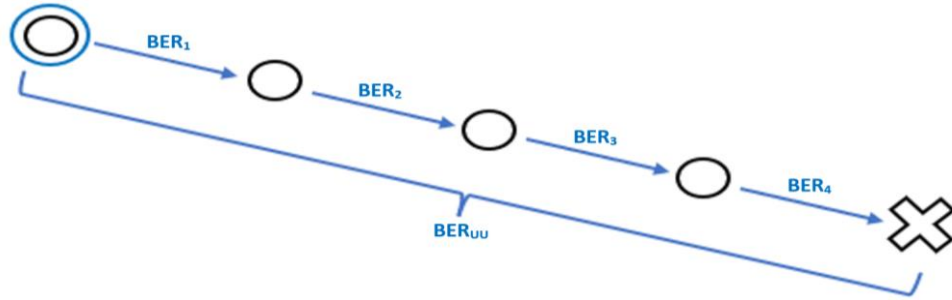
Çizelge 3.2: Sinyal Gürültü Oranı Hesabı

SİNYAL (dBm)		GÜRÜLTÜ (dBm)	
İletim Gücü	24 dBm	Alıcıdaki Termal Gürültü	-91 dBm
Verici Anten Kazancı	8.75 dBi	Alıcı Gürültü Figürü	9 dB
FSPL	Mesafeye göre değişmekte		
Alıcı Anten Kazancı	8.75 dBi		
41.5 dBm - FSPL		-82 dBm	
SNR = SİNYAL (dBm) - GÜRÜLTÜ (dBm) = 123.5 dB - FSPL			

3.2.8 Ortalama bit hata oranı hesabı

Sensör ağında düşük hata oranıyla haberleşmek büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında herhangi bir sensör düğümünün ilettiği verilerin, baz istasyonuna ulaşırken sahip olduğu BER, uçtan uca bit hata oranı (BER_{UU}) şeklinde tanımlanmaktadır. BER_{UU} 'nun hesaplanması Eşitlik (3.4)'te görülmekte ve Şekil 3.1'de görselleştirilmektedir. Bu eşitlikte BER_i ile atlama i sırasında ($1 \leq i \leq n = UUG$) meydana gelen BER temsil edilmektedir.

$$BER_{UU} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - BER_i) \quad (3.4)$$



Şekil 3.1: Uçtan Uca Bit Hata Oranının Görselleştirilmesi

Bunun sonucunda KSA'daki ortalama bit hata oranı şu şekilde hesaplanmaktadır:

1. Her bir sensörde üretilen verilerin, baz istasyonuna ulaşırken sahip oldukları BER_{UU} hesaplanmaktadır.
2. Bütün sensör düğümler için hesaplanan BER_{UU} 'ların ortalaması alınarak KSA'daki ortalama bit hata oranı belirlenmektedir.

3.2.9 Optimizasyon modeli

Bu bölümde UUG'yi kısıtlamanın yaşam süresine ve ortalama BER'e etkisi incelenmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için Model 1'deki eşitlikler aynı amaçla kullanılmaya devam edilmektedir. Model 1'den farklı olarak bu bölümde L_p , 2000 bit olarak seçilmekte ve $i \in W$ için e_i 'nin değeri 25 J olarak belirlenmektedir. Ayrıca bu bölümde gecikme yerine UUG'yi kısıtlamak hedeflendiğinden (2.6)'daki *Gecikme* isimli sabit yerine *Uçtan Uca Gecikme* isimli sabit kullanılarak Eşitlik (3.5) elde edilmektedir.

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} a_{ij}^k = Uçtan\ Uca\ Gecikme, \forall k \in W \quad (3.5)$$

Bu tez özelinde UUG'yi incelemek için $k \in W$ düğümünde üretilip baz istasyonuna iletilen verilerin tek bir patikayı kullandığını varsaymaktayız. Bunu gerçekleştirmek için Model 1'deki eşitliklere ek olarak Eşitlik (3.6)'dan yararlanılmaktadır.

$$\sum_{j \in V} a_{ij}^k \leq 1, \forall i, \forall k \in W \quad (3.6)$$

Bu sayede t 'yi maksimize etmek için kullanılan optimizasyon modelinin tamamı Şekil 3.2'de görülmektedir.

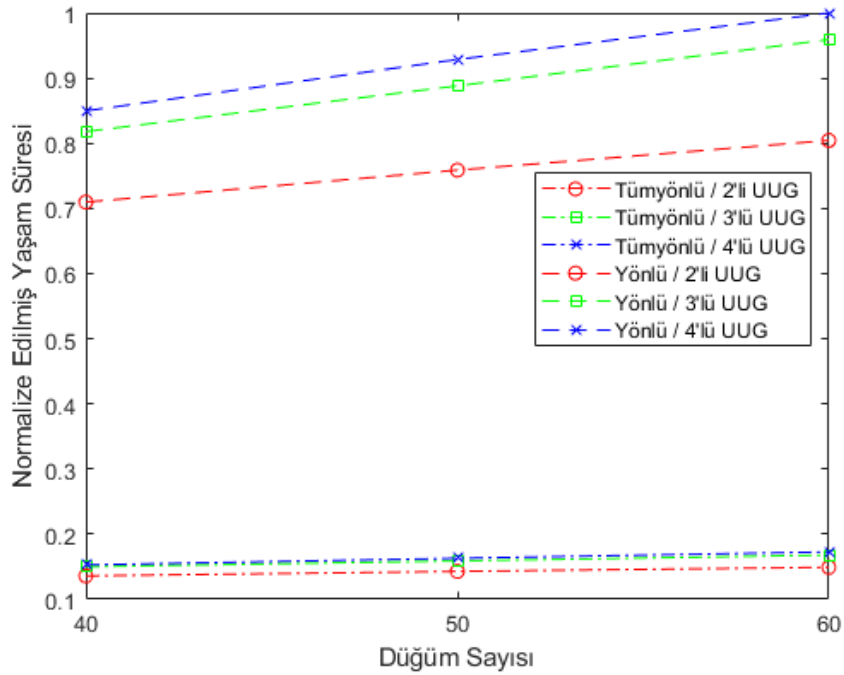
$$\begin{aligned} \sum_{j \in V} f_{ij}^k - \sum_{j \in W} f_{ji}^k &= \begin{cases} t & \text{if } i = k \\ -t & \text{if } i = 1 \forall i, \forall k \in W \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \\ \sum_{j \in W} f_{jk}^k &= 0 \quad \forall k \in W \\ \sum_{j \in V} f_{jj}^k &= 0 \quad \forall k \in W \\ L_p \sum_{k \in W} \left(\sum_{j \in V} E_{tx}^{i,j} f_{ij}^k + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji}^k \right) &\leq e_i \quad \forall i \in W \\ f_{ij}^k &\leq G a_{ij}^k \quad \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V \\ \sum_{i \in W} \sum_{j \in V} a_{ij}^k &\leq Uçtan\ Uca\ Gecikme \quad \forall k \in W \\ \sum_{j \in V} a_{ij}^k &\leq 1 \quad \forall i, \forall k \in W \\ f_{ij}^k &\geq 0 \quad \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V \end{aligned}$$

Şekil 3.2: Model 2

3.3 Sonuçlar

3.3.1 Normalize edilmiş yaşam süresi–düğüm sayısı grafiği

Şekil 3.3'te, her bir anten türü için farklı UUG'lerin kullanılması sonucu hesaplanan yaşam süreleri görülmektedir. İlgili şekil oluşturulurken en büyük yaşam süresi 1 ile gösterilecek şekilde bütün yaşam süreleri 0 ile 1 arasında normalize edilmektedir. Bu bölüm özelinde ortalama yaşam süresi isimli terimden bahsedilmektedir. Bu terim için, her bir anten tipi ve UUG özelinde 40, 50 ve 60 düğümlük topolojilerin yaşam süresinin ortalaması alınarak ortalama yaşam süresi hesaplanmaktadır. Eşitlik (3.2) ve (3.3)'ün sağladığı faydalar dolayısıyla yönlü anten kullanmanın yaşam süresini artırmaya pozitif bir etkisi bulunmaktadır. Örnek olarak UUG'nin 4 ile kısıtlandığı durumda yönlü anten kullanmanın yaşam süresini %468 kadar artırdığı gözlemlenmektedir. UUG kısıtının 2'den 3'e gevşetildiği durumda tümyönlü antenli ağların ortalama yaşam süresi %11.3 artarken yönlü antenli ağların ortalama yaşam süresi %17.2 artmaktadır. Bununla birlikte UUG kısıtının 3'ten 4'e gevşetildiği durumda tümyönlü antenli ağların ortalama yaşam süresi %2.47 artarken yönlü antenli ağların ortalama yaşam süresi %4.24 artmaktadır. Bundan yola çıkarak, UUG kısıtı için 3'ü seçmenin hem yaşam süresi açısından hem de düşük gecikme ve veri tazeliği açısından optimal sonuçlar verdiği sonucuna varılabilir.

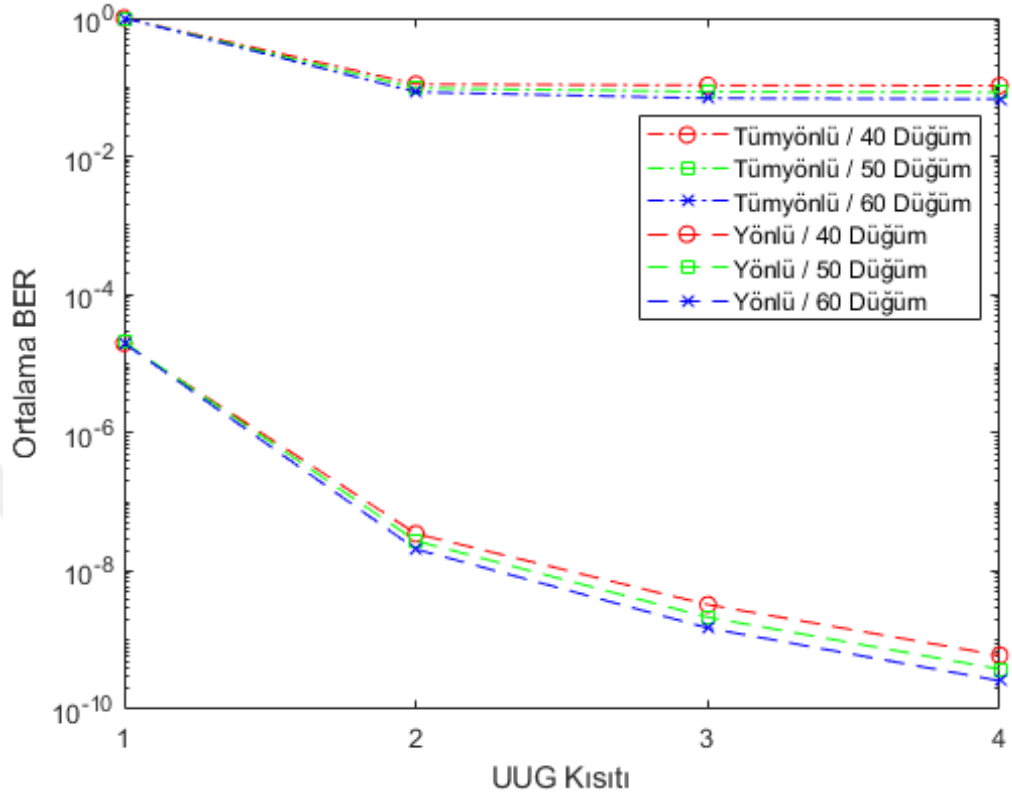


Şekil 3.3: Düğüm Sayısının Farklı UUG Kısıtları ve Anten Tipleri İçin Yaşam Süresine Etkisi

3.3.2 Ortalama BER-UUG kısıtı grafiği

Farklı antenlerin kullanıldığı senaryolar için farklı UUG kısıtları kullanılarak hesaplanan ortalama BER değerleri Şekil 3.4'te görülmektedir. Tümyönlü anten için 1'li UUG kısıtının kullanıldığı senaryolarda iki düğüm arasındaki mesafe 120 metreden fazla olabildiği haberleşme gerçekleştirilememektedir. Dolayısıyla ilgili anten tipi için UUG kısıtının 1 olduğu durumlarda ortalama BER'in 1 olduğu varsayılmaktadır. Görüldüğü üzere UUG kısıtını gevşetmek her iki anten modelinde de ortalama BER'i düşürmektedir. Buna ek olarak daha sıkışık topolojilerin ortalama BER değerleri de daha düşük olmaktadır. Yönlü antenin kullanıldığı durumlarda düğüm sayısı 60 iken 1'li UUG kısıtı uygulandığında ortalama BER, 2×10^{-5} olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, aynı anten için diğer UUG kısıtlarıyla hesaplanan ortalama BER'lere göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, UUG kısıtı 1 iken sensor düğümlerinin verilerini direkt olarak baz istasyonuna ilettiği için yol kaybından etkilenmenin daha fazla olmasıdır. Çoklu atlamaya izin verildiği zaman (kısıt en az 2 olduğunda) bazı düğümler aynı zamanda diğer düğümler için röle görevi de görmeye başlamaktadır. Bu sayede baz istasyonuna uzak düğümler verilerini baz istasyonuna iletirken yol kaybından daha az etkilendiği için iletilen sinyallerin SNR değeri Çizelge 3.2'ye göre daha fazla olmaktadır. Aynı düğüm sayısı ve anten tipi için kısıtın 2 olduğu durumda hesaplanan ortalama BER değeri, 2×10^{-8} , bundan önce hesaplanan değerden bin kat daha düşük olmaktadır. Bununla birlikte UUG kısıtı, 2'den daha fazla gevşetildikçe ortalama BER değeri satüre olmaya başlamaktadır. Kısıt 2'den 3'e gevşetildiğinde, ortalama BER değeri 1.5×10^{-9} olarak hesaplanmaktadır. İlgili değer haberleşme sistemleri için kabul edilen hata oranına (10^{-9}) son derece yakındır. Kısıtın 4'e gevşetildiği durumda yeni hesaplanan ortalama BER değeri (2.6×10^{-10}) bundan önceki değerden altıda birinden daha fazla olmaktadır. Bu çalışmada ayrıca, verici ve alıcı anten kazançları sayesinde yönlü antenler ile hesaplanan ortalama BER değerlerinin tümyönlü anten ile hesaplanan değerlerden çok daha düşük olduğu görülmektedir. Örnek olarak tümyönlü anten kullanılan 60 düğümlü topolojiler için gecikme kısıtının 2, 3 ve 4 olduğu durumlarda ortalama BER sırasıyla 8.5×10^{-2} , 6.9×10^{-2} ve 6.7×10^{-2} olmaktadır. İlgili senaryolardaki ortalama BER değerleri, yönlü anten kullanılan muadillerine göre sırasıyla 4×10^6 , 4.6×10^7 ve 2.6×10^8 oranında daha fazla olmaktadır. Burada görüldüğü üzere picocellde çok yönlü

anten kullanıldığında ortalama BER'i 10^{-2} 'in altına dahi inemediği gözlemlenmektedir.



Şekil 3.4: UUG Kısıtının Farklı Düğüm Sayıları ve Anten Tipleri İçin Ortalama BER'e Etkisi

Dolayısıyla eğer amacımız uygun bit hata oranı, uzun yaşam süresi ve yeterince düşük gecikme ile haberleşmenin gerçekleşmesi ise optimal UUG kısıtı olarak 3 seçilmelidir.



4. YÖNLÜ ANTEN KULLANILAN KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA BİT HATA ORANINI VE UÇTAN UCA GECİKMİYİ KISITLAMANIN YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ

4.1 Amaç

Bundan önceki bölümde yönlü antenli senaryolar ile, tümyönlü antenli senaryolara kıyasla, çok daha düşük hata oranlarına ulaşılabildiği ve enerji verimliliğinde de önemli bir artış gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu bölümde ise yönlü antenin sağladığı avantajlardan yararlanılarak sensörlerde üretilen verilerin baz istasyonuna belirlenen bir bit hata oranlarının altında iletilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için iki farklı durumun incelemesi yapılmaktadır. Her iki durumda için de kullanılan UUG kısıtı, 3. bölümdekiyle aynı şekilde ele alınmaktadır. Ayrıca her iki durumda da düğümlerin verilerini baz istasyonuna düşük hata oranı ile iletebilmesi için düğümler arası haberleşmenin sadece yönlü antenler ile gerçekleşmesi amaçlanmaktadır. Bunun için bu bölümde BER, Bölüm 3'ün aksine, analizi yapılacak bir sonuç yerine UUG'yle birlikte kısıtlanacak ayrı bir parametre olarak ele alınmaktadır. Burada yönlü antenlerin anten kazancından da yararlanılarak BER kısıtı için tümyönlü antenlerin ulaşamadığı hata oranları tercih edilmektedir. İlk durumda KSA'daki her bir sensörün, verilerini baz istasyonuna, haberleşme sistemlerinin sağlaması gereken maksimum BER olan, 10^{-9} BER ile iletebilmesi için gerekli minimum UUG hesaplanmaktadır. Burada 20 düğümden 90 düğüme kadar 10^3 'lü aralıklarla artan topolojiler kullanılarak sensör ağı yoğunluğunun etkisi de incelenmektedir. İkinci durumdaysa KSA'daki her bir sensörün, kendi verilerini baz istasyonuna ilemesi için gereken UUG'yi ve bu esnada oluşan BER'i kısıtlamanın yaşam üzerindeki etkisi incelenmektedir. UUG kısıtlamaları için 2, 3 ve 4 seçilerek farklı UUG kısıtlamalarının etkisi incelenmektedir. BER kısıtlamaları için ise 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} ve 10^{-9} 'luk hata oranları tercih edilmektedir. Farklı UUG ve BER kısıtları için 30, 40 ve 50'şer düğümlü topolojiler kullanılarak sensör ağı yoğunluğunun yaşam süresine etkisi de incelenmektedir. Bu bölüm için, düğümler arasında girişimin olmadığı varsayılmaktadır.

4.2 Çalışma

4.2.1 Uçtan uca gecikme

Bu bölüm için uçtan uca gecikme Bölüm 3.2.1 ile aynı şekilde ele alınmaktadır. İlgili bölüm esnasında her bir sensörün, uygulanan bütün BER kısıtlarını sağlaması için uygulanan UUG kısıtının en az 2 olması gerekmektedir. Dolayısıyla farklı UUG kısıtlarının etkisini incelemek için 2, 3 ve 4 UUG'li kısıtlamalar uygulanmaktadır.

4.2.2 Enerji modeli

İlgili durum için Bölüm 3.2.2'te kullanılan birinci derece radyo modeli kullanılmıştır.

4.2.3 KSA'nın tanımlanışı

Bu bölümde KSA, önceki bölümlerle (2.2.3 ve 3.3.3) aynı şekilde tanımlanmaktadır.

4.2.4 KSA topolojisi

Bu bölümde, önceki bölümlere (2.2.4 ve 3.2.4) benzer şekilde düzgün rastgele dağılıma sahip dairesel topolojiler üretilmektedir. KSA yarıçapı, picocelle uyumlu olması için 200m olarak seçilirken sensör ağı yoğunluğunu incelemek için 30, 40, ve 50'şer düğümlü topolojiler üretilmiştir. Yaşam süresinin enbüyüklendiği kısımda, (Bölüm 4.3.2) sensörlerde üretilen verilerin baz istasyonuna en az 10^{-9} BER ve 2'li UUG ile iletilmesine olanak sağlayan düzgün rastgele dağılımlı topolojiler tercih edilmektedir. Minimum UUG'nin enküçüklendiği durumlarda (Bölüm 4.3.1) 50, yaşam süresinin enbüyüklendiği durumlarda (Bölüm 4.3.2) ise 40 farklı topoloji üzerinden çalışmalar gerçekleştirilip ortalama değerler kullanılmıştır.

4.2.5 Yaşam süresi

Bu bölümde yaşam süresi, bundan önceki bölümlerle (2.2.5 ve 3.2.5) aynı şekilde ele alınmaktadır.

4.2.6 Yönlü anten kazancı ve avantajları

Bölüm 3'teki gibi $\theta_1 = 20^\circ$ ve $\theta_2 = 180^\circ$ seçilerek anten kazancı 8.75 dBi seçilmiştir. Bu sayede bu bölümde, sensörlerde üretilen verilerin düşük bir BER kısıtı ile baz

istasyonuna iletilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca Eşitlik (3.2) ve (3.3)'ten yararlanılarak enerji verimliliğinde artış sağlanmaktadır.

4.2.7 Fiziksel katman ve SNR hesabı

Fiziksel katmandaki parametreler Bölüm 3.2.7 ile aynı şekilde tanımlanmıştır. Dolayısıyla SNR hesabı da aynı şekilde yapılmaktadır.

4.2.8 Bit hata oranı kısıtı

Herhangi bir sensör düğümü için Eşitlik (3.4) ile hesaplanan BER_{UU} 'nun istenilen bir hata oranından (BER_{req}) yüksek olmamasının istenildiği durumda Eşitlik (4.1) sağlanmalıdır.

$$1 - \prod_{i=1}^n (1 - BER_i) \leq BER_{req} \quad (4.1)$$

(4.1) ile BER kısıtının sağlanmasını rağmen çarpım işleminin MIP'e uygun olmaması yüzünden bu eşitlik optimizasyona uygun değildir. Bunun üstesinden gelebilmek için (4.1)'in her iki tarafının da logaritması alındıktan sonra optimizasyona uygun olan Eşitlik (4.2) elde edilmektedir. Logaritma, azalmayan bir fonksiyon olduğu için bu fonksiyon kullanıldığında (4.1)'deki eşitsizliğin iki tarafı değişmeden (4.2) elde edilmiştir.

$$\log_{10}(1 - BER_{req}) \leq \sum_{i=1}^n \log_{10}(1 - BER_i) \quad (4.2)$$

4.2.9 Optimizasyon modelleri

Bu kısımda farklı durumlar için iki farklı optimizasyon modeli kullanılmaktadır. İlk modelde belirli bir bit hata oranını sağlamak üzere uçtan uca gecikme enküçüklenmektedir. İkinci modelde ise belirli bir bit hata oranını ve uçtan uca gecikme kısıtını sağlayan sensör ağının yaşam süresi enbüyüklenmektedir.

4.2.9.1 Uçtan uca gecikmeyi enküçükleme modeli

Bu optimizasyon modeli, bundan önce kullanılan modellerin aksine yaşam süresini (t) enbüyüklemek yerine uçtan uca gecikmeyi (*Uçtan Uca Gecikme*) enküçükleme için kullanılmaktadır. Bu denklemlerde g_{ij}^k , k düğümünde üretilmiş ve i düğümünden j düğümüne iletilen tek bir biti temsil etmektedir. Eşitlik (4.3), Eşitlik (2.1) ile benzer amaçla kullanılmaktadır. Burada sensör ağındaki $k \in W$ düğümünde üretilen bitin, verinin akışının korunması prensiplerine göre baz istasyonuna ulaşması istenirken röle düğümleri için, giren ve çıkan bitlerin birbirine eşit olması sağlanmaktadır.

$$\sum_{j \in V} g_{ij}^k - \sum_{j \in W} g_{ji}^k = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ -1, & i = k \\ 0, & \text{değilse} \end{cases}, \forall i, \forall k \in W \quad (4.3)$$

Sensör ağındaki $k \in W$ düğümünde üretilen bitin tekrar aynı düğüme dönmesi için Eşitlik (4.4) kullanılırken Eşitlik (4.5) ile herhangi bir düğümün kendisine veri biti gönderemeyeceği belirtilmiştir.

$$\sum_{j \in W} g_{jk}^k = 0, \forall k \in W \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in V} g_{jj}^k = 0, \forall k \in W \quad (4.5)$$

Bu kısımda her bir sensörün ürettiği bitin baz istasyonuna ulaşırken 10^{-9} BER'i sağlayacak yolları tercih etmesi gerekmektedir. İlgili BER sağlanırken kullanılması gereken minimum UUG'yi enküçükleme için Eşitlik (4.6) kullanılmaktadır.

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} g_{ij}^k = \text{Uçtan Uca Gecikme} \quad (4.6)$$

Her bir sensörün bit iletimi için tercih ettiği yolların en az 10^{-9} BER'i sağlayabilmesi için Eşitlik (4.1) ve (4.2)'den yararlanılarak Eşitlik (4.7) elde edilmektedir. Bu eşitlikte BER_{ij} , i düğümünün j düğümüyle haberleşmesi sırasında meydana gelen BER'i temsil ederken BER_{req} isimli değişken de 10^{-9} 'da sabitlenmektedir.

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} g_{ij}^k \log_{10}(1 - BER_{ij}) \geq \log_{10}(1 - BER_{req}), \forall k \in W \quad (4.7)$$

Sensör ağındaki hiçbir veri bitin sıfırdan küçük olamayacağını belirtmek amacıyla Eşitlik (4.8)'ten yararlanılmaktadır.

$$g_{ij}^k \geq 0, \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V \quad (4.8)$$

Bu sayede *Uçtan Uca Gecikme*'nin minimize edildiği optimizasyon modelinin tamamı Şekil 4.1'de görülmektedir.

$$\sum_{j \in V} g_{ij}^k - \sum_{j \in W} g_{ji}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } i = k \\ -1 & \text{if } i = 1 \forall i, \forall k \in W \\ 0 & \text{değilse} \end{cases}$$

$$\sum_{j \in W} g_{jk}^k = 0 \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{j \in V} g_{jj}^k = 0 \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} g_{ij}^k \leq \text{Uçtan Uca Gecikme} \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} g_{ij}^k \log_{10}(1 - BER_{ij}) \geq \log_{10}(1 - BER_{req}) \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{j \in V} g_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i, \forall k \in W$$

$$g_{ij}^k \geq 0 \quad \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V$$

Şekil 4.1: Model 3

4.2.9.2 Yaşam süresini enbüyükleme modeli

Bu modelde Şekil 3.2'deki Model 2'de belirtilen eşitliklere ek olarak Eşitlik (4.9) kullanılmaktadır. Eşitlik (4.7)'den yararlanılarak oluşturulan bu eşitlik sayesinde $k \in W$ düğümünde üretilen verilerin baz istasyonuna iletilirken fazla BER_{req} kadar bir bit hata oranına sahip olması sağlanmaktadır.

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} a_{ij}^k \log_{10}(1 - BER_{ij}) \geq \log_{10}(1 - BER_{req}), \forall k \in W \quad (4.9)$$

Bu sayede t 'yi maksimize etmek için kullanılan optimizasyon modelinin tamamı Şekil 4.2'de görülmektedir.

$$\sum_{j \in V} f_{ij}^k - \sum_{j \in W} f_{ji}^k = \begin{cases} t & \text{if } i = k \\ -t & \text{if } i = 1 \forall i, \forall k \in W \\ 0 & \text{değilse} \end{cases}$$

$$\sum_{j \in W} f_{jk}^k = 0 \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{j \in V} f_{jj}^k = 0 \quad \forall k \in W$$

$$L_p \sum_{k \in W} \left(\sum_{j \in V} E_{tx}^{i,j} f_{ij}^k + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji}^k \right) \leq e_i \quad \forall i \in W$$

$$f_{ij}^k \leq G a_{ij}^k \quad \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} a_{ij}^k \leq \text{Uçtan Uca Gecikme} \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} a_{ij}^k \log_{10}(1 - BER_{ij}) \geq \log_{10}(1 - BER_{req}) \quad \forall k \in W$$

$$\sum_{j \in V} a_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i, \forall k \in W$$

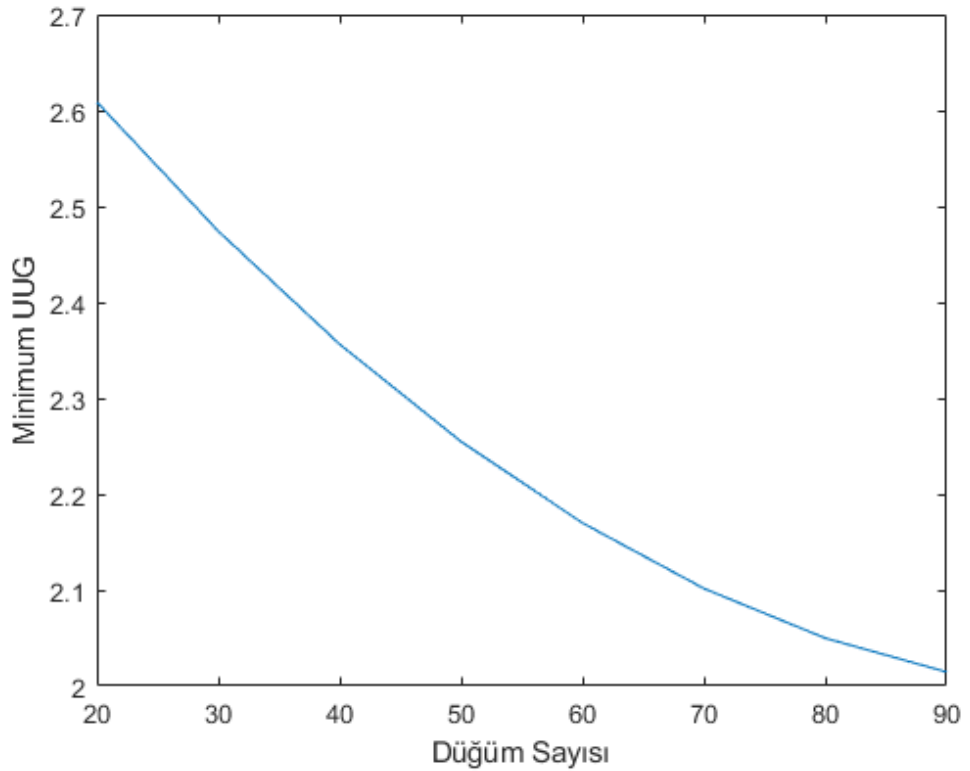
$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall i, \forall k \in W, \forall j \in V$$

Şekil 4.2: Model 4

4.3 Sonuçlar

4.3.1 Minimum uçtan uca gecikme–düğüm sayısı grafiği

Düğüm sayısına göre en az 10^{-9} bit hata oranına ulaşmak için gerekli minimum UUG miktarları Şekil 4.3'te görülmektedir. Görüleceği üzere düğüm sayısını artırmak, ilgili bit hata oranına ulaşmak için gereken ortalama minimum UUG miktarını düşürmektedir. Bunun sebebi yeni eklenen düğümlerin, önceden daha uzun uçtan uca gecikmeye sahip düğümler için role görevi görmeye başlamasıdır. Dolayısıyla yeni eklenen düğümler sayesinde önceden izole durumda bulunan düğümler artık verilerini daha düşük UUG ile iletebilmektedirler. Bununla birlikte Şekil 4.3'te görülmektedir ki düğüm sayısını artırmanın etkisi, KSA'daki düğüm sayısı arttıka daha az olmaktadır. Bunun gerçekleşme sebebi KSA yeterince kalabalık olmaya başladıktan sonra izole düğüm sayısının gitgide azalmaya başlamasıdır.



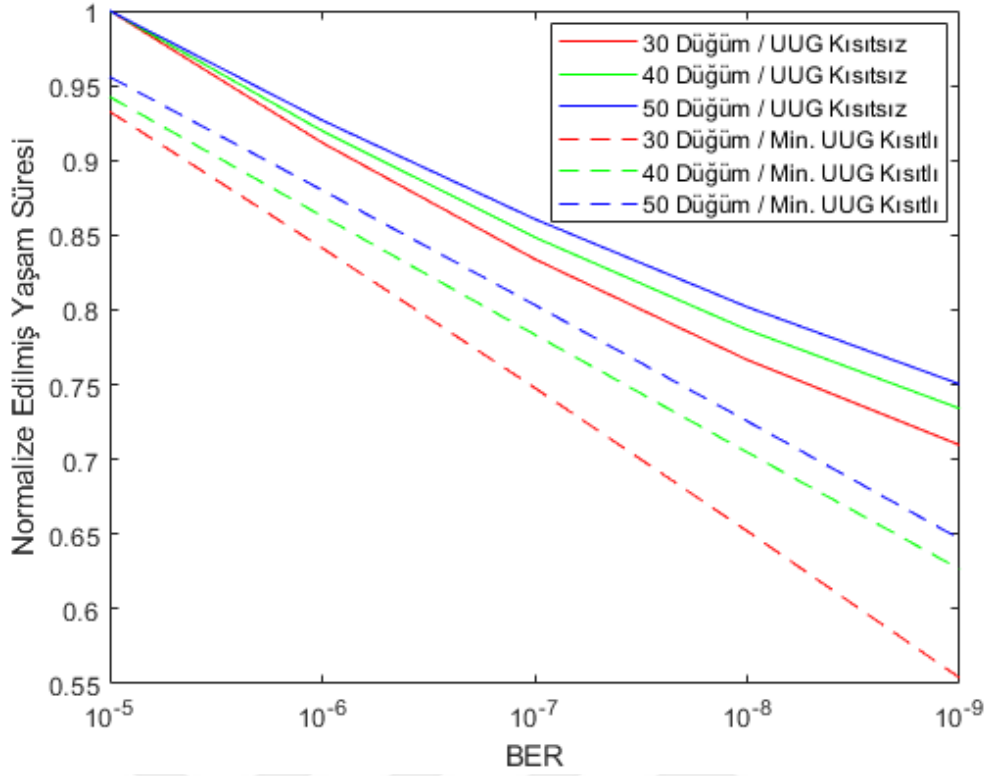
Şekil 4.3: Düğüm Sayısının Minimum UUG'ye Etkisi

4.3.2 Normalize yaşam süresi–bit hata oranı grafikleri

Bu kısımda UUG kısıtlı durumlar, kısıtın uygulanmadığı versiyonlarıyla karşılaştırılmaktadır. Düzgün rastgele dağılımlı ağlar için elde edilen bu sonuçlarda, UUG kısıtı giderek gevşetilmektedir. UUG kısıtı uygulanırken 30, 40 ve 50 düğümlü topolojiler kullanılarak düğüm sayısının etkisi de göz önüne alınmıştır. Normalize yaşam sürelerini hesaplamak için aynı düğüm sayısını içeren topolojilerde farklı UUG ya da BER kısıtları kullanılarak hesaplanan sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmaktadır.

4.3.2.1 Minimum UUG kısıtlı durumla UUG kısıtsız durumun karşılaştırılması

Şekil 4.4'te minimum UUG (2'li UUG) kısıtının uygulandığı durumda elde edilen yaşam süreleri, kısıtın uygulanmadığı versiyonlarıyla karşılaştırılmaktadır. Her iki durum için de sensörler verilerini baz istasyonuna daha küçük BER ile iletmeye çalışırken yaşam süresi azalmaktadır. Bununla birlikte, 2'li UUG kısıtı uygulandığı zaman yaşam süresinin daha fazla ve doğrusal bir şekilde azaldığı görülmektedir. 30 düğümlü sensör ağlarında minimum UUG kısıtı uygulanırken BER kısıtını 10^{-5} 'ten 10^{-9} 'a çektiğimiz zaman yaşam süresi, grafikteki maksimum yaşam süresinin yaklaşık %55'ine kadar düşmektedir. Bununla birlikte aynı senaryonun UUG kısıtı uygulanmayan versiyonunda yaşam süresi, maksimum yaşam süresinin %71'ine kadar düşmektedir. Bunun sebebi, veriler 10^{-9} 'luk BER ile baz istasyonuna iletilirken yüksek SNR gerektiği için iletim opsiyonları zaten sınırlı olmaktadır. Buna ek olarak minimum UUG kısıtı kullanılırsa, iletim opsiyonları daha da kısıtlanacağından bazı röle düğümlerinde aşırı yüklenme meydana gelmektedir. Bununla birlikte 10^{-9} 'luk BER kısıtı uygulanırken sensör sayısını 30'dan 40'da çıkarmak, minimum UUG kısıtlı durumun normalize yaşam süresi farkını %7 kadar artırmaktadır. Öte yandan, sensör sayısını 40'tan 50'ye çıkarmak normalize yaşam süresi farkını sadece %2 kadar artırmaktadır. Dolayısıyla 10^{-9} 'luk BER ve minimum UUG kısıtları uygulanıyorsa picocell ağın 40 düğümden sonra yeterince yoğun olmaya başladığı sonucuna varılmaktadır.

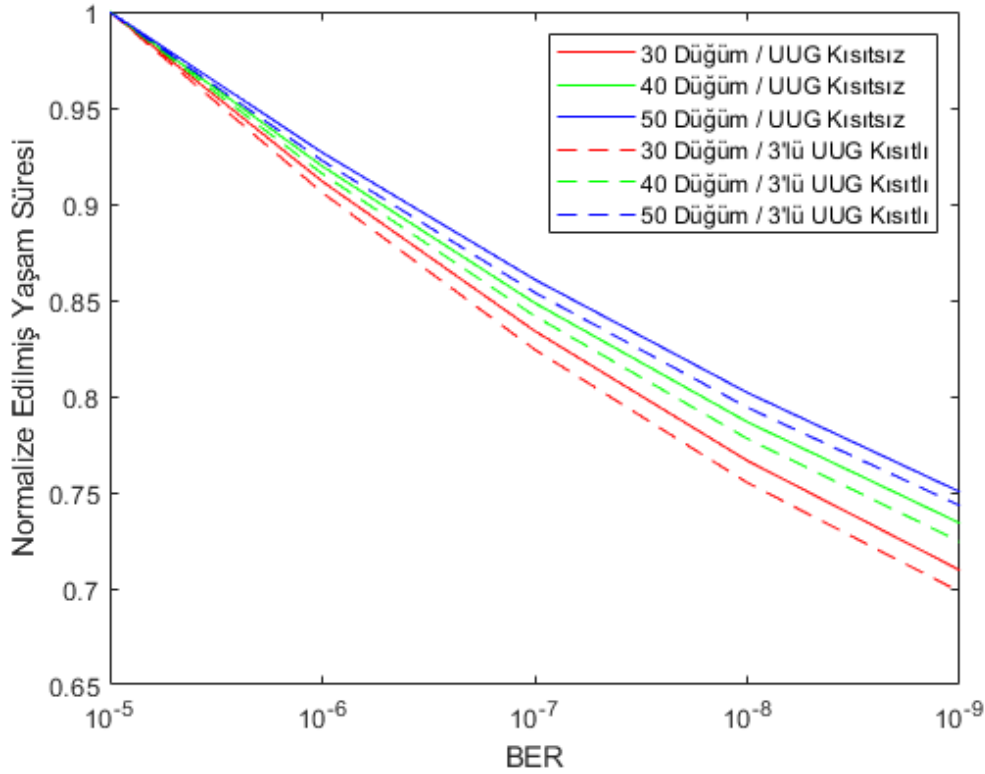


Şekil 4.4: Bit Hata Oranının Farklı Dügüm Sayıları İçin Normalize Yaşam Süresine Etkisi (Minimum UUG Kısıtlı ve Kısıtsız Durumlar İçin)

4.3.2.2 3'lü UUG kısıtlı durumla UUG kısıtsız durumun karşılaştırılması

Şekil 4.5'te 3'lü UUG kısıtının uygulandığı durumda elde edilen yaşam süreleri, kısıtın uygulanmadığı versiyonlarıyla karşılaştırılmaktadır. Şekil 4.3'e kıyasla görülmektedir ki UUG kısıtının uygulandığı yaşam süreleri artık doğrusal olarak azalmamaktadır. Ayrıca, artık düğümler gerekli BER kısıtını sağlarken daha fazla opsiyonları olduğu için UUG kısıtının uygulandığı durumlarda Şekil 4.3'e göre yaşam süresi artışı olmaktadır. Örnek olarak 30 düğümlü topolojilerde 10^{-9} 'luk bit BER kısıtı uygulandığında, Şekil 4.3'e göre yaklaşık %15'lik yaşam süresi artışı gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 4.3'ün aksine 10^{-9} 'luk BER hedeflenirken düğüm sayısını 30'tan 40'a çıkarmak, normalize yaşam süresi farkını sadece %1 kadar artırmaktadır. Burada görülmektedir ki 3'lük UUG kısıtı, 30 düğümlü topolojiler için dahi yaşam süresini minimal oranda düşürdüğünden yeni düğümler eklemek gereksiz olmaktadır. Sonuç olarak, 3'lü UUG kısıtı kullanılırken bütün sensörler düşük BER ile haberleşmeler dahi kısıtın uygulanmadığı durumlardaki yaşam sürelerine çok yakın yaşam sürelerine

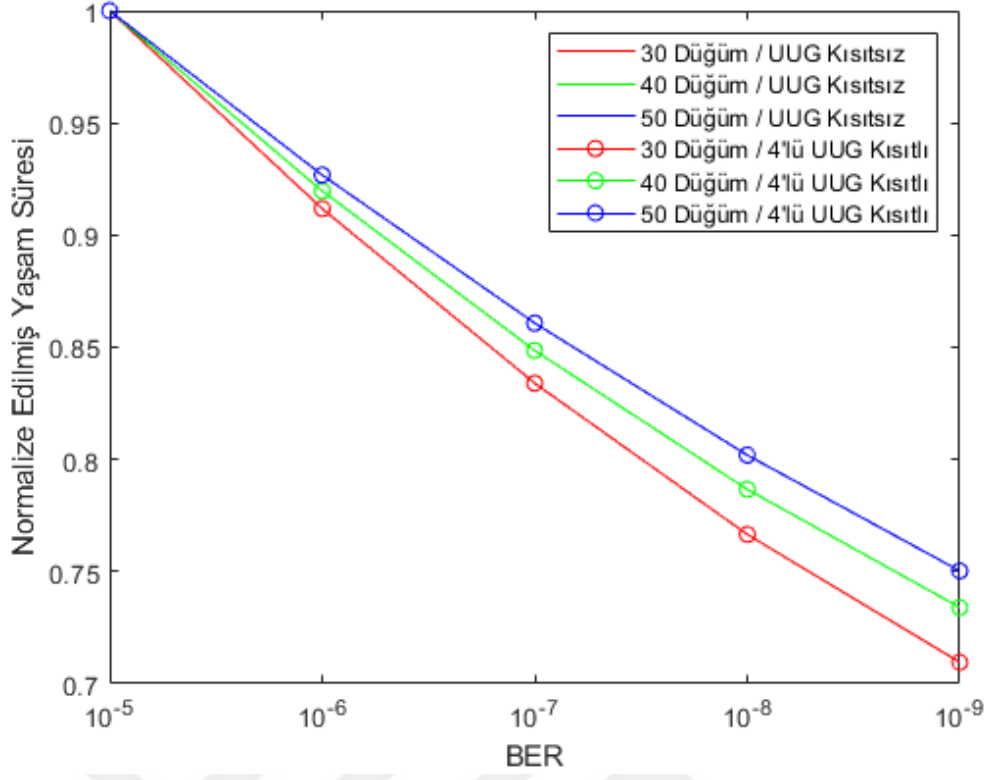
sahip olmaktadır. Dolayısıyla hem uygun yaşam süresi hem de düşük gecikme ve uygun veri tazeliği amaçlanıyorsa 3 UUG'li kısıt bizim için optimal senaryodur.



Şekil 4.5: Bit Hata Oranının Farklı Düğüm Sayıları İçin Normalize Yaşam Süresine Etkisi (3'lü UUG Kısıtlı ve Kısıtsız Durumlar İçin)

4.3.2.3 4'lü UUG kısıtlı durumla UUG kısıtsız durumun karşılaştırılması

Şekil 4.6'da 4'lü UUG kısıtının uygulandığı durumda elde edilen yaşam süreleri, kısıtın uygulanmadığı versiyonlarıyla karşılaştırılmaktadır. Düğüm sayısından bağımsız olarak, UUG kısıtlı ağlar ve kısıtın uygulanmadığı ağların aynı BER kısıtlarını sağlarken yaşam sürelerinin de aynı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, UUG kısıtını 4'ten daha fazla gevşetmenin yaşam süresine bir etkisi olmadığı sonucuna varılmaktadır. Bu yüzden UUG kısıtı 4'ten daha fazla gevşetildiğinde, sensör ağının düşük gecikme özelliğinden gereksiz yere fedakârlık yapılacağı sonucuna varılmaktadır.




Şekil 4.6: Bit Hata Oranının Farklı Düğüm Sayıları İçin Normalize Yaşam Süresine Etkisi (4'lü UUG Kısıtlı ve Kısıtsız Durumlar İçin)



5. YÖNLÜ ANTEN KULLANILAN VE UÇTAN UCA GECİKMENİN KISITLANDIĞI KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA GİRİŞİMİ ENGELLEMELİK İÇİN KULLANILAN FARKLI YÖNTEMLERİN VERİ HIZI VE YAŞAM SÜRESİNE ETKİSİ

5.1 Amaç

Bu bölümde yönlü anten kullanmanın ve düşük gecikme için UUG'yi kısıtlamanın sağladığı avantajlardan yararlanılarak girişimi engellemek için iki farklı yöntem ile çalışmalar yapılmaktadır. İki yöntem için de yönlü anten kullanımı sayesinde antenin sağladığı anten kazancı ve enerji verimliliği gibi avantajlardan yararlanılmaktadır. Her iki yöntemde de yönlü anten kazancı sayesinde çok düşük hata oranıyla haberleşme gerçekleştirilmektedir. Bu sayede sensörlerin, kendi verilerini baz istasyonuna maksimum 10^{-9} BER kısıtı ile iletmesi sağlanmaktadır. İlk önerilen yöntem, bilinen bir yöntem olan, TDMA ile sensör ağında aynı anda sadece tek bir veri akışı gerçekleştirilmektedir. İkinci önerilen yöntem için ise bu tez çalışması için tasarlanan ve yönlü antenlerin avantajlarından daha fazla yararlanıp verimi artırmak amacıyla kullanılan GEM'dir. Bu yöntemde, yönlü antenlerin sadece belli bir yönde haberleşmeye izin vermesi, girişimin kontrol altına alınmasını kolaylaştırmakta ve aynı anda gerçekleşen veri akışı sayısını artırabilmektedir. Her iki yöntem için de girişim engellendikten sonra ilgili senaryolar için veri hızı ve yaşam süresi hesabı yapılmaktadır. Burada UUG'yi kısıtlamak özellikle veri hızını artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Son olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak GEM'in TDMA'e karşı avantajları belirlenmektedir. Bu bölümde UUG kısıtı olarak 2'li ve 4'lü UUG seçilmektedir. İki farklı yöntem için de 30 düğümlü topolojiler kullanılmaktadır.

Not: Bu bölümde düğüm numarası 1 olan sahip baz istasyonu, şekillerde  şeklinde gösterilmektedir.

5.2 Çalışma

5.2.1 Uçtan uca gecikme

Uçtan uca gecikme, Bölüm 3.2.1 ve 4.2.1'deki gibi hesaplanmaktadır. İlgili bölümlerde görüldüğü üzere bütün sensörlerin verilerini 10^{-9} BER ile iletebilmesi için minimum 2'li UUG kısıtı kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte özellikle veri hızını artırmak için UUG kısıtının düşük olması önem taşımaktadır. Bölüm 4.3.2.3'te, UUG kısıtını 4'ten daha fazla gevşetmenin yaşam süresi ya da BER açısından herhangi bir faydasının olmadığı görülmüştü. Dolayısıyla bu bölümde kullanılacak en sıkı ve en gevşek UUG kısıtlarını temsil etmek için sırasıyla 2 ve 4 UUG'li kısıtlamalar kullanılmaktadır.

5.2.2 Enerji modeli

Bölüm 3.2.2 ve 4.2.2'te tercih edilen birinci derece anten modeli kullanılmaktadır.

5.2.3 KSA'nın tanımlanışı

Bu bölümde KSA, önceki bölümlerle (2.2.3, 3.2.3 ve 4.2.3) aynı şekilde tanımlanmaktadır.

5.2.4 KSA topolojisi

KSA topolojisi, önceki bölümlere (2.2.4, 3.2.4 ve 4.2.4) benzer şekilde oluşturulmaktadır. KSA yarıçapı, picocelle uyumlu olması için 200m olarak seçilmektedir. Sensörlerde üretilen verilerin baz istasyonuna en az 10^{-9} BER ve 2'li UUG ile iletilmesine olanak sağlayan düzgün rastgele dağılımlı topolojiler tercih edilmektedir. Bu bölüm özelinde KSA yoğunluğu incelenmediğinden sadece 30 düğümlü topolojiler kullanılmaktadır. Daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesi için 20 farklı topoloji üzerinden çalışmalar gerçekleştirilip ortalama değerler kullanılmaktadır.

5.2.5 Üretilen bit miktarı

Bu bölümde üretilen bit miktarı, enerjisi ilk biten sensörün enerjisi bitmeden önce ürettiği ve baz istasyonuna ulaştırdığı toplam bit miktarıdır. Bu bölüm özelinde girişim göz önüne alındığı için bundan önceki bölümlerin (Bölüm 2.2.5, 3.2.5 ve 4.2.5) aksine üretilen bit miktarı ve yaşam süresi birbirinden farklı konseptler olarak

incelenmektedir. Bu sayede optimizasyon modeli kullanılarak KSA'daki enerjisi ilk biten sensörün ürettiği bit sayısı enbüyüklenirken yaşam süresi hesabı ise ayrı bir şekilde Bölüm 5.2.12'ye göre yapılmaktadır.

5.2.6 Yönlü antenin avantajları

Bölüm 3.2.6 ve 4.2.6'daki gibi $\theta_1 = 20^\circ$ ve $\theta_2 = 180^\circ$ seçilerek anten kazancı 8.75 dBi seçilmiştir. Bu sayede bu bölümde, sensörlerde üretilen verilerin düşük bir BER kısıtı ile baz istasyonuna iletilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca enerji verimliliğinde Eşitlik (3.2) ve (3.3) sayesinde artış sağlanmaktadır. İlgili avantajlara ek olarak, yönlü antenin sadece belli bir yönde haberleşmeye izin vermesi sayesinde bu bölümde önerilen GEM yönteminde, TDMA'in aksine, KSA'da aynı anda birden fazla veri akışına imkân sağlanmaktadır.

5.2.7 Fiziksel katman ve SNR hesabı

Bölümde 3.2.7 ve 4.2.7'deki gibi Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'deki fiziksel katman parametreleri kullanılarak SNR hesabı yapılmaktadır.

5.2.8 Bit hata oranı kısıtı

Bölüm 4.2.8 ile benzer şekilde BER kısıtı uygulanmaktadır. Bu bölüm özelinde bütün durumlarda, sensörlerin verilerini baz istasyonuna en fazla 10^{-9} BER ile göndermesi istenmektedir. Dolayısıyla BER kısıtı olarak sadece 10^{-9} tercih edilmiştir.

5.2.9 Optimizasyon modeli

Bu bölümde optimizasyon için Model 4'teki denklemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte Bölüm 3 ve 4'ün aksine, bu bölümde yaşam süresi ve üretilen bit sayısı birbirinden farklı şekilde ele alınmaktadır. Bu nedenle, bu bölümdeki denklemler için t 'yi enbüyüklemek, sadece her bir sensörün enerjisi tükenmeden önce ürettiği toplam bit sayısını enbüyüklemek anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, ilgili bölümde Model 4 kullanılarak enerjisi ilk biten sensörün ürettiği bit sayısı enbüyüklenmektedir.

5.2.10 Girişimi engellemek için kullanılan yöntemler hakkında

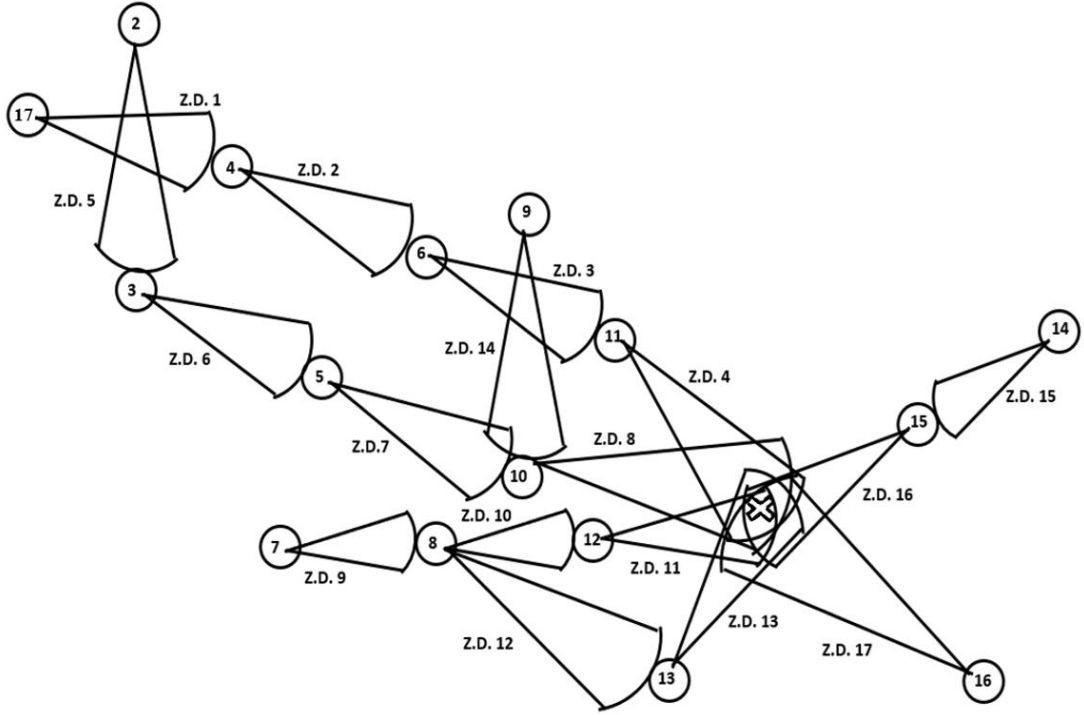
Bu bölüm özelinde girişimi engellemek için kullanılan TDMA yöntemi ve önerilen GEM yöntemi aşağıda belirtilmektedir. Her iki yöntem için de yönlü antenlerin

sağladığı avantajlardan yararlanılsa da GEM yönteminde bu avantajlardan daha fazla yararlanılmakta ve veri hızı başta olmak üzere KSA'nın verimi artmaktadır.

Not: Herhangi bir düğümde üretilen verinin iletimi esnasında, üretici düğüme kıyasla, UUG miktarına bağlı olarak yeni bir turun kullanılması gerekmektedir. Bir diğer deyişle, her atlama esnasında yeni bir turun kullanılması gerekmektedir. Bölüm 5.2.10.1 ve Bölüm 5.2.10.2'de bahsedilen zaman dilimleri, herhangi bir verinin bulunduğu tur içerisinde kullandığı zaman dilimini temsil etmektedir. Örnek olarak Şekil 5.1'de Düğüm 9'un verisinin iletilmesi için ilk önce Düğüm 10'a, daha sonra da baz istasyonuna iletilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla Düğüm 9'un verisini baz istasyonuna iletilmesi için iki farklı turun kullanılması gerekmektedir. Burada ilk turda 14. zaman dilimi kullanılırken 2. turda ise 8. zaman dilimi kullanılmaktadır. Öte yandan Düğüm 10'un kendi ürettiği verinin baz istasyonuna iletilmesi için sadece tek bir atlama yeterli olmakta ve bu yüzden sadece tek bir turun kullanılması gerekmektedir. Buna göre Düğüm 10'da üretilen veriler, 1. turdaki 8. zaman dilimini kullanarak baz istasyonuna ulaşılmaktadır. İlgili durumdan, Bölüm 5.2.11'de ayrıca bahsedilmektedir.

5.2.10.1 TDMA

KSA'da veri iletimini engellemek için ilk olarak hali hazırda kullanılmakta olan yöntemlerden biri olan TDMA seçilmiştir. İlgili yöntemde her bir zaman diliminde sadece tek bir veri iletimi gerçekleştiği belirtilmektedir. 4'lü UUG kısıtı için üretilen bit sayısı enbüyüklendikten sonra elde edilen hüzmelere TDMA uygulanan senaryo Şekil 5.1'de görülebilir.



Şekil 5.1: TDMA Uygulanan Senaryo İçin Zaman Dilimi Ataması

Şekil 5.1'den yararlanılarak hangi düğüm çiftleri arasında hangi zaman diliminin kullanıldığı, Şekil 5.2'de belirtilmektedir. Şekil 5.2 için, üstte yer alanlar farklı zaman dilimlerini temsil ederken altta yer alanlar ise yukarıdaki zaman diliminin hangi düğüm çiftleri arasındaki hüzmelerde kullanıldığını belirtmektedir. Burada görüldüğü üzere her bir hüzmeye, veri iletimi için farklı bir zaman dilimini tercih etmektedir.

Z.D. 1	Z.D. 2	Z.D. 3	Z.D. 4	Z.D. 5	Z.D. 6	Z.D. 7	Z.D. 8	Z.D. 9	Z.D. 10	Z.D. 11	Z.D. 12	Z.D. 13	Z.D. 14	Z.D. 15	Z.D. 16	Z.D. 17
(17,4)	(4,6)	(6,11)	(11,1)	(2,3)	(3,5)	(5,10)	(10,1)	(7,8)	(8,12)	(12,1)	(8,13)	(13,1)	(9,10)	(14,15)	(15,1)	(16,1)

Şekil 5.2: TDMA Yöntemindeki Farklı Zaman Dilimlerinin Kullanıldığı Hüzmeler

Bu yüzden herhangi bir hüzmeye kendi zaman diliminde veri iletimini sağladıktan sonra tekrar veri iletimi yapabilmesi için diğer hüzmelerin de kendi zaman diliminde veri iletimi yapmasını beklemesi gerekmektedir. Dolayısıyla veri iletimi esnasında boşa geçen zaman dilimi miktarı çok fazla olduğundan veri hızı açısından verimsiz olması beklenmektedir. Burada görülmektedir ki TDMA kullanan senaryolar her ne kadar yönlü antenlerin sağladığı anten kazancı ve enerji verimliliğinden yararlanabilse de yönlü antenlerin girişimi engellemek için kullanabileceği daha verimli yöntemlerden

yararlanamamaktadır yönlü antenlerin girişimi engellemek için kullanabileceği daha verimli yöntemlerden yararlanamamaktadır.

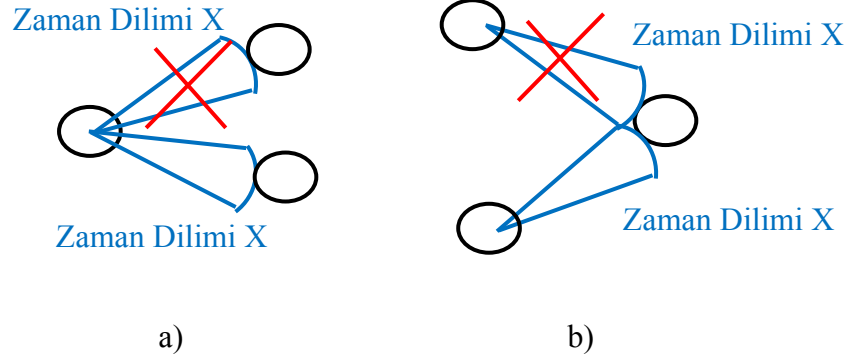
5.2.10.2 Girişim Engelleyici Model (GEM)

TDMA kullanılan senaryoda girişim engellenirken veri hızının düşük olacağından bahsedilmişti. TDMA'li senaryoya alternatif olarak bu tez özelinde GEM yöntemi geliştirilmektedir. Bir tür çoklu erişim olan bu yöntemde yönlü antenlerin yalnızca belli bir yönde haberleşmeye olanak sağlamasından yararlanılmaktadır. Bu sayede farklı sinyallerin girişimden etkilenmemesi sağlanırken KSA'da aynı anda gerçekleşen veri akışı artırılabilir. Dolayısıyla veri hızı başta olmak üzere KSA'nın veriminin artması sağlanmaktadır. Bunu sağlamak için bu yöntem bir planlayıcı (scheduler) gibi çalışmaktadır. GEM modelini gerçekleştirmek için öncelikle bu planlayıcının tasarım kuralları tespit edilmiş, daha sonra da bu kurallara göre bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmanın her bir adımı örneklerle açıklanmıştır.

5.2.10.3 GEM'in kuralları

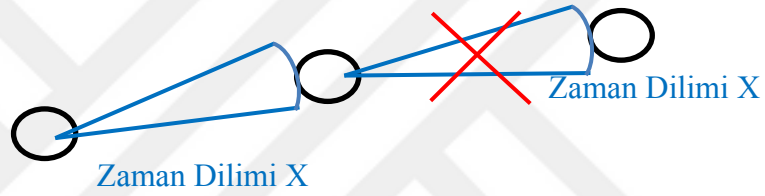
Bu yöntemde farklı sensörlerin aynı anda veri akışını gerçekleştirebilmesi için aşağıda belirtilen 3 kuralın da sağlanması gerekmektedir. Bu kurallarda aynı renkli hüzmelerin aynı zaman diliminde veri iletmeye çalıştığı varsayılmaktadır.

- Kural 1: Bu kuralın sağlanması için Kural 1-a ve Kural 1-b'nin sağlanması gerekmektedir.
 - Kural 1-a: Herhangi bir sensörün veri iletmek için kullandığı farklı hüzmeler, aynı zaman dilimini kullanmamalıdır. İlgili durum Şekil 5.3-a'da detaylı olarak gösterilmektedir.
 - Kural 1-b: Herhangi bir sensörün başka sensörlerin verilerini almak için kullandığı hüzmeler, aynı zaman dilimini kullanmamalıdır. İlgili durum Şekil 5.3-b'de detaylı olarak gösterilmektedir.



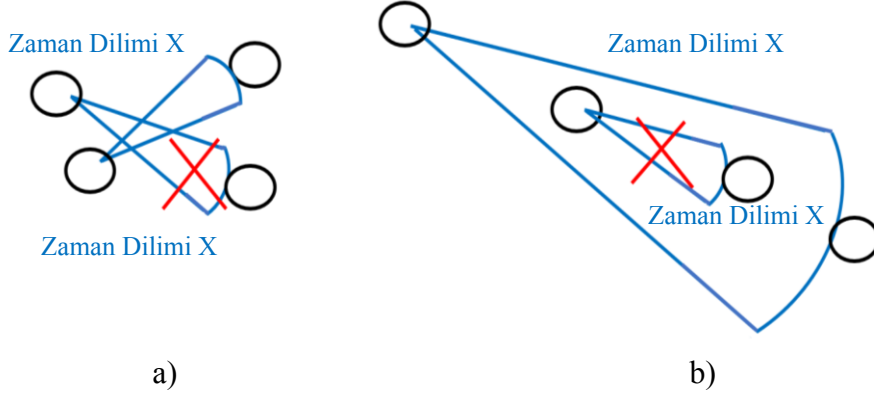
Şekil 5.3: Kural 1'in Görselleştirilmesi: a) Kural 1-a b) Kural 1-b

- Kural 2: Veri iletimi esnasında art arda bulunan hüzmeler aynı zaman dilimini kullanmamalıdır. İlgili durum Şekil 5.4'te detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.4: Kural 2'nin Görselleştirilmesi

- Kural 3: Herhangi iki düğümden çıkan hüzmeler, birbirlerini kesiyorsa aynı zaman dilimini kullanmamalıdır. İki hüzmelerin birbirini kesmesi için ele alınan senaryolar, Şekil 5.5-a ve Şekil 5.5-b'de incelenmektedir. İlk senaryoda hüzmeler birbirlerini, Şekil 5.5-a'daki gibi kesebilmektedir. İkinci senaryoda ise hüzmeler, Şekil 5.5-b'deki gibi birbiri içinde yer alabilmektedir. Bu tez çalışmasında, her iki senaryo için de hüzmelerin birbirlerini kestiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 5.5: Kural 3'ün Görselleştirilmesi: a) Birbirini Kesen Hüzmeler İçin b) Birbiri İçinde Yer Alan Hüzmeler İçin

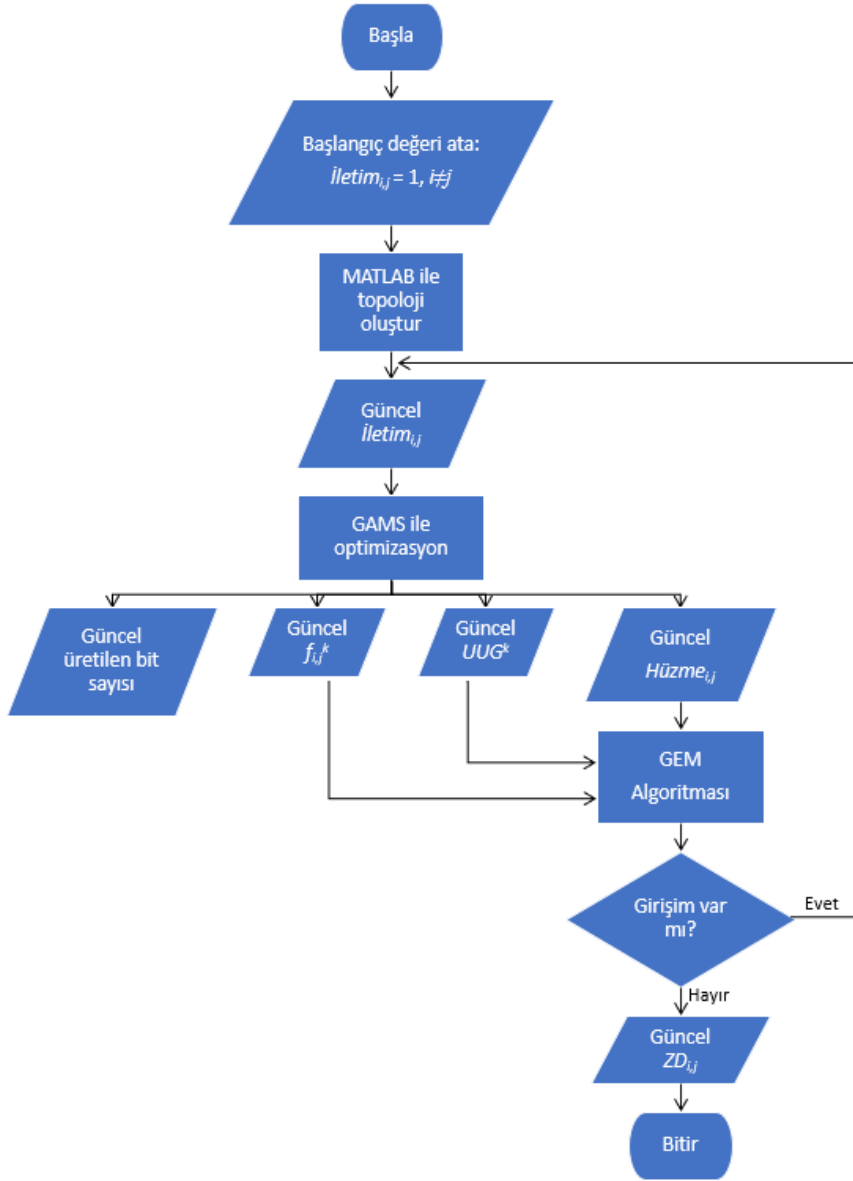
5.2.10.4 GEM hakkında genel bilgiler

Bu bölümde i, j ve k indisleri ile V ve W setleri, Bölüm 5.2.3'te bahsedildikleri şekilde kullanılmaktadır. Bundan önceki optimizasyon modellerinde yer alan f_{ij}^k , yine aynı şekilde k üretici düğümünde üretilip i düğümünden j düğümüne iletilen verileri temsil etmektedir. Herhangi bir üretici k düğümünün, verilerini baz istasyonuna ilemesi gerekli UUG miktarı, UUG^k ile belirtilmektedir. Sensör ağında iletim için kullanılan toplam hüzmeye sayısı HS ile belirtilirken izin verilen maksimum UUG miktarı da UUG^{max} ile gösterilmektedir. Ayrıca bu algoritmada X ile sadece GEM'in Birinci Adım'ında geçici olarak kullanılan zaman dilimleri temsil edilirken Y ile GEM'in tamamında geçerli olan gerçek zaman dilimleri temsil edilmektedir. Burada $n \in X$ ile ilk zaman diliminden UUG^{max} numaralı zaman dilimine kadar olan dilimler ele alınırken $m \in Y$ ile de ilk zaman diliminden HS numaralı zaman dilimine kadar olan dilimler ele alınmaktadır. Bunun sonucunda yeni eklenen setler; $X = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{UUG^{max}}\}$ ve $Y = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{HS}\}$ şeklinde gösterilmektedir. $n \in X$ indislerinin $[1-UUG^{max}]$ aralığında olmasının sebebi GEM algoritmasının Birinci Adım'ında açıklanmaktadır. $m \in Y$ indislerinin $[1-HS]$ aralığında olmasının sebebi ise, en başta GEM ile sensör ağında kaç farklı zaman dilimine ihtiyaç duyulacağını bilinmemesidir. Dolayısıyla en kötü senaryo göz önüne alınıp kullanılabilir farklı zaman dilimleri belirlenirken, TDMA'li senaryodaki gibi, sanki her hüzmeye farklı bir zaman dilimi kullanacağı düşünülmüştür. (Bu zaman dilimlerinin çoğunluğu GEM algoritması esnasında kullanılmamaktadır.)

5.2.10.5 GEM'in kullanılma şekli

GEM yönteminin kullanılma şeklini sembolize eden akım şeması Şekil 5.6'da görülmektedir. Buna göre ilk olarak değer atanan $\dot{I}letim_{i,j}$ isimli değişkende baz istasyonu dışında bütün düğümlerin başka düğümlerle haberleşme yapabilmesine imkân sağlanmıştır. (Eğer iki düğüm arasındaki mesafe yönlü antenin sağlayabileceği maksimum mesafeden fazlaysa bu düğümler arasındaki haberleşme ayrıca sonradan engellenmektedir.) Bu değişkenin çalışma prensibine göre herhangi bir (i,j) düğüm çifti için $\dot{I}letim_{i,j} = 1$ ise i 'den j 'ye iletişime izin verilmekte, $\dot{I}letim_{i,j} = 0$ ise iletişim engellenmektedir. Daha sonra $\dot{I}letim_{i,j}$ ve sensör ağı fiziksel katman parametreleri göz önüne alınarak MATLAB ile topolojiler oluşturulmaktadır. Devamında ise, UUG ve BER kısıtları göz önüne alınarak GAMS yardımıyla üretilen bit sayısını enbüyükleyecek yollar belirlenmektedir. Bu yollar içinde yer alan hüzmeler $Hüzme_{i,j}$ şeklinde kaydedilmektedir. Burada ayrıca ilgili optimizasyon sonucunda meydana gelen veri akışına göre $\forall i, \forall k \in W$ ve $\forall j \in V$ için f_{ij}^k ve UUG^k de kaydedilmektedir. Devamında $\dot{I}letim_{i,j}$, $Hüzme_{i,j}$, f_{ij}^k ve UUG^k 'nin GEM algoritmasına girdi olarak verilmesinden sonra çıktı olarak $\dot{I}letim_{i,j}$ 'nin en güncel versiyonu elde edilmektedir. GEM algoritması esnasında $\dot{I}letim_{i,j}$ 'de bundan önce 1 olan bazı değerler 0 olabilirken 0 olan değerlere tekrar 1 atanmamaktadır. Buna göre eğer girdi olan $\dot{I}letim_{i,j}$ ile çıktı olan $\dot{I}letim_{i,j}$ 'nin değerleri arasında herhangi bir fark yoksa, sensör ağında GEM algoritması ile girişimin meydana gelmediği görülerek akım şeması bir alt adımdan devam etmektedir. Bu durumda kullanılan farklı zaman dilimi sayısından yararlanılmak üzere güncel $ZD_{i,j}$ (Zaman Dilimi) kullanıcıya sunulmaktadır. Burada $ZD_{i,j}$, i düğümünden j düğümüne iletimi gerçekleştiren $Hüzme_{i,j}$ 'nin hangi zaman dilimini kullandığını belirtmektedir. Öte yandan eğer ilgili GEM algoritması esnasında girişim meydana geldiyse çıktı olarak sunulan yeni $\dot{I}letim_{i,j}$ baz alınarak tekrar üretilen bit sayısı süresi enbüyüklenip hüzmeler sıfırdan oluşturularak $Hüzme_{i,j}$, f_{ij}^k ve UUG^k güncellenmektedir. Bu sayede bundan önce girişime neden olan hüzmelerin istikametinde veri akışı engellenmeye çalışılmaktadır. Güncel $Hüzme_{i,j}$, $\dot{I}letim_{i,j}$, f_{ij}^k ve UUG^k tekrar GEM algoritmasına girdi olarak sokulduktan sonra tekrar girişim kontrol edilmektedir. İlgili işlem sonucunda eğer girişimin oluşması engellenmişse bir alttaki adımdan devam edilmektedir. Aksi halde girişim engellenene kadar ilgili döngü devam etmektedir. Burada bahsedilen GEM Algoritması için MATLAB'dan yararlanılmakta

ve Algoritma 2 ile detaylı olarak belirtilmektedir. İlgili algoritma için ayrıca Bölüm 5.2.10.6’da detaylı açıklama ve örnekler de sunulmaktadır.



Şekil 5.6: GEM’in Kullanılması İçin Akış Şeması

5.2.10.6 GEM algoritması

GEM algoritması; giriş, dört farklı adım ve çıktıdan oluşmaktadır. Giriş kısmında, girdi olarak bazı değişkenler alınırken bu algorithmada kullanacak bazı değişkenler için de başlangıç değeri ataması yapılmaktadır. Birinci Adım’da, direkt baz istasyonuna iletim yapmayan hüzmeler için gecikme miktarına bağlı olarak zaman dilimi ataması yapılmaktadır. İkinci Adım’da, direkt baz istasyonuna iletim yapan hüzmeler dışındaki

hüzmelerin Kural 1 ve Kural 2'ye uyması sağlanmaktadır. Üçüncü Adım'da, direkt baz istasyona iletim yapan hüzmelerin Kural 1, Kural 2 ve Kural 3'e uyması sağlanmaktadır. Dördüncü Adım'da girişim istikametinde yer alan ve direkt baz istasyonuna iletimim gerçekleştirilmediği bağlantılar için haberleşme sonlandırılmaktadır. Çıktı kısmında ise Toplam Geçen Süre (TGS) hesabı için gerekli $ZD_{i,j}$ değişkeni ve algoritma sonunda girişimin meydana gelip gelmediğini belirten güncel $\dot{I}letim_{i,j}$ kullanıcıya sunulmaktadır.

Algoritma 2 - Giriş

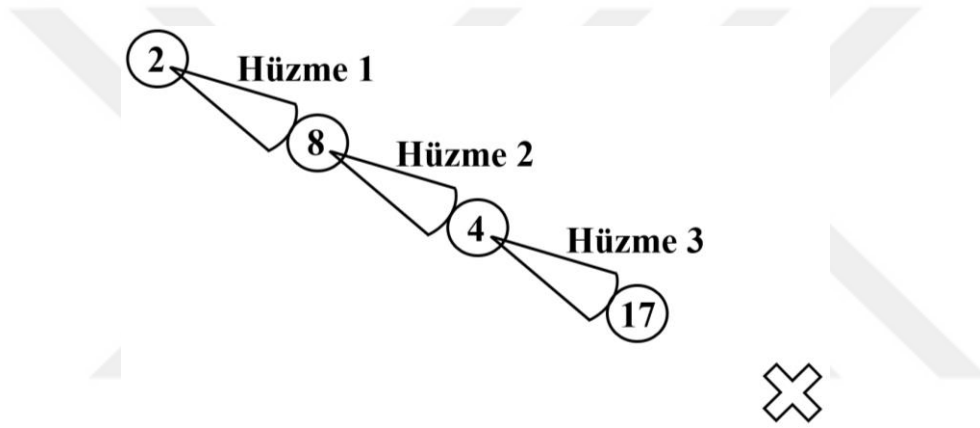
İlk önce (i,j) düğüm çiftlerinden aralarında veri iletişimine izin verilenleri tanımlayan $\dot{I}letim_{i,j}$, veri iletişimi gerçekleşen hüzmeleri temsil eden $Hüzme_{i,j}$, k düğümünde üretilip i düğümünden j düğümüne iletilen verileri temsil eden f_{ij}^k ve k düğümünde üretilen verinin baz istasyonuna iletilmesi için gereken UUG'yi temsil eden UUG^k , algoritmaya girdi olarak verilmektedir. Algoritmanın giriş kısmında, $GZD_{k,i,j,n}$ (Geçici Zaman Dilimleri) ve $ZD_{i,j}$ (Zaman Dilimi) isimli değişkenler tanımlanmaktadır. $GZD_{k,i,j,n}$ değişkenin işlevi, Birinci Adım'da detaylı olarak belirtilmektedir. $ZD_{i,j}$ ise i düğümünden j düğümüne iletimi gerçekleştiren $Hüzme_{i,j}$ 'nin hangi zaman dilimini kullandığını belirtmektedir. Giriş kısmında daha sonra ise $GZD_{k,i,j,n}$ ve $ZD_{i,j}$ 'ye başlangıç değeri olarak 0 atanmaktadır. (Algoritma 2, Satır 2-3)

Algoritma 2 - Birinci Adım: Gecikme miktarına göre zaman dilimi ataması yap

Birinci Adım'da direkt sensöre veri ileten hüzmeler dışındaki hüzmelere ilk zaman ataması tanımlanmaktadır. Bunun için (i,j) komşu düğümleri için $j \in W$ şeklinde bir sınırlama kullanılmıştır. Bu adımda ilk olarak $GZD_{k,i,j,n}$ isimli değişkene değer ataması gerçekleştirilmektedir. Değişkenin tanımına göre üretici düğüm k 'da üretilen verinin, $Hüzme_{i,j}$ ile i düğümünden j düğümüne iletilmesi esnasında üretici düğüm k 'ya kıyasla sahip olunan gecikme miktarı n ile belirtilmektedir. Bu işlem esnasında $n \in X$ indisinin değer aralığının $[1-UUG^{max}]$ olmasının sebebi her bir hüzmelerin gecikme miktarının UUG^{max} ile sınırlanmasıdır. İlgili değer ataması sayesinde eğer herhangi bir k üretici düğümü tarafından üretilen veri, i düğümünden j düğümüne iletiliyorsa ($f_{ij}^k > 0$) ve bu esnada üretici düğüm k 'ya kıyasla gecikme miktarı n oluyorsa ($n \leq UUG^k$ için), $GZD_{k,i,j,n}=1$ şeklinde geçici değeri ataması gerçekleştirilmektedir (Algoritma 2, Satır 5). Öte yandan bu yüzden herhangi bir $Hüzme_{i,j}$, birden fazla zaman dilimine ait

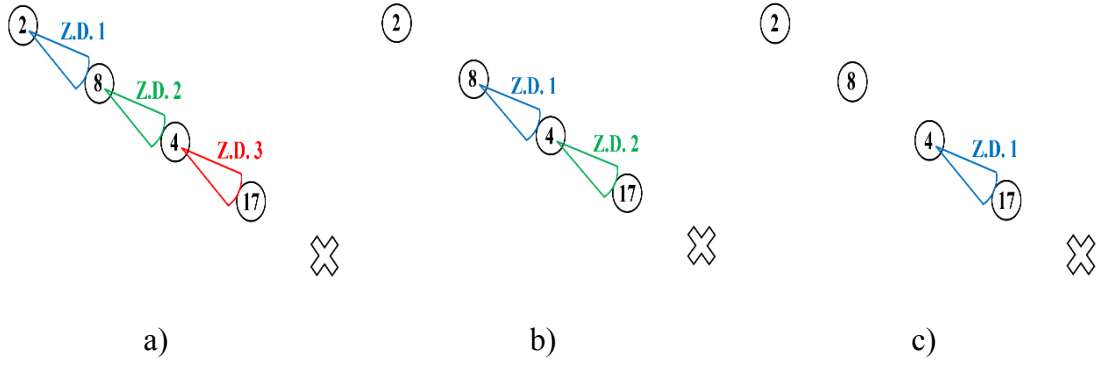
olabilmektedir. İstenmeyen bu durumun üstesinden gelmek için $Hüzme_{i,j}$ 'yi kullanan üretici düğümler arasından düğüm numarası en düşük olan tarafından tahsis edilen zaman diliminin kullanılması ve gerçek zaman dilimi olarak $ZD_{i,j}$ 'ye kaydedilmesi önerilmektedir (Algoritma 2, Satır 6-10).

Birinci Adım'ı örneklemek için Şekil 5.7 ve 5.8'den yararlanılmıştır., Şekil 5.7'de görüleceği üzere, Düğüm 2'nin ilettiği verileri baz istasyonuna iletmek için $Hüzme_{2,4}$, $Hüzme_{8,4}$ ve $Hüzme_{4,17}$ kullanılırken Düğüm 8'in ürettiği veriler için sırasıyla $Hüzme_{8,4}$ ve $Hüzme_{4,17}$, Düğüm 4'ün ürettiği veriler için ise $Hüzme_{4,17}$ kullanılmaktadır. Birinci Adım'da direkt olarak baz istasyonuna iletim yapan hüzmeler incelenmediği için Düğüm 17 ile baz istasyonu arasındaki $Hüzme_{17,1}$ 'e bu görselde yer verilmemiştir.



Şekil 5.7: Direkt Baz İstasyonuna İletim Yapan Hüzmeler Dışındaki Hüzmelerin Görselleştirilmesi

Algoritma 2, Satır 5'te bahsedilen gecikmeye bağlı geçici değeri atamasına göre, $GZD_{k,i,j,n}$ isimli değişkene değer ataması şu şekilde gerçekleşmiştir: Düğüm 2'nin ürettiği verileri taşıyan hüzmeler için $GZD_{2,2,8,1}=1$, $GZD_{2,8,4,2}=1$ ve $GZD_{2,4,17,3}=1$ olurken $GZD_{2,i,j,n}$ 'de geri kalan bütün değerler sıfır olmaktadır. Düğüm 8'in kullandığı hüzmeler için ise $GZD_{8,8,4,1} = 1$ ve $GZD_{8,4,17,2} = 1$ iken $GZD_{8,i,j,n}$ 'de geri kalan bütün değerler sıfır olmaktadır. Son olarak Düğüm 4 için de $GZD_{4,4,17,1} = 1$ iken $GZD_{4,i,j,n}$ 'nin kalan değerleri sıfır olmaktadır.



Şekil 5.8: Birinci Adım'a Göre Geçici Zaman Dilimi Atamasının Görselleştirilmesi: a) Düğüm 2'de Üretilen Veriler İçin, b) Düğüm 8'de Üretilen Veriler İçin, c) Düğüm 4'te Üretilen Veriler İçin

Şekil 5.8'de görüldüğü üzere;

- Düğüm 2, ürettiği veriyi Hüzme 2 ($Hüzme_{8,4}$) ile iletmek için 2. zaman dilimini ($GZD_{2,8,4,2} = 1$) kullanmak isterken Düğüm 8 ise ürettiği veriyi aynı hüzme ile iletmek için 1. zaman dilimini kullanmak istemektedir ($GZD_{8,8,4,1} = 1$).
- Düğüm 2, ürettiği veriyi Hüzme 3 ($Hüzme_{4,17}$) ile iletmek için 3. zaman dilimini ($GZD_{2,4,17,3} = 1$) kullanmak isterken Düğüm 8 ise ürettiği veriyi aynı hüzme ile iletmek için 2. zaman dilimini kullanmak istemektedir ($GZD_{8,4,17,2} = 1$). Ayrıca Düğüm 4 de verisini iletmek için 1. zaman dilimini kullanmak istemektedir ($GZD_{4,4,17,1} = 1$).

Öte yandan bahsedildiği üzere her bir hüzme için sadece tek bir zaman diliminin kullanılması beklenilmektedir. Algoritma 2, Satır 6-10 arasında yer alan algoritmaya göre $Hüzme_{8,4}$ ve $Hüzme_{4,17}$ 'yi kullanan en düşük düğüm numaralı üretici, Düğüm 2 olmaktadır. Bu sayede ilgili hüzmelerin kullanacağı zaman dilimleri, $ZD_{8,4} = 2$ ve $ZD_{4,17} = 3$ olarak belirlenmektedir. Buna ek olarak, $Hüzme_{2,8}$ sadece Düğüm 2 tarafından kullanıldığı için $ZD_{2,8} = 1$ olarak zaman değeri atanmaktadır.

Algoritma 2 - İkinci Adım: Hüzmelerin Kural 1 ve Kural 2'ye uymasını sağlayarak zaman dilimi güncellemesi yap (Direkt baz istasyonuna iletim yapanlar dışında)

Bu adımda $\dot{I}AZ_{i,j,m}$ (İletilen ve Alınanların Zamanları) isimli yeni değişken, ilk kez kullanılmaktadır. Bu değişken sayesinde (i,j) komşu düğümleri için veri iletimi/alımı amacıyla kullanılan bütün hüzmeler arasında zaman dilimi m 'nin toplam kaç kere kullanıldığı belirtilmektedir. Örnek olarak Şekil 5.9-a'da (3,6) düğüm çifti ele alındığında, hangi zaman diliminin hangi düğümler arasındaki hüzmelerde kullanıldığı Çizelge 5.1'de belirtilmektedir. Bu çizelgede görüldüğü üzere 1. zaman dilimi 1 kere kullanılırken 2., 4. ve 5. zaman dilimleri ikişer kere kullanılmaktadır. Dolayısıyla $\dot{I}AZ_{3,6,1} = 1$, $\dot{I}AZ_{3,6,2} = 2$, $\dot{I}AZ_{3,6,4} = 2$ ve $\dot{I}AZ_{3,6,5} = 2$ iken $m \notin \{1,2,4,5\}$ için $\dot{I}AZ_{3,6,m} = 0$ olmaktadır.

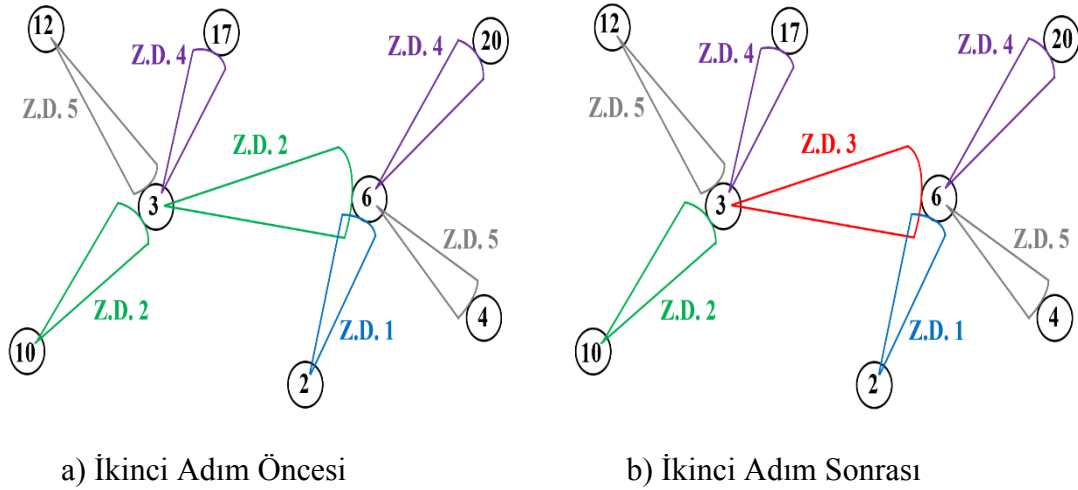
Çizelge 5.1: (3,6) Düğüm Çifti İçin İletilen ve Alınan Hüzmelerin Zaman Dilimleri

Kullanılan Zaman Dilimleri	İlgili zaman diliminin, hangi düğümler arasındaki hüzmelerde kullanıldığı	İlgili zaman diliminin kullanıldığı farklı hüzmeye sayısı
Z.D. 1	(2,6)	1
Z.D. 2	(3,6), (10,3)	2
Z.D. 4	(3,17), (6,20)	2
Z.D. 5	(12,3), (6,4)	2

İkinci Adım'da da yine birinci adımdaki gibi direkt baz istasyonuna iletim yapan hüzmeler önemsenmediği için (i,j) komşu düğümlerinde $j \in W$ şeklinde bir sınırlama kullanılmıştır. Bu adım sayesinde bahsedilen bütün hüzmelerin Kural 1 ve 2'ye uyum sağlanması amaçlanmıştır. İlk olarak $\dot{I}AZ_{i,j,m}$ isimli yeni değişkene, uygun değerler atanmaktadır. (Algoritma 2, Satır 12). Devamında belirtilen döngüde ise i düğümünden j düğüme iletim yapan hüzmelerin kullandığı zaman diliminin ($ZD_{i,j}$), (i,j) düğüm çifti için veri iletimi/alımı yapan bütün hüzmelerin kullandığı zaman dilimleri arasında sadece 1 kez kullanılabilmesi ($\dot{I}AZ_{i,j,ZD_{i,j}}=1$) sağlanmaktadır.

(Algoritma 2, Satır 13-23). Bu döngüde $m = ZD(i,j)$ için $\dot{I}AZ_{i,j,m}$ 'nin, 1'den büyük olup olmadığına bakılmaktadır. Bu sayede (i,j) düğümleri arasındaki hüzmelerin zaman diliminin bu düğüm çiftine giren/çıkan hüzmeler arasında başka bir hüzmeye kullanılıp kullanılmadığı görülmektedir. Eğer ilgili zaman dilimi başka bir hüzmeye de kullanılıyorsa, $\dot{I}AZ_{i,j,m} = 0$ eşitliğini sağlayan ilk zaman dilimi m bulunarak $ZD_{i,j}$ 'de güncelleme yapılmaktadır (Algoritma 2, Satır 17). Bu işlem sayesinde ilgili hüzmelerin Kural 1 ve Kural 2'ye uyması sağlanmaktadır. İlgili işlem aynı zamanda başka düğüm çiftlerinin de iletim/alım amacıyla kullandığı hüzmelerin zaman dilimlerinde değişiklik yapmaktadır. Bu yüzden $\forall i, \forall j \in W$ ve $\forall m \in Y$ için $\dot{I}AZ_{i,j,m}$ güncellenmektedir (Algoritma 2, Satır 18).

İkinci Adım'a örnek olarak Şekil 5.9-a'daki (3,6) komşu düğümlerini ele aldığımızda, $Hüzme_{3,6}$ 'nın 2. zaman dilimini kullandığı görülmektedir ($ZD_{3,6} = 2$). Öte yandan (3,6) düğüm çifti için veri iletimi/alımı yapan bütün hüzmelerin kullandığı zaman dilimlerine bakıldığında, $\dot{I}AZ_{3,6,1} = 1$, $\dot{I}AZ_{3,6,2} = 2$, $\dot{I}AZ_{3,6,3} = 0$, $\dot{I}AZ_{3,6,4} = 2$ ve $\dot{I}AZ_{3,6,5} = 2$ olduğu görülmektedir. Dolayısıyla $Hüzme_{3,6}$ için kullanılan zaman dilimi, (3,6) düğüm çiftine iletim/alım yapan başka bir hüzmeye ($Hüzme_{10,3}$) daha kullanılmaktadır ($\dot{I}AZ_{3,6,ZD_{3,6}} = \dot{I}AZ_{3,6,2} = 2 > 1$). Burada, $Hüzme_{10,3}$ ve $Hüzme_{3,6}$ ile art arda iki hüzmeye aynı zaman dilimini kullanıldığı için Kural 2 sağlanmamaktadır. Bunun üstesinden gelmek için Algoritma 2-İkinci Adım'daki Satır 13-23 arasında yer alan döngü kullanıldığında (3,6) komşu düğümlerinde veri iletimi/alımı için zaman dilimi 1, 2, 4 ve 5'in halihazırda kullanılırken zaman dilimi 3'ün henüz kullanılmadığı görülmektedir ($\dot{I}AZ_{3,6,3} = 0$). İlgili döngü sayesinde $Hüzme_{3,6}$ 'ün kullanacağı yeni zaman dilimi için, uygun olan ilk zaman dilimi olan, zaman dilimi 3 atanmaktadır. Buna göre (3,6) komşu düğümlerinde veri iletimi/alımı için kullanılan hüzmelerin yeni zaman dilimleri Şekil 5.9-b'de görülmektedir.



Şekil 5.9: İkinci Adım'ın Görselleştirilmesi

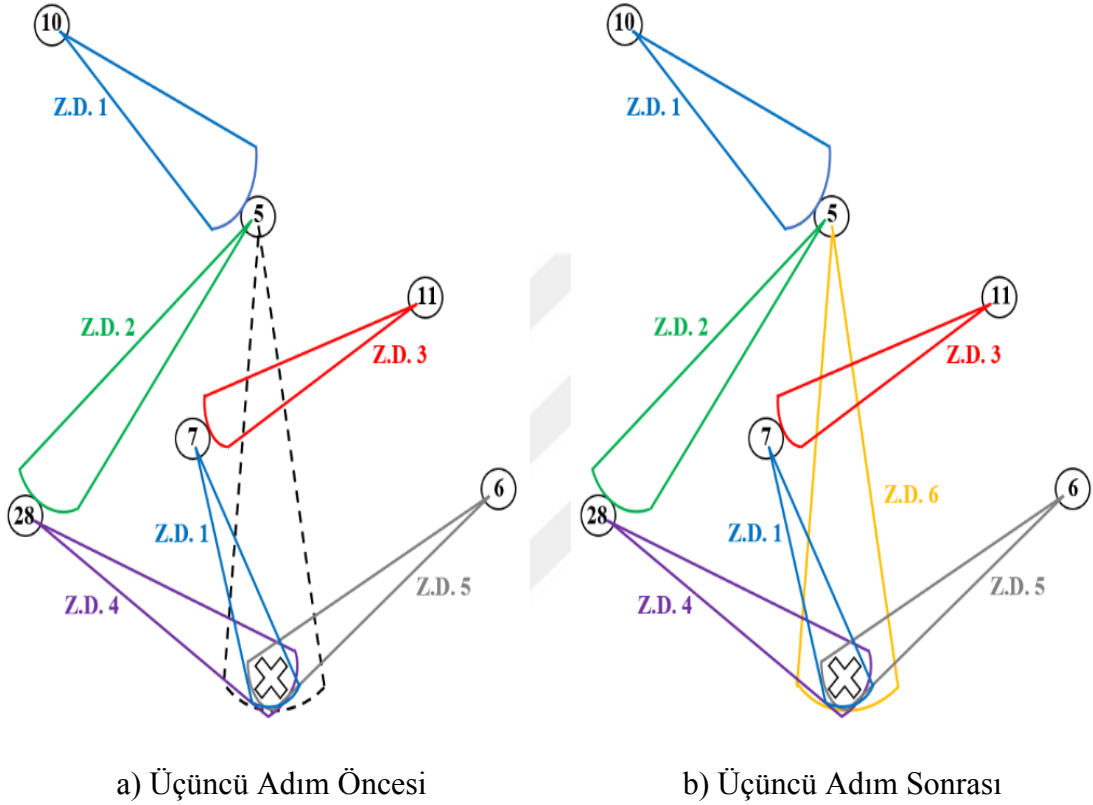
Algoritma 2 - Üçüncü Adım: Hüzmelerin Kural 1, 2 ve 3'ü sağlaması için gerekli zaman dilimi atamasını yap (Direkt baz istasyonuna iletim yapanlar için)

Bu adımda $KZ_{i,j,m}$ (Kesişenlerin Zamanları) isimli yeni değişken, ilk kez kullanılmaktadır. Bu değişken sayesinde i düğümünden j düğümüne iletimi sağlayan $Hüzme_{i,j}$ 'yi kesen diğer hüzmeler arasında Zaman Dilimi m 'nin toplam kaç kere kullanıldığı belirtilmektedir. Örnek olarak Şekil 5.10-a'da, Düğüm 5'ten baz istasyonuna iletim yapan $Hüzme_{5,1}$ 'i, sadece $Hüzme_{11,7}$ kesmektedir. Burada $Hüzme_{11,7}$, 3. zaman dilimini kullandığı için $KZ_{5,1,3} = 1$ iken $m \neq 3$ için $KZ_{5,1,m} = 0$ olmaktadır.

Üçüncü Adım'da, direkt baz istasyonuna iletim yapan hüzmelere zaman dilimi tanımlandığı için (i,j) komşu düğümlerinde $j = 1$ şeklinde bir sınırlama kullanılmıştır. İlk olarak $KZ_{i,j,m}$ isimli yeni değişkene değer atanmaktadır (Algoritma 2, Satır 25). Direkt baz istasyonuna iletim yapan hüzmelere atanan zaman dilimlerinde bu algoritma esnasında bir daha değişiklik yapılmayacağı için hüzmelerin Kural 1 ve Kural 2'ye ek olarak Kural 3'e de uyması amaçlanmaktadır. Buna göre $Hüzme_{i,j}$ için $KZ_{i,j,m} = 0$ ve $\dot{I}AZ_{i,j,m} = 0$ eşitliklerini sağlayacak ilk zaman Dilimi m belirlendikten sonra $ZD_{i,j}$ 'de saklanmaktadır (Algoritma 2, Satır 26-35). İlgili işlem sonrasında, İkinci Adım'a benzer şekilde, $\forall i \in W, j = 1$ ve $\forall m \in Y$ için hem $KZ_{i,j,m}$ hem de $\dot{I}AZ_{i,j,m}$ 'de güncellenme yapılması gerekmektedir.

Üçüncü Adım'a örnek olarak Şekil 5.10-a'da, Düğüm 5'in verisini baz istasyonuna iletmesi için gerekli zaman dilimi atanırken $(5,1)$ komşu düğümlerinde iletim ve alım

için kullanılan bütün zaman dilimleri ($\dot{I}AZ_{5,1,m} \forall m \in Y$) ve $Hüzme_{5,1}$ 'i kesen bütün hüzmelerin zaman dilimleri ($KZ_{5,1,m} \forall m \in Y$) incelenmektedir. Buna göre $\dot{I}AZ_{5,1,1}$, $\dot{I}AZ_{5,1,2}$, $\dot{I}AZ_{5,1,4}$ ve $\dot{I}AZ_{5,1,5}$ değerleri sıfırdan büyük olmaktadır. Öte yandan $Hüzme_{5,1}$ 'i kesen $Hüzme_{11,7}$ bu esnada 3. zaman dilimini kullandığı için $KZ_{5,1,3} > 0$ olmaktadır. Sonuç olarak $\dot{I}AZ_{5,1,m} = 0$ ve $KZ_{5,1,m} = 0$ eşitliklerini sağlayan ilk zaman diliminin $m = 6$ olduğu görülmektedir. İlgili durum Şekil 5.10-b'de detaylı olarak görülmektedir.



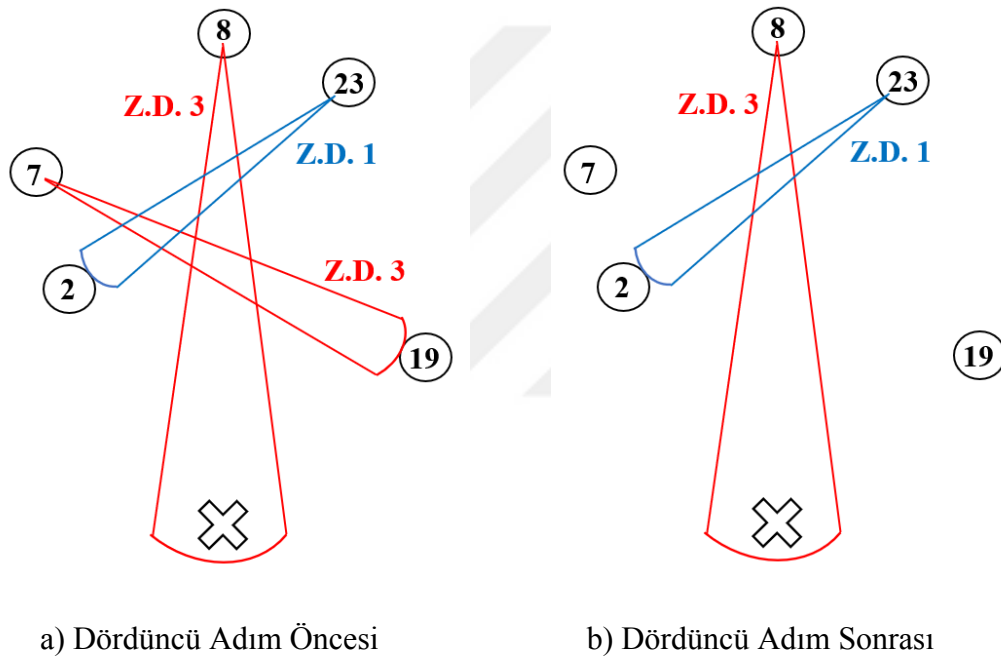
Şekil 5.10: Üçüncü Adım'ın Görselleştirilmesi

Algoritma 2 - Dördüncü Adım: Girişim istikametindeki bağlantılarda haberleşmeyi sonlandır (Direkt baz istasyonuna iletimi sağlayanlar dışında)

Bu adım özelinde direkt baz istasyonuna iletim yapan hüzmeler önemsenmediği için (i,j) komşu düğümlerinde $j \in W$ şeklinde sınırlama kullanılmıştır. Bu adım sayesinde herhangi bir $Hüzme_{i,j}$ 'yi kesen hüzmeler arasında zaman dilimi olarak $ZD_{i,j}$ 'yi kullanan başka bir hüzmeye varsa (girişim uygulanmışsa), $\dot{I}etim_{i,j} = 0$ 'a ve $ZD_{i,j} = 0$ 'a eşitlenmektedir. Bu sayede bundan sonra $Hüzme_{i,j}$ istikametinde $(i$ düğümünden j düğümüne) veri iletimi engellenmektedir (Algoritma 2, Satır 37-43). İlgili işlem

sonucunda, önceki adımlarla benzer şekilde, $\forall i \in W, \forall j \in V$ ve $\forall m \in Y$ için $KZ_{i,j,m}$ 'de güncellenme yapılması gerekmektedir (Algoritma 2, Satır 41).

Dördüncü Adım'a örnek olarak Şekil 5.11-a'da $Hüzme_{7,19}$ ile iletilen veri akışı, 3. zaman diliminde gerçekleşmektedir. Bu hüzmeyi kesen hüzmelerden $Hüzme_{8,1}$ de aynı zaman dilimini kullandığı için ($KZ_{7,19,3} > 0$) girişim meydana gelmektedir. Algoritma 2, Satır 37-43 arası döngüye göre direkt olarak baz istasyonuna veri iletmeyen $Hüzme_{7,19}$ 'un görevine son verilmekte ve bu nedenle $ZD_{7,19} = 0$ olmaktadır. Aynı zamanda $\dot{I}etim_{7,19} = 0$ atanarak bir daha Düğüm 7'den Düğüm 19'a veri akışının oluşması da engellenmektedir. Bunun sonucunda elde edilen durum Şekil 5.11-b'de görülmektedir.



Şekil 5.11: Dördüncü Adım'ın Görselleştirilmesi

Algoritma 2 - Çıktı:

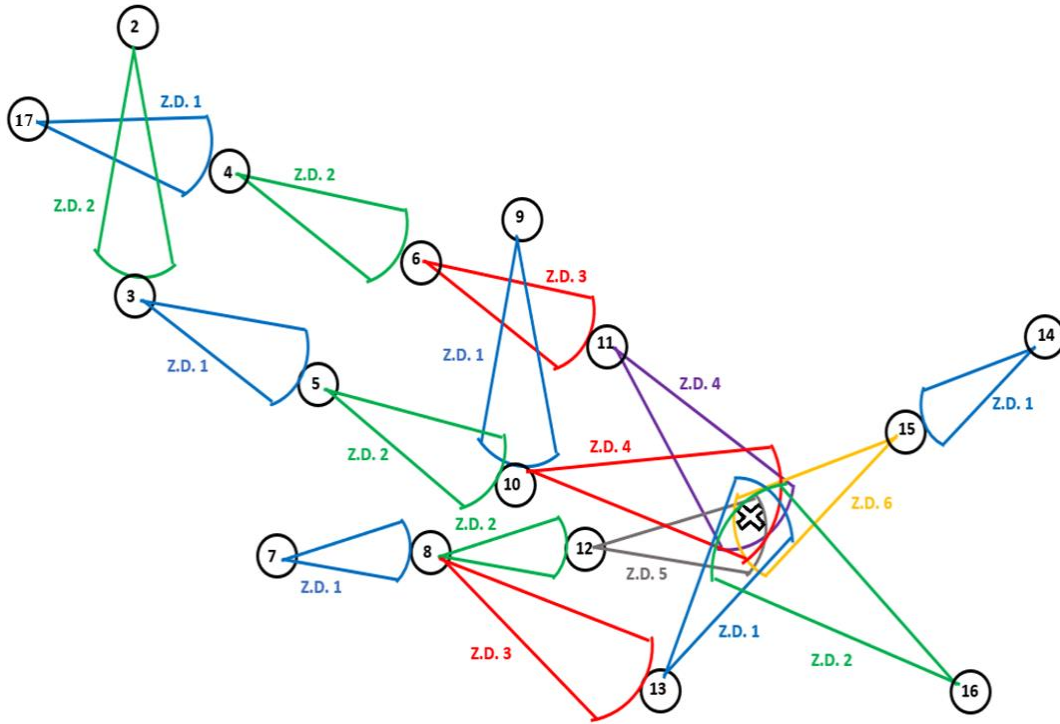
İlgili algoritmanın sonunda $\dot{I}etim_{i,j}$ ve $ZD_{i,j}$ değişkeni çıktı olarak sunulmaktadır. Bu sayede eğer algoritma esnasında girişim tespit edilmişse ($\dot{I}etim_{i,j}$ 'de değişiklik yapılmışsa) optimizasyon ile farklı hüzmeler oluşturmak için $\dot{I}etim_{i,j}$ 'den yararlanılmaktadır. Öte yandan eğer girişim tespit edilmediyse $ZD_{i,j}$ 'deki farklı zaman dilimi sayısından yararlanılarak Bölüm 5.2.11'deki gibi TGS hesaplanmaktadır.

Algoritma 2: GEM Algoritması

```
1: Girdi:  $\dot{I}letim_{i,j}$ ,  $Hüzme_{i,j}$ ,  $f_{ij}^k$ ,  $UUG^k$ 
2: Başlangıç Değeri Ata:  $GZD_{k,i,j,n} = 0, \forall k, \forall i \in W, \forall j \in V, \forall n \in X$ 
3: Başlangıç Değeri Ata:  $ZD_{i,j} = 0, \forall i \in W, \forall j \in V$ 
4: Birinci Adım: Gecikme miktarına göre zaman dilimi ataması yap
5: Değer Ata:  $GZD_{k,i,j,n} = 1$ , eğer  $f_{ij}^k > 0$  &  $n \leq UUG^k \forall k, \forall i, \forall j \in W, \forall n \in X$ 
6: for  $k^* = 2$  to  $DS$  do
7:   if  $GZD_{k,i,j,n} > 0$  &  $ZD_{i,j} = 0, k = k^*, \forall i, \forall j \in W, \forall n \in X$  then
8:     Güncelle:  $ZD_{i,j} = n$ 
9:   end if
10: end for
11: İkinci Adım: Hüzmelerin Kural 1 ve Kural 2'ye uymasını sağlayarak zaman dilimi güncellemesi yap
    (Direkt baz istasyonuna iletim yapanlar dışında)
12: Başlangıç Değeri Ata: KSA'daki komşu (i,j) düğümlerine giren ve çıkan hüzmeler içinde Zaman
    Dilimi m'nin toplam kaç kere kullanıldığını  $\dot{I}AZ_{i,j,m}$ 'e ata. ( $\forall i \in W, \forall j \in V, \forall m \in Y$ )
13: for  $Hüzme_{i,j} \neq 0, \forall i, \forall j \in W, \forall m \in Y$  do
14:   if  $m = ZD_{i,j}$  &  $\dot{I}AZ_{i,j,m} > 1$  then
15:     for  $m^* = 1$  to  $HS$  do
16:       if  $m = m^*$  &  $\dot{I}AZ_{i,j,m} = 0$  then
17:         Güncelle:  $ZD_{i,j} = m^*$ 
18:         Güncelle:  $\dot{I}AZ_{i,j,m}, \forall i \in W, \forall j \in V, \forall m \in Y$ 
19:         break
20:       end if
21:     end for
22:   end if
23: end for
24: Üçüncü Adım: Hüzmelerin Kural 1, 2 ve 3'ü sağlaması için gerekli zaman dilimi atamasını yap
    (Direkt baz istasyonuna iletim yapanlar için)
25: Başlangıç Değeri Ata:  $Hüzme_{i,j}$ 'yi kesen hüzmeler arasında Zaman Dilimi m'nin toplam kaç kere
    kullanıldığını  $KZ_{i,j,m}$ 'ye kaydet,  $\forall i \in W, \forall j \in V, \forall m \in Y$ 
26: for  $Hüzme_{i,j} \neq 0, \forall i \in W, j = 1, \forall m \in Y$  do
27:   for  $m^* = 1$  to  $HS$  do
28:     if  $m = m^*$  &  $KZ_{i,j,m} = 0$  &  $TZ_{i,j,m} = 0$  then
29:       Güncelle:  $ZD_{i,j} = m^*$ 
30:       Güncelle:  $\dot{I}AZ_{i,j,m}, \forall i \in W, \forall j \in V, \forall m \in Y$ 
31:       Güncelle:  $KZ_{i,j,m}, \forall i \in W, \forall j \in V, \forall m \in Y$ 
32:       break
33:     end if
34:   end for
35: end for
36: Dördüncü Adım: Girişim istikametindeki bağlantılarda haberleşmeyi sonlandır (Direkt baz
    istasyonuna iletimi sağlayanlar dışında)
37: for  $Hüzme_{i,j} \neq 0, \forall i, \forall j \in W, \forall m \in Y$  do
38:   if  $m = ZD_{i,j}$  &  $KZ_{i,j,m} > 0$  then
39:     Güncelle:  $\dot{I}letim_{i,j} = 0$ 
40:     Güncelle:  $ZD_{i,j} = 0$ 
41:     Güncelle:  $KZ_{i,j,m}, \forall i \in W, \forall j \in V, \forall m \in Y$ 
42:   end if
43: end for
44: Çıktı:  $\dot{I}letim_{i,j}$ ,  $ZD_{i,j}$ 
```

5.2.10.7 GEM için örnek

Şekil 5.1’de gösterilen 4 UUG kısıtlı senaryonun TDMA yerine GEM yöntemi uygulanmış hali Şekil 5.12’de görülmektedir. Burada hüzmeler için kullanılan her bir renk farklı bir zaman dilimini temsil etmektedir. İlgili durumda yine TDMA’deki gibi sensörler, verilerini 1, 2, 3, ya da 4 UUG ile baz istasyonuna iletmektedirler.



Şekil 5.12: GEM Algoritması Uygulanan Senaryo İçin Zaman Dilimi Ataması

Burada, Şekil 5.12’den yararlanılarak hangi düğüm çiftleri arasında hangi zaman diliminin kullanıldığı belirtilmesi için, Şekil 5.2’yle benzer gösterim şekline sahip, Şekil 5.13’ten yararlanılmaktadır.

Z.D. 1	Z.D. 2	Z.D. 3	Z.D. 4	Z.D. 5	Z.D. 6
(17,4)	(2,3)	(6,11)	(11,1)	(12,1)	(15,1)
(3,5)	(4,6)	(8,13)			
(9,10)	(5,10)	(10,1)			
(7,8)	(8,12)				
(14,15)	(16,1)				
(13,1)					

Şekil 5.13: GEM Yöntemindeki Farklı Zaman Dilimlerinin Kullanıldığı Hüzmeler

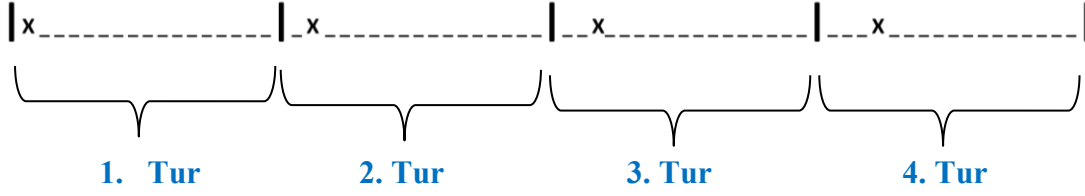
Şekil 5.13'te görüldüğü üzere bazı zaman dilimleri, birden fazla hüzmeye kullanılabilir. Bu sayede, TDMA'ya kıyasla aynı zaman diliminde birden fazla veri akışının gerçekleştirilebildiği görülmektedir. Örnek olarak 1. zaman dilimi, (17,4), (3,5), (9,10), (7,8), (14,15) ve (13,1) düğüm çiftleri arasındaki hüzmelerde kullanılabilir. Öte yandan 1. zaman dilimi, Şekil 5.2'de sadece (17,4) düğüm çifti arasındaki hüzmeye tarafından kullanılabilir. Sonuç olarak, KSA'daki bütün kaynak düğümlerde üretilen verilerin baz istasyonuna iletilmesi için TDMA ile 17 farklı zaman dilimine ihtiyaç duyulurken GEM'de ise sadece 6 farklı zaman dilimi yeterli olmaktadır.

5.2.11 Toplam Geçen Süre (TGS)

KSA'daki bütün düğümlerde üretilen verilerin girişim olmadan baz istasyonuna iletilmesi için gereken süre, Toplam Geçen Süre (TGS) olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla TGS hesaplanırken kendi ürettiği verileri baz istasyonuna en fazla UUG (UUG^{max}) ile ileten sensörler baz alınmaktadır. Bunun sonucunda Eşitlik (5.1)'e göre, UUG^{max} ve sensör ağına girişimin olmaması için kullanılan farklı zaman dilimleri göz önüne alınarak TGS hesaplanmaktadır. Kullanılan farklı zaman dilimleri, TDMA'lı senaryo için toplam hüzmeye sayısına eşit iken GEM'li senaryoda ise Şekil 5.6'daki akış şemasının çıktısındaki $ZD_{i,j}$ 'de yer alan farklı zaman dilimi sayısına göre belirlenmektedir.

$$TGS = UUG^{max} \times \text{Kullanılan Farklı Zaman Dilimi} \quad (5.1)$$

Örnek olarak TDMA uygulanan Şekil 5.1'deki senaryoda 4 UUG kısıtı uygulanırken sensörler verilerini baz istasyonuna iletebilmek için 1, 2, 3 ya da 4 UUG kullanmayı tercih etmektedir. Dolayısıyla TGS hesaplanırken 4 UUG'ye sahip durum baz alınmalıdır. Bütün hüzmeler üzerinden farklı bir zaman diliminde veri iletimi yapıldığı göz önüne alınırsa, verilerini 4 UUG ile ileten 17 numaralı sensörün ihtiyacı olan TGS, Şekil 5.14'e göre belirlenmektedir.



Şekil 5.14: Şekil 5.1’deki Senaryoda Düğüm 17’nin Veri İletimi

Burada iletilen verinin kaynak düğüme kıyasla sahip olduğu UUG miktarına bağlı olarak yeni bir turun kullanılması gerekmektedir. Görüldüğü üzere 17 numaralı sensör verilerini 4 numaralı sensöre iletirken 1. turdaki 1. zaman dilimini kullanmaktadır. Aynı verinin iletimine devam edilirken girişimden etkilenilmemesi için bu tur içerisinde yer alan kalan zaman dilimleri süresince ilgili verinin iletimine ara verilerek 2. tur beklenilmektedir. Yeni turda ise aynı verinin iletimine, kullandığı yeni zaman diliminde devam edilmektedir. 2 numaralı sensörde üretilen verinin, Şekil 5.14’e göre, 4 numaralı sensörden 6 numaralı sensöre iletilmesi esnasında (2. atlama esnasında) 2. turdaki 2. zaman dilimi tercih edilmektedir. Yine benzer şekilde, aynı verinin 6 numaralı sensörden 11 numaralı sensöre iletilmesi esnasında 3. turdaki 3. zaman dilimi kullanılmakta ve son olarak da 11 numaralı sensörden baz istasyonuna veri iletimi yapılabilmesi için 4. turdaki 4. zaman dilimi kullanılmaktadır. Dolayısıyla KSA’daki bütün sensörlerde üretilen verilerin girişimsiz haberleşebilmesi için TGS’nin minimum $4 \times 17 = 68$ birim olması gerekmektedir.

Öte yandan GEM kullanılan Şekil 5.12’de, UUG miktarı ve hüzme sayısı sabit kalsa dahi aynı zaman diliminde daha fazla veri iletimine imkân sağlandığı için TGS’de azalış görülmektedir. Bu sayede, Şekil 5.12’de görüleceği üzere veri iletimi için TDMA’de kullanılan 17 farklı zaman diliminin aksine GEM ile sadece 6 farklı zaman dilimi kullanılmaktadır. Bu sayede ilgili durumda bütün verilerin iletilmesi esnasında TGS, $4 \times 6 = 24$ birim olmaktadır.

5.2.12 Yaşam süresi

Bundan önceki kısımlarda girişim göz ardı edildiğinden üretilen bit sayısı yaşam süresiyle orantılı (yaşam süresine eşit) olmaktadır. Bu bölümde ise girişim de göz önüne alınarak yaşam süresi Eşitlik (5.2)’deki gibi hesaplanmaktadır. GEM uygulanan senaryolarda üretilen bit sayısı, en güncel optimizasyon sonucu elde edilen sonuca göre belirlenmektedir. İncelenen bütün senaryolar arasında hesaplanan en yüksek

TGS, *Maksimum TGS* ile belirtilirken seçilen senaryo esnasında hesaplanan TGS de *Seçilen TGS* ile belirtilmektedir. Bu bölüm özelinde bütün senaryolar için yaşam süreleri hesaplandıktan sonra sonuçlar, en büyük sonuca göre normalize edilmektedir. Bu sayede en yüksek yaşam süresinin olduğu senaryonun yaşam süresi 1 olarak alınırken diğer senaryoların yaşam süreleri ise en yüksek yaşam süresiyle orantılı olarak [0-1] aralığında değer almaktadır.

$$Yaşam\ Süresi \propto \frac{\text{Üretilen bit sayısı}}{\frac{\text{Maksimum TGS}}{\text{Seçilen TGS}}} \quad (5.2)$$

5.2.13 Veri hızı

Bu bölüm özelinde veri hızı hesabı Eşitlik 5.3'teki gibi yapılmaktadır. Yine yaşam süresi süresindeki gibi bütün senaryolar için veri hızları hesaplandıktan sonra en büyük sonuca göre [0-1] aralığında normalize edilmektedir.

$$Veri\ hızı = \frac{\text{Üretilen bit sayısı}}{Yaşam\ Süresi} \quad (5.3)$$

5.3 Sonuçlar

2 UUG'li TDMA ve GEM ile 4 UUG'li TDMA ve 4 GEM kullanılarak hesaplanan normalize edilmiş üretilen bit sayıları ve KSA'daki bütün sensörlerin verilerini girişim olmadan baz istasyonuna iletebilmesi için harcanan TGS, Çizelge 5.2'de görülmektedir. Belirtilen çizelgede en yüksek TGS'ye sahip senaryonun 4 UUG'li TDMA olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu çizelge *Maksimum TGS* 149.6 olmaktadır.

Çizelge 5.2: Normalize Edilmiş Üretilen Bit Sayısı ve TGS Değerleri

	Normalize Edilmiş Üretilen Bit Sayısı	Toplam Geçen Süre (TGS)
2 UUG'li GEM	0.598	29.2
2 UUG'li TDMA	0.777	67.2
4 UUG'li GEM	0.993	52.8
4 UUG'li TDMA	1	149.6

Çizelgede görülmektedir ki, sensörlerin verilerini 10^{-9} 'luk bit hata oranıyla iletebilmesi için gerekli minimum UUG kısıtı (2'li UUG) kullanılırken TDMA uygulandığında ihtiyaç duyulan ortalama TGS 67.2 birim olurken GEM uygulandığında ihtiyaç duyulan ortalama TGS ise 29.2 birim olmaktadır. Buna ek olarak 4 UUG'li TDMA ve GEM uygulandığı zaman gereken ortalama TGS sırasıyla 149.6 ve 52.8 birim olmaktadır. Bu sayede aynı UUG kısıtı uygulandığı zaman GEM'in, TGS'den büyük oranda tasarruf ettiği görülmektedir. Buna ek olarak 4 UUG'li GEM ve 2 UUG'li TDMA karşılaştırıldığında, GEM'li durumda UUG kısıtının gevşek olmasına rağmen yine de daha az TGS'ye ihtiyaç duyulduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla GEM'in kullanıldığı iki senaryoda da 10^{-9} hata oranıyla iletim yapılabilmesi için TDMA'nin ihtiyacı olan minimum TGS'den (67.2) daha az TGS'ye ihtiyaç duyulduğu gözlenmiştir. Ayrıca, 4 UUG'li GEM için gerekli TGS'nin, 2 UUG'li TDMA kullanan senaryoya göre %27.2 daha az olmasına rağmen üretilen bit sayısının %27.8 daha fazla olduğu görülmektedir. Kullanılan yöntemden bağımsız olarak elde edilen bir diğer sonuç ise UUG kısıtını sıklaştırmanın TGS'yi büyük oranda azaltmasıdır.

2 UUG'li durumlar karşılaştırıldığında, GEM kullanılan senaryonun TDMA'li senaryoya göre % 29.9 daha az bit üretimini sağladığı görülmüştür. Öte yandan 4 UUG'li senaryolar karşılaştırıldığında TDMA'li senaryoda üretilen bit sayısı sadece %0.7 daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi 2 UUG kısıtı uygulandığında sensörlerin 10^{-9} hata oranına ulaşabilmesi için daha kısıtlı imkanlara sahip olmasıdır. Dolayısıyla 2 UUG'li GEM kullanılırken iptal edilen iletim opsiyonlarının üretilen bit sayısına etkisi daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte 4 UUG kısıtı kullanıldığında bu hata oranını sağlayan çok daha fazla kombinasyon olduğundan GEM ile iptal edilen opsiyonların üretilen bit sayısına etkisi çok daha az olmaktadır.

Dolayısıyla üretilen bit sayısının öncelik olduğu durumlarda, 4 UUG'li TDMA ile GEM arasında büyük bir fark olmamasına rağmen GEM için ihtiyaç duyulan TGS'nin neredeyse üçte birine inmesi bizim için belirleyici faktör olmaktadır. Öte yandan üretilen bit sayısından bağımsız olarak haberleşme için minimum TGS'ye sahip olmak istenildiğinde 2 UUG'li GEM en uygun opsiyon olmaktadır.

Eşitlik (5.2) ve (5.3) kullanılarak farklı durumlara göre hesaplanan normalize edilmiş yaşam süreleri ve normalize edilmiş veri hızları, Çizelge 5.3'te görülmektedir. Belirtilen senaryolar arasında en yüksek yaşam süresi, 4 UUG'li TDMA'li senaryoya

ait olduğu için ilgili senaryonun yaşam süresi 1 olmaktadırken diğer senaryoların yaşam süreleri de 4 UUG’li TDMA’in yaşam süresiyle orantılı olarak [0-1] aralığında değer almaktadır. Örnek olarak 2 UUG’li GEM uygulanan senaryo ele alındığında yaşam süresi, $\frac{0.598}{\frac{149.6}{29.2}}$ ile orantılı olarak hesaplanmaktadır. Buna ek olarak, en yüksek veri hızınının 2 UUG’li GEM’e ait olduğu görülmektedir. Bu yüzden ilgili senaryonun veri hızı 1 olarak alınırken diğer senaryoların veri hızları da 2 UUG’li GEM’in veri hızıyla orantılı olarak [0-1] aralığında hesaplanmaktadır.

Çizelge 5.3: Normalize Edilmiş Veri Hızı ve Yaşam Süresi Değerleri

	Normalize Edilmiş Veri Hızı	Normalize Edilmiş Yaşam Süresi
2 UUG’li GEM	1	0.117
2 UUG’li TDMA	0.435	0.349
4 UUG’li GEM	0.553	0.350
4 UUG’li TDMA	0.195	1

Çizelge 5.3’teki sonuçlara genel olarak bakıldığında GEM’in veri hızını, TDMA’e göre büyük oranda artırdığı görülmektedir. Bunun sebebi GEM’in, girişimi engellerken aynı anda daha fazla veri akışına olanak sağladığı için gereken TGS’yi azaltmasıdır. Çizelgeye daha detaylı bakıldığında, 2 UUG’li GEM’de haberleşmenin diğer senaryolara göre çok daha düşük TGS’ye ihtiyaç duyması sayesinde veri hızı diğerlerinden çok daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte ilgili senaryoda hem üretilen bit sayısının daha az olması hem de veri hızının çok daha fazla olması nedeniyle KSA’nın yaşam süresi diğerlerinden çok daha az olmaktadır. Öte yandan 2 UUG’li TDMA ve 4 UUG’li GEM’in kullanıldığı senaryolar karşılaştırıldığında, normalize edilmiş yaşam süreleri birbirine neredeyse eşit olmakla birlikte 4 UUG’li GEM’in veri hızınının %27.1 kadar daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sayede 4 UUG’li GEM’in, 2 UUG’li TDMA’e göre, iki parametre de göz önüne alındığında, daha uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılmaktadır. Bununla birlikte 4 UUG’li TDMA’in

uygulandığı senaryonun yaşam süresi diğerlerinden çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi 4UUG’li TDMA uygulandığında, girişimi engellemek için her bir veri akışından sonra uzun süreler beklenilmesinin gerekmesidir. Bu sayede yaşam süresi diğer durumlardan daha fazla olmakta fakat KSA’daki bütün verilerin baz istasyonuna iletilmesi son derece uzun zaman aldığından, veri hızı büyük miktarda düşmektedir. Son olarak, bütün yöntemler için UUG kısıtını sıkılaştırmanın veri hızını büyük oranda artırdığı görülmektedir.

Sonuç olarak, veri hızının bir numaralı öncelik olduğu senaryolarda 2 UUG’li GEM bizim için en uygun opsiyon olmaktadır. Buna ek olarak yüksek veri hızının önemsenmediği durumlarda yaşam süresinin daha fazla olması sebebiyle 4 UUG’li TDMA en avantajlı durum olmaktadır. Öte yandan eğer veri hızının görece iyi ve yaşam süresinin de çok düşük olmaması isteniliyorsa 4 UUG’li GEM bizim için en uygun seçmek olmaktadır.

Yukarıda bahsedilen faydalara ek olarak GEM bize yaşam süresi ve veri hızı arasında esneklik imkânı da sağlamaktadır. Örnek olarak 4 UUG’li GEM’in kullanıldığı veri iletimi esnasında TGS için, 52.8 birim yerine 2 UUG’li TDMA’daki gibi 67.2 birim kullanılabilir. İlgili durumu sağlamak için aralarındaki 14.4 birimde veri iletiminin yapılmaması (KSA’nın beklemesi) öngörülmektedir. Bu sayede Çizelge 5.4’te görüleceği üzere 4 UUG’li GEM’in veri hızı düşüş göstererek 2 UUG’li TDMA’nın veri hızına ulaşmakta, fakat yaşam süresi %27.7 kadar artış göstermektedir. Bu sayede TDMA’li bütün senaryolar arasında ulaşılan en yüksek veri hızına ulaşılırken KSA’nın %27.7 kadar daha uzun süre çalıştırılmasına imkan sağlanmaktadır.

Çizelge 5.4: Aynı Veri Hızına Sahip 2 UUG’li TDMA ve 4 UUG’li GEM

	Normalize Edilmiş Veri Hızı	Normalize Edilmiş Yaşam Süresi
2 UUG’li TDMA	0.435	0.349
4 UUG’li GEM	0.435	0.446

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde halihazırda son derece popüler bir teknoloji olan Kablosuz Sensör Ağlarını, bazı özel durumlar için daha uygun hale getirmek amacıyla güncellemeler yapıp, bu güncellemeler doğrultusunda farklı amaçlarla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Buna göre KSA'nın Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim mimarisine uygun şekilde düşük gecikmeye sahip olması ve sensör ağında veri tazeliğinin sağlanması için sensörlerde üretilen verilerin baz istasyonuna ulaşırken harcadığı gecikme ya da uçtan uca gecikme kısıtlanmaktadır. Ayrıca KSA'da haberleşmenin düşük bit hata oranı ile gerçekleşmesi, yönlü antenlere kıyasla enerji verimliliğinin artırılması ve girişimin daha verimli şekilde engellenebilmesi için KSA'daki bütün düğümlerde yönlü anten kullanılmıştır. Burada bahsedilenler göz önüne alınarak bu tez çalışmasında dört farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmada sadece tümyönlü anten tercih edilmekle birlikte farklı gecikme kısıtlarının yaşam süresi üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ayrıca ilgili durumlar özelinde sensör ağı yoğunluğunun etkisi de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gecikme kısıtını gevşetmenin ve düğüm sayısını artırmanın yaşam süresine etkisi en başta daha fazla olmakla birlikte belli bir yerden sonra ilgili eylemlerin etkisi daha az olmaktadır. Ayrıca, gecikme kısıtı daha sıkı iken düğüm sayısını artırmanın yaşam süresine etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Öte yandan daha gevşek gecikme kısıtı sayesinde, sensör ağı belli bir yoğunluğa ulaştıktan sonra bile düğüm sayısını artırmanın yaşam süresine pozitif etkisinin olduğu görülmüştür. İkinci çalışma esnasında gerçekleştiren bütün senaryolar hem tümyönlü antenler hem de yönlü antenler için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada uçtan uca gecikmeyi kısıtlarken yaşam süresini enbüyüklemenin, yaşam süresi ve ortalama bit hata oranı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışma özelinde yönlü antenli senaryoların tümyönlü antenlere göre hem çok daha düşük bit hata oranlarına hem de çok daha yüksek yaşam sürelerine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca uçtan uca gecikme kısıtını gevşetmenin, ilk başta hem yaşam süresinin artması hem de bit hata oranının azalmasında büyük bir etkisi olurken daha sonra bu kısıtı gevşetmenin sağladığı avantajlar giderek azalmıştır. Bu sayede uygun yaşam süresi ve bit hata oranını sağlayan en uygun uçtan uca gecikme kısıtı seçilebilmiştir. Üçüncü çalışmada her sensörün verilerini baz istasyonuna düşük hata oranlarıyla iletebilmesi istenmiştir.

Bunun için sadece yönlü anten kullanılan bu çalışmada iki farklı inceleme yapılmaktadır. İlk incelemede sensörlerin verilerini baz istasyonuna belli bir bit hata oranını aşmadan iletebilmesi için gereken minimum uçtan uca gecikme hesaplanmıştır. Buna göre sensör ağı yeterince yoğun olana kadar düğüm sayısını artırmanın, kullanılması gereken minimum uçtan uca gecikmeyi düşürdüğü görülmüştür. İkinci incelemede ise uçtan uca gecikmeyi ve bit hata oranını aynı anda kısıtlamanın yaşam süresi üzerindeki etkisi üzerinde durulmuştur. Bu sayede hem düşük uçtan uca gecikmeli hem de hatasız iletimi sağlamanın yaşam süresine etkisi incelenmiştir. Buradaki sonuçlarda uçtan uca gecikmeyi kısıtlamanın yanı sıra daha düşük bit hata oranı kısıtı getirmenin de yaşam süresine negatif etkisi olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda belli bir bit hata oranını sağlayan ve uçtan uca gecikme-yaşam süresi ödünleşmesi en uygun olan durum seçilmiştir. Son olarak dördüncü çalışmada ise hem yönlü antenin hem de uçtan uca gecikmeyi kısıtlamanın sağladığı avantajlardan yararlanılarak düşük hata oranına sahip bir KSA'da girişimi engellemek için önceden kullanılan bir yöntem olan TDMA ile bu tez özelinde önerilen GEM yöntemleri tercih edilmiştir. Bunun sonucunda her iki yöntem ile elde edilen veri hızı ve yaşam süreleri karşılaştırılarak performans karşılaştırılması yapılmıştır. Buna göre GEM, yönlü antenlerin sağladığı avantajlardan daha çok yararlanarak aynı anda daha fazla veri akışına izin verdiği için, TDMA'ye kıyasla veri hızı büyük oranda artmaktadır. Ayrıca GEM sayesinde TDMA ile yakalanan en yüksek veri hızına erişilirken TDMA'ye göre yaşam süresinde artış olduğu görülmüştür.

Gelecekte, yönlü anten ile ilgili çalışmalar esnasında kullanılan yaklaşık radyasyon modeli yerine gerçekçi radyasyon modeli tercih edilebilir. Ayrıca bu çalışma esnasında bit hata oranı hesaplanırken bağımlı değişken olarak boş uzay yol kaybı üzerinde durulmuştur. İlgili duruma ek olarak haberleşme kanalının ve gürültünün etkisi de dahil edilerek daha gerçek hayatta karşılaşılan durumlara daha uygun simülasyonlar yapmak mümkün olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **M. Kumar, K. K. Pattanaik, B. Yadav, and R. K. Verma**, "Optimization of wireless sensor networks inspired by Small World Phenomenon," 2015 IEEE 10th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2015.
- [2] **S. R. Jino Ramson and D. J. Moni**, "Applications of wireless sensor networks — A survey," 2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT), 2017, pp. 325-329.
- [3] **M. Jouhari, K. Ibrahim, H. Tembine and J. Ben-Othman**, "Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96879-96899, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928876.
- [4] **D. Popescu, C. Dragana, F. Stoican, L. Ichim, and G. Stamatescu**, "A collaborative UAV-WSN network for monitoring large areas," *Sensors*, vol. 18, no.12, p. 4202, 2018.
- [5] **P. Padmaja and G. V. Marutheswar**, "Optimization of wireless sensor network," 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016, pp. 161-166, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754938.
- [6] **N. Purohit, P. Varadwaj, and S. Tokekar**, "Reliability Analysis of Wireless Sensor Network," 2008 16th IEEE International Conference on Networks, 2008.
- [7] **D. E. Burgner and L. A. Wahsheh**, "Security of Wireless Sensor Networks," 2011 Eighth International Conference on Information Technology: New Generations, 2011, pp. 315-320, doi: 10.1109/ITNG.2011.62.
- [8] **Guotao Zhao, H. Ma, Y. Sun, H. Luo and Xufei Mao**, "Enhanced surveillance platform with low-power wireless audio sensor networks," *2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2011, pp. 1-9, doi: 10.1109/WoWMMoM.2011.5986188.
- [9] **M. Khedkar and G. M. Asutkar**, "Energy Optimisation in Wireless Sensor Network for Video Data Transmission," *2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)*, 2018, pp. 20-24, doi: 10.1109/GCWCN.2018.8668652.

- [10] **D. Chen, Z. Liu, L. Wang, M. Dou, J. Chen, and H. Li**, "Natural disaster monitoring with wireless sensor networks: A case study of data-intensive applications upon low-cost Scalable Systems," *Mobile Networks and Applications*, vol. 18, no. 5, pp. 651–663, 2013.
- [11] **G. T. Raju, D. K. Ghosh, T. S. Kumar, S. Kavyashree and V. Nagaveni**, "Wireless sensor network lifetime optimization," 3rd International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom 2011), 2011, pp. 244-248
- [12] **S. C. Ergen and P. Varaiya**, "On multi-hop routing for energy efficiency," in *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 880-881, Oct. 2005
- [13] **H. U. Yildiz, M. Temiz, and B. Tavli**, "Impact of limiting hop count on the lifetime of Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 569–572, 2015.
- [14] **H. Alazzam and W. Almobaideen**, "Enhancing The Lifetime of Wireless Sensor Network using Genetic Algorithm," 2019 10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), 2019, pp. 25-29, doi: 10.1109/IACS.2019.8809109.
- [15] **T. K. Jain, D. S. Saini and S. V. Bhooshan**, "Increasing Lifetime of a Wireless Sensor Network Using Multiple Sinks," 2014 11th International Conference on Information Technology: New Generations, 2014, pp. 616-619, doi: 10.1109/ITNG.2014.90.
- [16] **M. Bouzeghoub**, "A framework for analysis of data freshness, " *Proceedings of the 2004 international workshop on Information quality in informational systems - IQIS '04*, 2004.
- [17] **G. Jaber, R. Kacimi and T. Gayraud**, "Data Freshness Aware Content-Centric Networking in WSNs," 2017 Wireless Days, 2017, pp. 238-240.
- [18] **M. T. R. Khan, Y. Z. Jembre, S. H. Ahmed, J. Seo and D. Kim**, "Data Freshness Based AUV Path Planning for UWSN in the Internet of Underwater Things," 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2019, pp. 1-6.
- [19] **K. C. Serdaroglu and S. Baydere**, "On the Data Freshness for IoT Traffic Modelling in Real-Time Emergency Observation Systems, " 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT), 2018, pp. 335-340
- [20] **Incebacak, D., Bicakci, K., & Tavli, B.** (2015). Evaluating energy cost of route diversity for security in Wireless Sensor Networks. *Computer Standards & Interfaces*, 39, 44–57.

- [21] **Mehdi, Haider & Soomro, Safeullah & Khan, W. & Memon, Abdul & Hafeez, Abdul.** (2013). Error-Rate Performance Analysis of Wireless Sensor Networks over Fading Channels [ISI Index X Category]. 45.
- [22] **H. Arora, D. Sharma, H. P. Singh, and J. P. Singh,** "Bit error rate analysis of wireless sensor nodes with different packet size and distance," 2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Spring), 2016.
- [23] **S. Qureshi, A. Javeed and S. Sohaib,** "Lifetime analysis and BER performance trade-off in Wireless Sensor Networks and Cooperative Wireless Networks," *2013 IEEE 9th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICET.2013.6743492.
- [24] **D. Walsh, D. Moodie, I. Mauchline, S. Conner, W. Johnstone, and B. Culshaw,** "Practical bit error rate measurements on fibre optic communications links in student teaching laboratories," *SPIE Proceedings*, 2005.
- [25] **C.-H. Ou,** "A localization scheme for wireless sensor networks using mobile anchors with directional antennas," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 7, pp. 1607–1616, 2011.
- [26] **Y. -J. Chang, C. -H. Ou and K. -F. Ssu,** "A cluster analysis-based localization Scheme for wireless sensor networks using mobile anchor nodes with directional antennas," *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, 2018, pp. 1156-1158, doi: 10.1109/ICASI.2018.8394489.
- [27] **A. Makashov,** "The network layer model of the wireless sensor network acting under the influence of interferences," *2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*, 2019, pp. 116-118, doi: 10.1109/DCNAIR.2019.8875588.
- [28] **M. Shakir, I. Ahmed, M. Adnan, M. Peng and W. Wang,** "Minimization of BER and Interference Power through Optimal Deployment of WSNs," *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2007, pp. 2393-2396, doi: 10.1109/WICOM.2007.596.
- [29] **J. Cha, J. Jeon, J. Kim and Y. Kwon,** "Location-based multicast routing algorithms for wireless sensor networks in presence of interferences," *2010 IEEE International Conference on Communication Systems*, 2010, pp. 41-45, doi: 10.1109/ICCS.2010.5686104.

- [30] **L. Ye, J. Fulong, L. Hao, W. Jianhui, H. Chen and Z. Meng**, "Interference robust channel hopping strategies for wireless sensor networks," in *China Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 96-104, March 2016, doi: 10.1109/CC.2016.7445505.
- [31] **H. Gong, M. Liu, L. Yu and X. Wang**, "An Event Driven TDMA Protocol for Wireless Sensor Networks," *2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing*, 2009, pp. 132-136, doi: 10.1109/CMC.2009.273.
- [32] **C. -L. Chang and K. -Y. Ho**, "Slot assignment for TDMA MAC in industrial wireless sensor network," *2016 IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIS.2016.7550731.
- [33] **J. -Y. Li, Z. Wang, R. Lu and Y. Xu**, "Distributed Filtering Under Constrained Bit Rate Over Wireless Sensor Networks: Dealing with Bit Rate Allocation Protocol," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, doi: 10.1109/TAC.2022.3159486.
- [34] **S. Mahlknecht and M. Bock**, "On the use of high bit rate transceivers for low duty cycle wireless sensor networks," *2004 IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa (IEEE Cat. No.04CH37590)*, 2004, pp. 1235-1238 Vol.2, doi: 10.1109/AFRICON.2004.1406888.
- [35] **C. -W. Hung, W. -T. Hsu and K. -H. Hsia**, "Using Adaptive Data Rate with DSSS Optimization and Transmission Power Control for Ultra-Low Power WSN," *2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 2019, pp. 611-614, doi: 10.1109/DeSE.2019.00115.
- [36] **J. G. Proakis and M. Salehi**, *Fundamentals of Communication Systems*. Boston etc.: Pearson Education Limited, 2014.
- [37] **Y. M. Hasan and N. H. Khamis**, "Link budget analysis for underwater acoustic signaling," thesis.
- [38] **C. A. Balanis**, *Antenna theory: Analysis and design*. New York: Wiley, 1997.
- [39] W. L. Stutzman, "Estimating directivity and gain of antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 7-11, 1998.
- [40] **S. P. Parker**, *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. New York etc.: McGraw-Hill, 1994.
- [41] *Handbook on Satellite Communications*. Geneva: International Telecommunication Union, 2002.
- [42] **Y. S. Cho**, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Singapore: John Wiley & Sons, 2010.

- [43] **M. R. Akdeniz, Yuanpeng Liu, S. Rangan, and E. Erkip**, “Millimeter wave picocellular system evaluation for urban deployments,” 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013.
- [44] **Spolitis, Sandis & Bobrovs, Vjaceslavs & Ivanovs, G.** (2011). Realization of Combined Chromatic Dispersion Compensation Methods in High Speed WDM Optical Transmission Systems. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 33-38. 10.5755/j01.eee.113.7.622.
- [45] **P. C. Gupta**, *Data Communications and Computer Networks*. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2014.
- [46] **T. M. Cover and J. A. Thomas**, *Elements of information theory*. New Delhi: Wiley-India, 2010.
- [47] **J. Vales-Alonso et al.**, “Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks,” *Comput. Netw.*, vol. 51, no. 6, pp. 1483–1498, Apr. 2007.
- [48] **J. Banerjee, S. Kumar Mitra, and M. Kanti Naskar**, “Comparative study of radio models for Data Gathering in wireless sensor network,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 27, no. 4, pp. 49–57, 2011.

İnternet Siteleri

- [49] “A guide to 5G small cells and macrocells,” *Essentra Components US*. [Online]. Available: <https://www.essentracomponents.com/en-us/news/industries/telecoms-data/a-guide-to-5g-small-cells-and-macrocells>. [Accessed: 29-Oct-2022].
- [50] “Link budget calculator,” *Pasternack*. [Online]. Available: <https://www.pasternack.com/t-calculator-link-budget.aspx>. [Accessed: 16-Nov-2022].