

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



YÜKSEK FREKANSLARDA İNSAN GÖZÜNÜN TELSİZ
DUYARGA AĞLARI İÇİN NUMERİK MODELLENMESİ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEMİH SAK

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Mustafa Alper AKKAŞ

BOLU, HAZİRAN 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Semih SAK tarafından hazırlanan “**YÜKSEK FREKANSLARDA İNSAN GÖZÜNÜN TELSİZ DUYARGA AĞLARI İÇİN NUMERİK MODELLENMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 18/06/2025

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Mustafa Alper AKKAŞ
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Orhan DAĞDEVİREN
Ege Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇALIM
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

SEMİH SAK

ÖZET

**YÜKSEK FREKANSLARDA İNSAN GÖZÜNÜN TELSİZ DUYARGA
AĞLARI İÇİN NUMERİK MODELLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SEMİH SAK
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
(TEZ DANIŞMANI: PROF DR. MUSTAFA ALPER AKKAŞ)**

**BOLU, HAZİRAN- 2025
XI + 41 sayfa**

Nano boyuttaki telsiz duyurga ağları vücut içerisine kolaylıkla sığabilme özelliklerinden dolayı gelecekte kullanımı oldukça yaygınlaşabilecek Nİ cihazlarıdır. Telsiz duyurga ağlarının göz içerisine yerleştirilmesi, göz için akıllı lenslerin ayarlanması, göz tansiyonu, göz travmaları, göz enfeksiyonları gibi hastalıkları önceden tahmin edilebilmesi veyahut takip edilmesi gibi durumlarda kullanılması hedeflenmektedir. Bu çalışmamızda Terahertz frekansında insan gözünün önüne yerleştirebileceğimiz bir Nİ haberleşme cihazının iletişim karakteristiğini matematiksel olarak modellenmesi yer almaktadır. Bu süreçte dikkate alınması gereken başlıca parametreler arasında gözün kırılma indisi, emilim karakteristikleri ve yüksek frekansta saçılma özellikleri bulunmaktadır. Bu araştırmanın amacı, insan vücuduyla kesintisiz iletişim kurabilen görünmez, giyilebilir Nİ haberleşme cihazlarının tasarımına katkıda bulunmaktır; yüksek frekanslarda ultra düşük gecikmeli bir ağ ile çalışması beklenen cihazın uzaktan tanı ve buna bağlı olarak sağlık hizmeti alabilmeyi kolaylaştıracaktır. Tek yön haberleşme metodunun kullanıldığı çalışmada farklı frekans aralıklarının iletişim performansına etkisini, yüksek frekanslarda cihazlar arasındaki iletişimin optimize edilmesi ile ilgili öneriler verilmiş ve ilgili frekansa tercih edilebilme sırasına göre kayıpsız iletim verileri, 2.30 mm (0.03 THz’de), 1.00 mm (0.06 THz’de), 1.00 mm (0.1 THz’de), 0.75 mm (0.2 THz’de) ve 0.55 mm (0.3 THz’de) olduğu anlaşılmaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: 6G, Nesnelerin interneti, İletişim karakteristiği, Numerik modelleme, Giyilebilir cihazlar

ABSTRACT

NUMERICAL MODELING OF THE HUMAN EYE AT HIGH FREQUENCIES FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

MSC THESIS

SEMIH SAK

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF COMPUTER ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF DR., MUSTAFA ALPER AKKAS)

BOLU, JUNE 2025

XI + 41 pages

Nano-sized wireless sensor networks are IoT devices that can be widely used in the future due to their ability to easily fit inside the human body. It is aimed to be used in cases such as placing radio sensor networks in the eye, adjusting smart lenses for the eye, predicting or monitoring diseases such as eye pressure, eye trauma, eye infections. In this study, mathematical modelling of the communication characteristics of an IoT wireless device that we can place in front of the human eye at the Terahertz frequency. The main parameters to be considered in this process include the refractive index, absorption characteristics and high frequency scattering properties of the eye. The aim of this research is to contribute to the design of invisible, wearable IoT communication devices that can communicate seamlessly with the human body, which will facilitate telemedicine, remote diagnosis and related healthcare services for the device that is expected to operate with an ultra-low latency network at high frequencies. One-way communication method was used, the effect of different frequency ranges on communication performance, suggestions for optimising the interactions of communication between devices at high frequencies were given and lossless transmission data were found to be 2.30 mm (at 0.03 THz), 1.00 mm (at 0.06 THz), 1.00 mm (at 0.1 THz), 0.75 mm (at 0.2 THz) and 0.55 mm (at 0.3 THz) in order of preference for the relevant frequency.

KEYWORDS: 6G, Internet of Things, Communication characteristics, Numerical Modeling, Wearing devices

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	ix
TEŞEKKÜR	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Nİ Önemi ve Barındırdığı Riskler	2
1.2 Haberleşme Paradigmaları ve Zorlukları.....	5
1.3 Kablosuz Haberleşme Teknolojilerinin Gelişimi	8
1.3.1 Birinci Nesil (1G) Kablosuz Haberleşme.....	8
1.3.2 İkinci Nesil (2G) Kablosuz Haberleşme.....	8
1.3.3 Üçüncü Nesil (3G) Kablosuz Haberleşme.....	9
1.3.4 Dördüncü Nesil (4G) Kablosuz Haberleşme	9
1.3.5 Beşinci Nesil (5G) Kablosuz Haberleşme	10
1.3.6 Altıncı Nesil (6G) Kablosuz Haberleşme	13
2. MATERYAL ve YÖNTEM	20
3. BULGULAR	23
4. TARTIŞMA	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Nİ uygulama örnekleri	2
Şekil 1.2. Frekans aralıkları	11
Şekil 1.3. 6G vizyonu	16
Şekil 1.4. Nano-sensör uygulaması.....	18
Şekil 3.1. 0.03 THz- 0.3 THz frekanslarında yol kaybı değişimi	23
Şekil 3.2. 0.03 THz frekansında BHO değişimi	25
Şekil 3.3. 0.03 THz 20-50 dB arasında iletim mesafesi değişimi.....	26
Şekil 3.4. 0.06 THz frekansında BHO değişimi	27
Şekil 3.5. 0.1 THz frekansında BHO değişimi	28
Şekil 3.6. 0.2 THz frekansında BHO değişimi	29
Şekil 3.7. 0.2 THz frekansında 0.1 – 1.0 mm arasındaki BHO değişimi.....	30
Şekil 3.8. 0.3 THz frekansında BHO değişimi	31

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. 2G kablosuz haberleşme teknolojisinin temel özellikleri	8
Tablo 1.2. 3G ile 4G teknolojilerinin karşılaştırılması.....	9
Tablo 1.3. 4G ile 5G teknolojilerinin karşılaştırılması.....	10
Tablo 1.4. Milimetre dalga teknolojisi özellikleri	12
Tablo 1.5. 6G’de potansiyel uygulamalar	14
Tablo 3.1. Göz ortamının 0.03 THz - 0.3 THz arasındaki ϵ' ve ϵ'' değerleri ..	23
Tablo 3.2. Frekans artışına bağlı olarak değişen yol kaybı değişimi	32
Tablo 3.3. 0.03 THz ile 0.3 THz arasında sistemin çeşitli güç seviyelerindeki mm cinsinden kayıpsız iletim mesafeleri	34



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

3GPP	: Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi
AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AI	: Yapay Zekâ
AM	: Genlik Modülasyonu
AMPS	: Gelişmiş Mobil Telefon Hizmeti
AG	: Arttırılmış Gerçeklik
BHO	: Bit Hata Oranı
CDMA	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim
DL	: Veri İndirme Yönü
DVB	: Dijital Görüntü Yayıncılığı
EDGE	: GSM Evrimi için Geliştirilmiş Veri Oranları
EHF	: Aşırı Yüksek Frekans
EM	: Elektromanyetik Alan
FCC	: Federal Haberleşme Komitesi
FDMA	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
FM	: Frekans Modülasyon
Gbps	: Saniyede İletilen Gigabits
GHz	: Hertz değerinin bin katı
GPRS	: Genel Paket Radyo Servisi
GPS	: Yer Konumlama Servisi
GSM	: Küresel Mobil Haberleşme Sistemi
HD	: Bin Seksen Piksele Eş Gelen Çözünürlük
HF	: Yüksek Frekans
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IoT	: Nesnelerin İnterneti
IP	: İnternet Protokolü
ISAC	: Bütünleşik Algılama ve İletişim
LF	: Düşük Frekans
LIDAR	: Işık Algılama ile Mesafe Ölçme
LTE	: Uzun Vadeli Evrim
LTE-A	: Gelişmiş LTE
M2M	: Cihazdan Cihaza Bağlantı
Mbps	: Saniyede İletilen Megabits
MF	: Orta Frekans
MIMO	: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış

ML	: Makine Öğrenmesi
MMS	: Multimedya Mesajlaşma Servisi
MmWave	: Milimetre Dalga
Nİ	: Nesnelerin İnterneti
QFDMA	: Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
RF	: Radyo Frekansı
SHF	: Süper Yüksek Frekans
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
THz	: Hertz değerinin Bir Milyar Katı
UHF	: Ultra Yüksek Frekans
UL	: Veri Yükleme Yönu
UMTS	: Evrensel Telekomünikasyon Sistemi
URRLC	: Ultra Stabil Düşük Gecikmeli Haberleşme
VHF	: Çok Yüksek Frekans
VLF	: Çok Düşük Frekans
WLAN	: Geniş Alan Ağı
WSNS	: Nano Düzey Kablosuz Sensör Haberleşmesi

TEŞEKKÜR

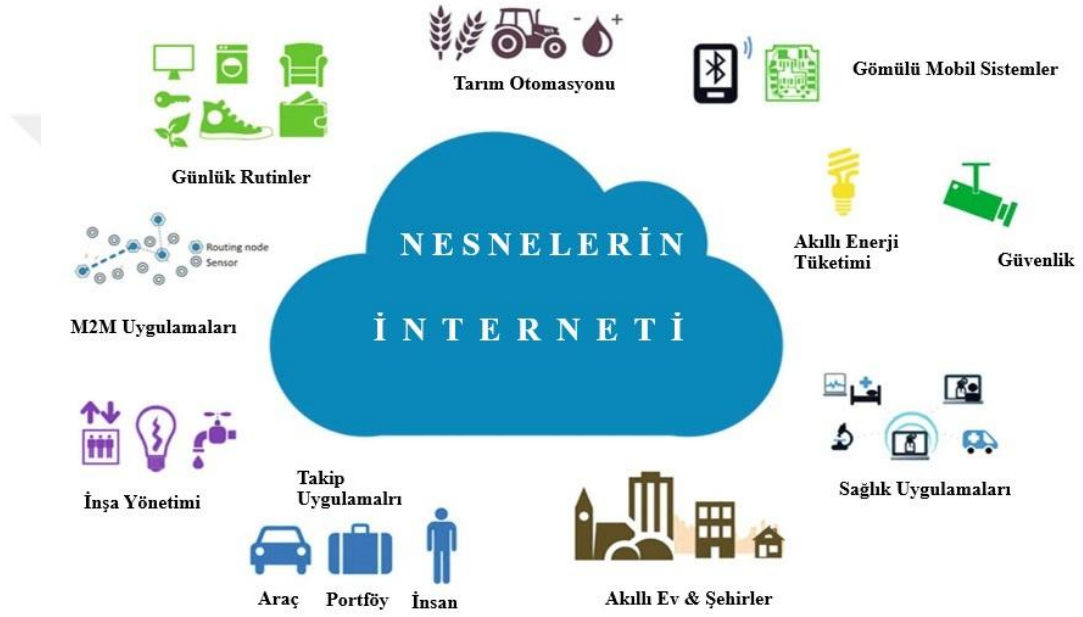
Başta en büyük destekçim, sarsılmaz gücüm olan aileme; koşulsuz sevgileri, sabırları ve inançları için minnettarım. Akademik hayatım boyunca bilgi birikimleriyle ufkumu açan, yol gösteren değerli bölüm hocalarıma şükranlarımı sunarım. Özellikle tez sürecimdeki engin bilgisi, sabrı, yapıcı eleştirileri ve motive edici yönlendirmeleriyle bu çalışmayı başarıyla tamamlamamı sağlayan değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa Alper Akkaş'a minnettarım. Kendisinin rehberliği benim için çok kıymetliydi. Ayrıca bu tezin oluşmasında görüş alışverişinde bulunduğum, fikirlerine değer verdiğim bölüm arkadaşım Kaan Cömert'e teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Teknolojik ilerlemelerle birlikte, elektromanyetik dalga yayan elektronik cihazlar hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Günlük yaşamda kullanılan mobil telefonlar, Wi-Fi ağları, televizyon yayınları, sağlık kuruluşlarında teşhis amacıyla kurulan cihazlardan aldığımız em dalgaları olarak çoğaltmak mümkün. 1990'lı yıllarda, etrafımızda EM dalga yayan cihaz sayısı sınırlı olmasından dolayı maruz kaldığımız EM alanı da sınırlıydı. Ancak, bugün Nesnelerin interneti kavramıyla sayısı milyarları bulan cihazlarla hem etki alanı daralmış hem de etkileşim süremiz her geçen gün artmıştır. İnsan gözünün EM alanlarına verdiği termo-fizyolojik tepki halen tam olarak anlaşılamamış ve araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada insan gözünün önüne yerleştireceğimiz Nİ cihazı aracılığıyla insan gözün yoğun ortamında Terahertz seviyesindeki sinyallerde oluşan teorik iletişim karakteristiği incelenmiştir. Terahertz dalga uygulamaları, kablosuz haberleşme ve biyolojik algılamayı mümkün kıldı. Bu frekanslar 252 ila 325 GHz arasında değişen değerlerle IEEE 802.15.3d standardında yerini aldı (IEEE Std 802.15.3d-2017). THz frekans aralığındaki güncel uygulamaların sayısı, tüm vücut tarayıcıları ve WLAN haberleşme gibi uygulamalar hızla yükseliş göstermektedir. Özellikle de Nİ uygulamaları yonga teknolojisindeki ilerlemelerle son yıllarda bir artış trendine girdi. Nİ'nin hayatımıza girmesiyle birbirleriyle haberleşme imkânına sahip olacak aygıt sayısının önümüzdeki on yılda yaklaşık yüz milyar seviyesine ulaşabileceği tahmin edilmektedir. Bu durum özelinde bu tür kaynaklardan elektromanyetik alana maruz kalma nedeniyle genel halk ve çalışanlar için risklerin belirlenmesine yönelik yöntemlere olan ihtiyaç artmaktadır. Bunun yanı sıra, çalışmanın kapsamı belli bir demografik gruba odaklanmak yerine genel popülasyona hitap edecek şekilde geniş bir çerçevede ele alınacaktır. Şu anki literatürde, 0.1 THz ile 0.2 THz arasında göz dokusunun benzer pek de değişmeyen dielektrik malzeme özellikleri gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu frekans aralığındaki araştırma 0.03- 0.3 THz frekansındaki tahminlere ışık tutacaktır. 0.03 - 0.3 THz aralığı, nano boyutta anten tasarlamak için oldukça ideal bir aralıktır. (Akyıldız ve diğerleri, 2012)

1.1 Nİ Önemi ve Barındırdığı Riskler

Nesnelerin İnterneti, adından da anlaşılacağı gibi, hayatımızın her köşesinde yer alan sıradan fiziksel nesnelere dijital bir ruh kazandırarak onları akıllı ve etkileşimli varlıklara dönüştüren devrim niteliğinde bir teknolojidir. Bu teknoloji, yalnızca bilgisayarların veya akıllı telefonların değil, bir buzdolabının, bir arabanın, bir lamba direğinin, hatta bir tarla sensörünün bile internete bağlanmasını ve bu bağlantı üzerinden veri toplamasını, işlemesini ve diğer cihazlarla, sistemlerle veya insanlarla iletişim kurmasını mümkün kılar. (Erbey, 2024)



Şekil 1.1. Nİ uygulama örnekleri

Nİ, pasif nesnelerden oluşan bir dünyadan, birbirini anlayan ve tepki veren dinamik bir ekosisteme geçişi temsil ederek, hayatımızın sayısız alanında potansiyel bir değişim sağlayabilmektedir. Şekil 1.1’deki örnekte yer alan bağlantılı ekosistemin en belirgin faydalarından biri, kaynak yönetimi ve sürdürülebilirlik alanındaki etkisidir. Nİ cihazları sayesinde çevremizdeki fiziksel dünyaya dair eşi benzeri görülmemiş bir veri akışı elde ederiz. Örneğin, akıllı binalarda sıcaklık, ışık ve doluluk sensörleri enerji kullanımını gerçek zamanlı olarak izleyip optimize ederek önemli ölçüde tasarruf sağlayabilir. Benzer şekilde, akıllı tarım sistemlerindeki toprak nemi veya hava durumu sensörleri, suyun yalnızca ihtiyaç duyulduğu zaman ve miktarda kullanılmasını mümkün kılarak su israfını önler ve daha verimli mahsul yetiştiriciliğini teşvik eder. (Tissaoui, Ave Saidi M, 2020). Akıllı şebekeler enerji dağıtımını optimize ederken, akıllı atık yönetimi sistemleri

çöp toplama rotalarını verimli hale getirebilir. Bu tür uygulamalar hem ekonomik kazanç sağlar hem de gezegenimizin sınırlı kaynakları üzerindeki baskıyı azaltarak çevresel ayak izimizi küçültmemize yardımcı olur, böylece sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kilit rol oynayabilir. (Tissaoui, Ave Saidi M, 2020).

Nİ'nin insana dokunan bir diğer kritik faydası ise sağlık ve yaşam kalitesi üzerindeki olumlu etkisidir. Giyilebilir teknolojilerden evde kullanılan akıllı sağlık cihazlarına kadar birçok Nİ çözümü, bireylerin sağlık durumlarını sürekli olarak izlemesine olanak tanır. Kalp atış hızı, uyku düzeni, aktivite seviyesi gibi veriler toplanarak hem kişisel farkındalığı artırır hem de potansiyel problemleri erken teşhis etmeye yardımcı olabilir. Uzaktan hasta takibi sistemleri, kronik rahatsızlığı olan bireylerin evlerinde daha güvenli ve bağımsız kalmasına imkân verirken, sağlık profesyonellerinin de hastalarına daha hızlı ve etkili müdahale etmesini sağlar. Nİ'nin akıllı şehirler alanında kullanımıyla, trafik yönetimini optimize ederek seyahat sürelerini kısaltabilir, akıllı aydınlatma sistemleriyle enerji tasarrufu yaparken sokakları daha güvenli hale getirebilirken etkin toplu taşıma hizmetleri sunabilir. Bu gelişmeler, şehirleri daha yaşanabilir, konforlu ve güvenli hale getirerek genel yaşam kalitemizi doğrudan yükseltir. (Tissaoui, Ave Saidi M, 2020).

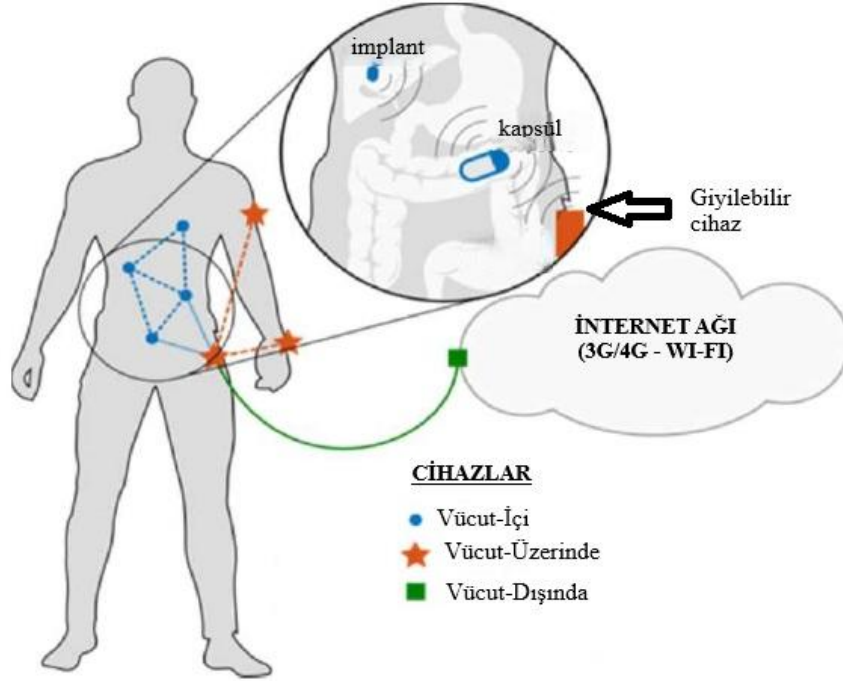
Ekonomik ve endüstriyel açıdan bakıldığında, Nİ yeni ürün ve hizmetlerin geliştirilmesi için sınırsız fırsatlar sunan bir inovasyon platformudur. Nİ cihazları tarafından toplanan büyük veri yığınları, gelişmiş analitik ve yapay zekâ algoritmalarıyla işlenerek paha biçilmez içgörüler sağlayabilir. Bu içgörüler, üretim süreçlerini optimize etmek, arızaları önceden tahmin etmek (öngörücü bakım), müşteri davranışlarını anlamak, kişiselleştirilmiş deneyimler sunmak ve genel verimliliği artırmak için kullanılabilir. Lojistikte rota optimizasyonu ve takip yetenekleri artar. AG uygulamaları, Nİ cihazlarından gelen canlı verilerle zenginleştirilerek saha çalışanlarına gerçek zamanlı bilgi sağlayabilir. Bu veri odaklı yaklaşımlar, işletmelerin daha akıllı kararlar almasına, maliyetleri düşürmesine ve rekabet avantajı elde etmesine olanak tanır (Asir, Manohar, Anandaraaj, ve Sivaranjani, 2016).

Nİ'nin sunduğu tüm bu potansiyel faydaların yanı sıra dikkate alınması gereken önemli riskler de bulunmaktadır. İnternete bağlı milyarlarca cihazdan oluşan bu geniş ağ, potansiyel bir siber saldırı yüzeyini de beraberinde getirir. Birçok Nİ cihazı, düşük maliyetli olması, sınırlı işlem gücü veya yeterli güvenlik

bilinci olmaması nedeniyle zayıf şifreler, güncellenmeyen yazılımlar veya standart dışı güvenlik protokolleri gibi güvenlik açıklarına karşı savunmasız olabilir (Erbey, 2024). Siber saldırganlar, bu zayıf noktaları kullanarak cihazlara sızabilir, kişisel verilere erişebilir, sistemleri bozabilir. Örneğin, Nİ sensörleriyle kontrol edilebilen akıllı evin kontrolünün ele geçirilmesi durumunda o bağımsız birime ait enerji tüketimini etkileyebilir. Nİ kümesi dahilinde yer alan cihazların ele geçirilmesi durumunda devasa siber saldırılar için botnetlerin bir parçası haline getirebilir. Bu nedenle, Nİ cihazlarını geliştirirken, dağıtırken ve kullanırken düzenli güvenlik güncellemeleri sağlamak ve güçlü kimlik doğrulama yöntemleri kullanmak hayati önem taşır. (Erbey, 2024). Nİ cihazlarına ait endişe oluşturabilme potansiyeline sahip bir gelişme ise, Nİ cihazlarıyla toplanan devasa miktardaki kişisel verinin nasıl kullanıldığı ve korunduğu konusundaki gizlilik riskleridir. Bir akıllı hoparlörün konuşmalarımızı dinlemesi, bir aktivite takipçisinin konumumuzu kaydetmesi veya akıllı bir buzdolabının alışveriş alışkanlıklarımızı kaydetmesi gibi veriler, rızamız veya şeffaflık olmadan toplanabilir ve ticari amaçlarla veya başka şekillerde kullanılabilir. Bu durum, bireysel gizliliğin sınırlarını zorlayabilir ve hatta potansiyel gözetim riskleri yaratabilir. (Tawalbeh ve diğerleri, 2020).

1.2 Haberleşme Paradigmaları ve Zorlukları

Teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, özellikle biyomedikal uygulamalar, çevre izleme ve endüstriyel nano-robotik gibi alanlarda nano-boyutlu cihazların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu küçük ölçekli sistemlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi ve görevlerini yerine getirebilmesi için birbirleriyle ve/veya dış dünya ile güvenilir bir şekilde iletişim kurmaları zorunludur (Sak S. ve Akkaş A, 2024). Nano haberleşme teknolojileri, işte tam da bu ihtiyaca yanıt veren, nano-ölçekli cihazlar arasındaki bilgi alışverişini mümkün kılan yeni nesil iletişim paradigmalarını içermektedir. Bu alandaki araştırmalar büyük bir potansiyele sahip olmakla birlikte, geleneksel iletişim yöntemlerinin bu boyutta karşılaştığı benzersiz zorluklar nedeniyle yeni ve yenilikçi yaklaşımların benimsenmesini gerektirmektedir. Nano haberleşme alanında en yaygın düşünülmüş ve üzerinde çalışılmış yöntemlerden biri, mikroskobik boyutlarda bile kullanılabilen klasik EM haberleşmedir. EM dalgalar, antenler aracılığıyla bilgi taşıyabilir ve nispeten yüksek hızlarda iletilebilirler (Sak S. ve Akkaş A, 2024).



Şekil 1.2. Nano ölçek haberleşme örneği

Nano-ölçekli uygulamalarda, özellikle biyolojik ortamlar gibi karmaşık kanallarda, EM haberleşme ciddi sınırlamalarla karşılaşmaktadır. EM dalgalar, haberleşme kanallarında ilerlerken çeşitli fiziksel süreçler nedeniyle enerji kaybederler; bu kayıpların başında soğurulma (absorpsiyon) gelir (Akyıldız ve

diğerleri, 2014). Özellikle biyolojik dokular veya sulu çözeltiler gibi elektriksel iletkenliği olan ortamlarda, EM dalgalar doku tarafından emilir ve bu da sinyal gücünde önemli bir düşüşe neden olur. Bu soğurulma miktarı, kullanılan taşıyıcı frekansına doğrudan bağlıdır. Nano-ölçekli cihazların kullanabileceği minyatürleştirilmiş antenler, genellikle etkin çalışmak için yüksek frekanslarda (birkaç GHz hatta THz) çalışmayı gerektirir. Ne yazık ki, tam da bu yüksek frekanslar, biyolojik ortamlardaki soğurulmanın en şiddetli olduğu aralıklardır. Bu durum, sinyal gücünün mesafe ile hızla azalmasına (zayıflama), sinyal-gürültü oranının düşmesine ve nihayetinde sinyal kalitesinin ciddi şekilde olumsuz etkilenmesine yol açar. Ayrıca, sinyal saçılması ve çok yollu yayılım etkileri de nano-ölçekli EM haberleşmenin güvenilirliğini azaltabilir. (Akyıldız ve diğerleri, 2014). Bu sorunlar, özellikle insan vücudu içinde çalışan, güvenli ve kesintisiz iletişim gerektiren biyomedikal cihazların (örneğin, implant için kullanılabilen sensörler, ilaç dağıtım sistemleri veya nano-robotik cerrahi araçlar) güvenilirliği ve performansı açısından ciddi problemler teşkil eder. Şekil 1.2’de implant için kullanılabilen bir sensör örneği görülmektedir (Kulakowski ve diğerleri, 2020). Görselde vücut içerisindeki iletişim yüksek frekanslarda nano boyutta birbirine kablosuz aktarım yapabilen cihazlar ile vücut üzerindeki iletişim giyilebilir cihazlar ile vücut dışarısında gerçekleşen iletişim ise geniş internet ağı ile sağlanabileceğini ifade etmektedir. EM dalgaların iyonlaştırıcı etkileri veya ısıtma potansiyeli gibi biyolojik etkileri endişeler yaratabilir. Bu nedenle, klasik EM haberleşme yöntemlerinin nano-boyutta karşılaştığı temel sınırlamaların üstesinden gelmek veya tamamen farklı bir iletişim paradigması benimsemek amacıyla alternatif haberleşme metotları yoğun bir araştırma konusudur. Bu alternatiflerden biri olarak dikkat çeken ve büyük umut vaat eden alan ise moleküler haberleşmedir.

Moleküler haberleşme, bilginin elektromanyetik dalgalar yerine moleküller aracılığıyla taşındığı bir iletişim yöntemidir. Verici, bilgi bitlerini temsil eden molekülleri serbest bırakır ve alıcı, bu molekülleri algılayarak bilgiyi çözer. Bu yaklaşım, özellikle elektromanyetik dalgaların iyi performans göstermediği, soğurulmanın yüksek olduğu veya EM sinyallerin kullanılamayacağı ortamlarda (örneğin, su bazlı biyolojik sıvılar, mikro-akışkan kanalları veya toprak) doğal bir alternatif sunar. Moleküler haberleşme, doğadaki canlı sistemlerde (örneğin hücreler arası iletişim, sinir iletimi, hormonal sinyalleşme) zaten yaygın olarak kullanılan temel bir mekanizmadır (Baykaş, T. ve Akkaş, M. A., 2019). Bu durum

biyolojik uyumluluk açısından önemli bir avantaj sağlar. Potansiyel uygulama alanları arasında vücut içi nano-robot ağları, ilaç dağıtım sistemlerinin koordinasyonu, teşhis amaçlı sensörler ve çevresel nano-sensör ağları yer alır.

Moleküler haberleşme kendi içinde bir dizi önemli zorluk barındırmaktadır. Başlıca zorluklardan biri, moleküler sinyallerin doğasında bulunan yön tayin yeteneğinin olmamasıdır. Elektromanyetik dalgalar, antenler aracılığıyla belirli yönlere odaklanabilir ve hedefli iletişim sağlayabilirken, moleküler sinyaller genellikle vericiden her yöne doğru rastgele olarak yayılır (Baykaş, T. ve Akkaş, M. A., 2019). Bu yayılım, genellikle kütle çekimsel akış (konveksiyon) veya Brownian hareketine dayalı rastgele molekül hareketi (difüzyon) gibi süreçlerle gerçekleşir. Özellikle difüzyon yoluyla iletişimde, verici tarafında salınan moleküller ortamda rastgele dağılır ve alıcının bu molekülleri algılayabilmesi için yeterli yoğunluğa ulaşmaları gerekir. Bu rastgele yayılım, sinyalin belirli bir hedefe yönlendirilmesini zorlaştırır, sinyal gücünün iletim mesafesinin hızla (genellikle EM'e göre daha da hızlı) azalmasına neden olur ve hedeflemeyen alıcılar tarafından da algılanma olasılığını artırır, istenmeyen durumlara yol açabilir. Moleküler haberleşmede sinyal iletiminde meydana gelen bu rastgelelik, aynı zamanda bilgi kaybına ve yüksek hata oranlarına yol açabilir. Moleküllerin yayılma hızı ve yolu tahmin edilemez olduğundan, alıcıya ulaşan sinyalin gücü ve zamanlaması büyük ölçüde değişkenlik gösterir (Baykaş, T ve Akkaş, M. A, 2019).

1.3 Kablosuz Haberleşme Teknolojilerinin Gelişimi

1.3.1 Birinci Nesil (1G) Kablosuz Haberleşme

Birinci nesil kablosuz haberleşme, ses hizmeti için tasarlanmış 30 KHz kanal kapasitesine sahip FDMA ve 824-894 MHz frekans bandına sahip radyo iletimi için ise FM tekniğini kullanan analog sistemler olup AMPS olarak bilinen bir teknolojiye dayanıyordu. Bu teknolojiye iki terminal arasındaki bağlantı şifresiz, genel bir yayın olarak gerçekleşiyordu (Nakano, T, 2012).

1.3.2 İkinci Nesil (2G) Kablosuz Haberleşme

1990'lı yıllarda ikinci nesil kablosuz haberleşme teknolojisi olarak hayatımıza girdi ve analog olan birinci nesil kablosuz haberleşme teknolojisinin yerini aldı. 3GPP standartlar organizasyonu tarafından standartlaştırılmıştır. İkinci nesil kablosuz haberleşme, ilk kez hücresel haberleşmeyi başlattı. Yani hücresel haberleşmenin ilk nesli olarak kabul görmektedir. İkinci nesil haberleşme, 1992'de önde gelen uluslararası GSM standardına göre çalışmaktadır. 2G teknolojisi ilk kez ses hizmetinin yanında veri hizmetini de beraberinde getirdi. GSM, sinyalleri iletmek için TDMA bir çeşidini kullanmakla birlikte bunun yanında üç dijital standart arasında en çok tercih edilenidir (TDMA, GSM, CDMA). 2G vizyonu 2.75G'ye kadar gelişme imkânı bulmuştur.

Tablo 1.1. 2G kablosuz haberleşme teknolojisinin temel özellikleri

Nesil	Teknolojisi	Maksimum Bant Genişliği	Frekans Bant Aralığı
2G	GSM	9.6 Kbit/s	890-915 MHz
2.5G	GPRS	54 Kbit/s	935-960 MHz
2.75G	EDGE	220 Kbit/s	1710-1785 MHz

Tablo 1.1'de 2G kablosuz haberleşme teknolojisinin temel özelliklerine ve 2G – 2.75G arasında değişen nesillerde, maksimum bant genişliği, frekans bant aralığı özelliklerinde yaşanan değişimler de görülmektedir (Muhammad Farooq ve diğerleri, 2013).

1.3.3 Üçüncü Nesil (3G) Kablosuz Haberleşme

Üçüncü nesil kablosuz haberleşme teknolojisi UMTS olarak bilinmektedir. UMTS, 3GPP organizasyonu tarafından geliştirilmiştir. 3G haberleşme teknolojisinde veri iletim hızları 2G'den oldukça hızlıdır. 2000'li yıllarla birlikte 3G'nin sunulmasıyla 2G'ye kıyasla daha hızlı mobil internet erişimini mümkün kıldı. 2G teknolojisinde iletişim, arama yapmak ve mesaj göndermekle sınırlıydı. 3G teknolojinin temel özellikleri arasında kablosuz web tabanlı erişim, multimedya hizmetleri, e-posta ve görüntülü konferans yer alır. 3G standardı, bilgisayar, oyun konsolları ve telefonların aynı kablosuz ağı paylaşabilmesi ve her zaman her yerde internete bağlantılı kalınabilmesi adına paket tabanlı her zaman açık kablosuz iletişim için tasarlanmıştır. 3G vizyonu 3,75G'ye kadar gelişme imkânı bulmuştur. UMTS, teknolojik gelişmelerin temelini atmıştır.

1.3.4 Dördüncü Nesil (4G) Kablosuz Haberleşme

Dördüncü nesil kablosuz haberleşme teknolojisi LTE olarak bilinmektedir. Önceki nesillere kıyasla ağlarının daha iyi ses, multimedya akışını veri odaklı her zaman erişilebilir yüksek hızlarda ve güvenli bir IP tabanlı çözüm olarak sunulmuştur. Kablosuz genişbant erişimi, MMS, görüntülü sohbet, mobil tv, hdtv içeriği ve DVB gibi uygulamalar, 4G şebekesinde bazı süregelen ve yeni hizmetler barındırmıştır (Yiping C. Ve Yuhang Y., 2007). LTE 10, LTE-Advanced olarak bilinmektedir. LTE-A kullanımıyla;

- Maksimum veri indirme limiti 1 Gbps ve maksimum yükleme hızıysa 500 Mbps olmuştur.
- İletim bant genişliği; DL'de 70 MHz'den UL'de 40 MHz'dir.
- Hücre kenarındaki kullanıcı verimi LTE'ye göre 2 kat daha yüksek
- Ortalama kullanıcı verimi LTE'den 3 kat daha yüksek hale gelmiştir.

Tablo 1.2. 3G ile 4G teknolojilerinin karşılaştırılması

Teknoloji	3G	4G
Çekirdek Ağ	Paket Ağ	IP Tabanlı Ağ
Çoklu Erişim	CDMA	CDMA
Standartları	WCDMA, CDMA-200, TD-SCDMA	OFMDA, MC-CDMA
Frekans Bandı	1,8 – 2,5 GHz	2 – 8 GHz
Bant Genişliği	2 Mbps	2 Mbps – 100 Mbps

Tablo 1.2.(devam). 3G ile 4G teknolojilerinin karşılaştırılması

Teknoloji	3G	4G
Üzerindeki Servisler	Yüksek çözünürlüklü video, ses ve veri	HD gerçek zamanlı akış, Nİ, Giyilebilir cihazlar
Çıkış Tarihi	2001	2010

Tablo 1.2’de 3G (Üçüncü nesil) – 4G (Dördüncü nesil) mobil haberleşme sistemleri arasındaki teknoloji farkını açıklamaktadır (X Li ve diğerleri, 2009).

1.3.5 Beşinci Nesil (5G) Kablosuz Haberleşme

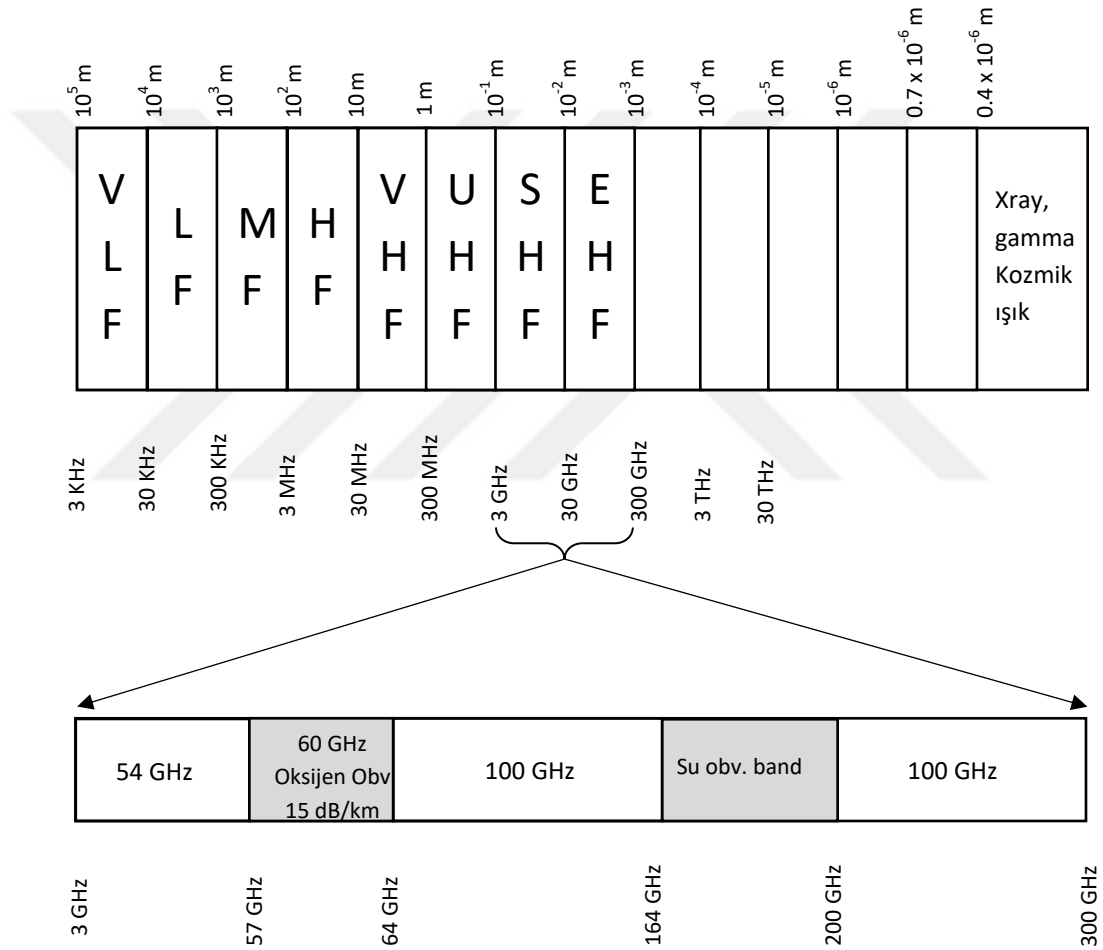
2014’ün son çeyreğinde, 5G kablosuz haberleşme teknolojisi hem akademik dünyada hem de endüstride kayda değer bir etki yarattı. O dönemde geleceğin kablosuz haberleşme teknolojisi olarak görülen 5G, üzerinde barındırdığı yeni teknolojilerle artan veri trafik hacminin karşılanması ana hedef olarak belirlendi. 4G’den 5G’ye geçişte önemli kazanımlar elde edilmiştir. (Rappaport T.S ve diğerleri, 2013)

Tablo 1.3. 4G ile 5G teknolojilerinin karşılaştırılması

Özellik	4G	5G
Maksimum Data İletimi (Gbps)	0,1	100
Hücre Başına Data İletimi (Gbps)	0,001	1
Hücre Spektrum Verimliliği (Bps/Hz)	0,1	10
Mobilite (km/h)	300	500
Yatırım Verimliliği (Bit/\$)	1x	100x
Erişilebilirlik (M/km ²)	0,01	1
Gecikme (Ms)	10	1

Tablo 1.3’te yer alan verilere göre, 5G’nin performansı 4G’den daha gelişmiş olduğu söylenebilir (Alsharif, M.H., Nordin, R, 2017). 5G özelinde yer alan gelişmeler trafik hacminde bir genişleme getirmiştir. Böylece, araştırmacılar mmDalga, massive MIMO ve küçük hücre geliştirmeye odaklanmışlardır. Bu üç teknik araştırmacıların daha çok ilgisini çekmiştir. Spektrum aralıklarını daha verimli kullanabilmek için milimetre dalga teknolojisi önerildi. Buna ek olarak mmDalga teknolojisi gigabitlerce veriyi birkaç kilometrelik uzaklığa

iletebilmektedir. Bu temel farklar, veri iletim kapasiteleri, gecikme süreleri, spektrum verimliliği gibi özelliklerde belirginleşmiştir. 5G, maksimum 100 Gbps veri iletim hızı ve 1 Gbps hücre başına veri iletimi ile 4G'nin çok üzerindeyken (sırasıyla 0,1 ve 0,001 Gbps), spektrum verimliliği 10 Bps/Hz ile 4G'nin 0,1 Bps/Hz'ine kıyasla çok önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca 5G'nin mobilite kapasitesi 500 km/h'a kadar çıkarken, 4G maksimum 300 km/h'de kalır. Yatırım verimliliği açısından da 5G, 100 kat daha fazla performans sunarak daha verimlidir (Alsharif, M.H., Nordin, R, 2017).



Şekil 1.2. Frekans aralıkları

Bugüne kadar geliştirilmiş tüm kablosuz haberleşme teknolojileri, AM/FM radyo, TV, hücresel haberleşme, uydu haberleşmesi, GPS haberleşmesi, bluetooth bağlantıları ultra yüksek frekanslarında, 300 MHz – 3 GHz bant aralığında çalışmaktadır. Tüm bu servislere olan talebin artmasıyla hizmet kalitesi düşebilmektedir (El-Saleh, A. A. ve diğerleri, 2022). Şekil 1.2’de yer alan grafiğe göre 3 GHz – 300 GHz bandında kullanabileceğimiz 252 GHz spektrum potansiyel

olarak mobil geniş bant haberleşme için kullanılabilir olarak durmaktadır (Pi, Z., ve Khan, F., 2011). 57 – 64 GHz aralığı oksijen tarafından tutulduğundan kullanılamamaktadır. 164 ile 200 GHz aralığı ise su buharları tarafından tutulduğundan kullanılamamaktadır. Günümüzde FCC, 300 GHz’e varan spektrum aralığını radyo astronomisi, bulut radarları, havalimanı yollarının pasif görselleştirilmesi, askeri alanda silahları ve metal olmayan objeleri algılamamıza yardımcı olan bir takım algılama sistemlerine ayırmıştır (Federal Communication Commision, 1997). Bu nedenle tüm milimetre dalga spektrumlarının tamamının mobil geniş bant haberleşmesi için kullanılması beklenen bir durum değildir. (Rodwell, M., ve diğerleri, 2013) Milimetre dalga spektrumun %40’ı geniş bant mobil haberleşme uygulamalarına tahsis edilebilmesi durumunda mobil haberleşme için mevcut spektrum tahsisinin yaklaşık 200 katı genişleme olması muhtemeldir. Bugün 20 – 50 GHz bantları ABD ve AB gibi bölgelerde çekirdek şebeke üzerinde sabit uygulamalarda kullanılmaktadır (Pi, Z., & Khan, F., 2011).

Tablo 1.4. Milimetre dalga teknolojisi özellikleri

Konu	Açıklama	
Tanım	30 GHz ile 300 GHz arasındaki elektromanyetik spektrum bölgesi; dalga boyu 1 mm ile 10 mm arasında değişir	
Özellikler	Yüksek veri iletim hızı	Geniş bant iletim sunar
	Küçük anten boyutları	Kompakt tasarımlar sağlar
	Yüksek duyarlılık	Yüksek çözünürlüklü radar sistemleri için uygundur
	Atmosferik duyarlılık	Hava molekülleri ile iletişim sağlar
Zorluklar	Atmosferik kaybın hesaplanması	Yüksek frekans kayıpları yönetilmelidir
	Maliyet	Üretim maliyetleri yüksek olabilir
	Gelişmiş anten teknolojileri	Etkili gönderim ve alım için tasarım zorlukları

Tablo 1.4.(devam). Milimetre dalga teknolojisi özellikleri

Konu	Açıklama
Gelecek Perspektifleri	Teknoloji geliştikçe maliyetlerin düşmesi beklenmektedir
	Daha fazla uygulama alanlarının ortaya çıkması ile iletişimin daha verimli hale gelmesi

Tablo 1.4'te mmDalga teknolojisine dair konu alt başlıklarına göre açıklamaları yer almaktadır. MmDalga teknolojisinin tanımından özelliklerine kullanımındaki zorluklardan gelecek perspektiflerine dair beklentiler yer almaktadır (Bogale, T. E., ve Le, L. B., 2016).

1.3.6 Altıncı Nesil (6G) Kablosuz Haberleşme

0.1 THz ila 3 THz arasındaki frekanslar, kullanılmayan ve keşfedilmemiş spektrum genişliği nedeniyle yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için gelecek vaat etmektedir (Siegel, P. H., 2002). MmDalga ile oluşturulan kablosuz iletişimine yatırılan muazzam fon ve araştırma çabaları ve dünya üzerinde 5G denemelerinin erken başarısı, ticari olarak 5G kablosuz ağlarının 2020 yılına kadar gerçekleşebileceğini tahmin edilmekteydi. 5G kablosuz iletişimde mmDalga kullanımı, 6 GHz'in altındaki frekanslarda çalışan mevcut 4G küresel iletişim sistemlerindeki spektrum sıkıntısını çözecektir. Böylelikle, AG, otonom sürüş, Nİ ve yoğun emek gerektiren fiber optik kurulumun yerini almak üzere kablosuz ana taşıyıcı gibi artan sayıda yeni uygulamaların yanı sıra henüz tasarlanmamış yeni uygulamalar, 5G ağlarının sunacağından daha yüksek veri hızına ve daha az gecikmeye ihtiyaç duyacaktır (Rappaport, T.S. ve diğerleri, 2017). Günümüzde, 60 GHz'lik küresel lisanssız kablosuz mmDalga bandında yaklaşık 7 GHz bant genişliğinde saniyede 100 Gbps mertebesinde veri hızlarına en az 14 bits/Hz spektral verimliliğe sahip iletim şemaları ile ulaşılabilir (Kürner T. ve Priebe S., 2014). Günümüzde bilinen dijital modülasyon teknikleriyle alıcı-verici bileşenleri kullanılarak elde edilemeyecek sembol doğruluğu gerektirir. Bu nedenle, 100 Gbps veya daha yüksek veri hızları mevcut spektrumun büyük ölçüde bol olduğu 100 GHz'in üzerindeki frekanslarda gerçekleşecektir (Xing, Y. ve Rappaport T.S.,

2018). 6G, 100 Gbps'ye kadar veri hızları vaat ediyor olsa da gelecekteki 6G ve kablosuz uygulamalarının hayata geçirilmesine muhtemelen on yıl alabileceği ön görülmektedir (Boulogeorgos A. ve diğerleri, 2018). 6G'nin daha yüksek veri hızı sunması 0.1 THz ile 1 THz bantlarında çalışmasından kaynaklanacağı muhtemeldir. THz bandı olarak tanımlanan 100 GHz ile 3 THz arası, son derece hassas bağlantılar üzerinden güvenli iletişimi de mümkün kılması beklenmektedir. Mikron mertebesindeki küçük dalga boyları, son derece küçük fiziksel boyutlarda son derece yüksek kazançlı antenler tasarlanabilmesini mümkün kılabilir.

THz frekanslarında ticari alıcı-vericiler oluşturmak için önümüzde zorluklar olsa da tüm küresel araştırmalar bu zorlukları aşmayı hedeflemektedir. RF transistörlerin küçük dalga boyları ve fiziksel boyutları nedeniyle oldukça yoğun anten dizeleri için yeni mimarilere ihtiyaç duyulacak olsa da yarı iletken endüstrisinin bu zorlukları çözeceği beklenmektedir (Rodwell M. ve diğerleri, 2018). THz'de çok yüksek atmosferik zayıflama olduğu için yüksek frekanslarında, özellikle 800 GHz'in üzerindeki frekanslarda sabit bir fiziksel anten için kazancının yönlülüğün frekansın karesi ile artması nedeniyle artan yol kaybını telafi etmek için yüksek yönlü "kalem" hüzmeli antenler (anten dizeleri) kullanılması beklenmektedir (MacCartney ve Rappaport T.S, 2019).

MmDalga ve THz ile elde edilen ultra yüksek veri hızları kablosuz yerel ağ, hücresel ağlar, bilgisayar iletişimi, otonom araçlar, robotik kontrolcüler, yüksek çözünürlüklü holografik oyun, eğlence, video konferans, veri merkezleri arasındaki bağlantılarda süper yüksek indirme hızları sağlayabilmesi beklenmektedir (Bogale, T. E., ve Le, L. B., 2016). Son derece yüksek veri hızlarına ek olarak, 6G ağlarında ve ötesinde gelişmesi muhtemel olan mmDalga ve THz sistemleri için aşağıdaki tabloda yer alan umut verici uygulamalar olması muhtemeldir.

Tablo 1.5. 6G'de potansiyel uygulamalar

6G'de olması Muhtemel Milimetre Dalga & THz Uygulamaları	
Uygulama Alanı	Uygulama
Robotik kontrol Drone kontrol Otonom araçlar	Kablosuz Bilişim

Tablo 1.5.(devam). 6G’de potansiyel uygulamalar

6G’de olması Muhtemel Milimetre Dalga & THz Uygulamaları	
Uygulama Alanı	Uygulama
Hava kalitesi algılama Kişisel sağlık izleme sistemi Hareket algılama Patlama algılama ve gaz kaçağı algılama	Algılama
Karanlık alanları görüntüleme (mm- Dalga ile)	Görüntüleme

Tablo 1.5’te 6G’de olması muhtemel uygulamalar yer almaktadır (T. S. Rappaport, 2019).

Kablosuz bilişim, büyük hesaplamaların gerçek zamanlı işlem yapan cihaz veya makineden uzakta yapılmasını sağlayan bir iletişim bağlantısı sağlama kavramıdır. Örneğin hafif bir uçan nesneler filosu düşünüldüğünde, cihaz üzerinde büyük hesaplamalar yapabilecek işlemci gücüne sahip olmayabilir ancak, yeterince geniş bir bant ve yeterince hızlı veri iletimi ile son derece karmaşık olan görme, algılama gibi görevler için gerçek zamanlı hesaplamalar mümkün olabileceği muhtemeldir.

Algılama uygulamaları yayılan sinyalin gözlemlenebilir verisine bağlı olarak çevre hakkında bilgi edinmek için ölçülen ortamın THz altı dalga boyu ve frekans seçiciliğinden yararlanır. Bu uygulamalar hem 100 GHz’in üzerindeki çok daha geniş kanal bant aralığından hem de çeşitli malzemelerin frekans seçici titreşimlerinden ve emiliminden faydalanabilir. Gerekli kadar yüksek kazançlı antenlerin küçük bir fiziksel form faktöründe uygulanabilmesi, aynı zamanda çok yönlü algılama uygulamalarına da olanak sağlayabilir ve frekanslar arttıkça uzamsal çözünürlük dalga boyunun bir fonksiyonu olarak çok daha ince hale gelir ve böylece frekanslar 300 GHz’i aştıkça milimetre altı uzamsal farklılaşmaya olanak sağlar (Taylor, Z., ve diğerleri, 2015)

MmDalga ve THz frekanslarındaki radar, hava koşullarının ve ortam ışığının THz kanalı üzerindeki etkisinin daha az olması nedeniyle LIDAR ışık ve kızılötesi tabanlı görüntülemeden daha etkilidir. LIDAR daha yüksek çözünürlük sağlayabilse de sisli, yağmurlu veyahut bulutlu havalarda LIDAR’ın

çalışmayacağını belirtmek gerekir (Siddiky, M. N. A. ve diğerleri, 2013). Bu nedenle mmDalga ve THz radarları kötü hava koşullarında sürüşe veya uçuşa yardımcı olmak için askeri ve ulusal güvenlikte kullanılabilir. Birkaç yüz gigahertzde çalışan yüksek çözünürlüklü video radarları, TV benzeri bir görüntü kalitesi sağlamak için yeterli olacak ve daha düşük frekanslardaki (12.5 GHz'in altında) radarların üretilmesi muhtemeldir (Li, O., ve diğerleri, 2021)

6G endüstrisi 2025-2030 yılları arasında %70'lik birleşik büyüme performansı ile devam ettiği takdirde 2030 yılında 4.1 Milyar ABD doları bir değerlemeye ulaşması beklenmektedir. Tüm 6G endüstrisi içinde bulut bilişim, yapay zekâ yanında iletişim altyapılarının en büyük pazar payına sahip olması ve belki de 1 Milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Önemli 6G bileşeni olan yapay zekâ sistem yonga pazarının 240 Milyon ABD dolarına ulaşabilmesi tahmin edilmektedir. Bunun yanında 6G teknolojisinin dünya çapında ekonomiler üzerinde büyümeyi destekleyen diğer alanlara; tarım, dijital ekonomi, akıllı şehirler, e-sağlık hizmetlerine de bir etkisi olması beklenebilir. Ekonomik büyüme ve kalkınmayı etkileyebilecek bazı temel yollar oluşturabileceği muhtemeldir (Sharma, V., ve Nayanam, K., 2024).



Şekil 1.3. 6G vizyonu

Şekil 1.3'te 6 temel 6G vizyonunu ifade etmektedir. Spektrum, radyo bağlantısı sağlamada çok önemli bir unsurdur. Her yeni mobil nesilde, yeni bir teknolojinin avantajlarından tam olarak yararlanmaya yardımcı olan öncü bir

spektrum gerektirir. 6G için öncü yeni spektrum bloklarının ileri bağlantı yoluyla daha yüksek kapasiteye ihtiyaç duyan kent merkezleri gibi bölgelerde 7-20 GHz, yüksek bağlantıya ihtiyaç duyulmayan fakat geniş kapsamanın önemli olduğu kırsal kesimlerdeyse 460 – 694 MHz ve 100 Gbps'yi aşan yüksek veri hızları için THz bantlarında olması beklenir. Bu durum 5G'yi veri iletişiminin ötesine taşıyacak ve özellikle uydu sinyallerinin yetersiz kaldığı iç mekânlar ve yer altı tesisleri için konumlandırma doğruluğunu santimetre seviyesine kadar önemli ölçüde iyileştirecekken, 6G Terahertz spektrumundan yararlandığından yerelleştirmeyi bir üst seviyeye çıkaracağı düşünülmektedir. (Nokia Corporation, 6G Explained, 2025).

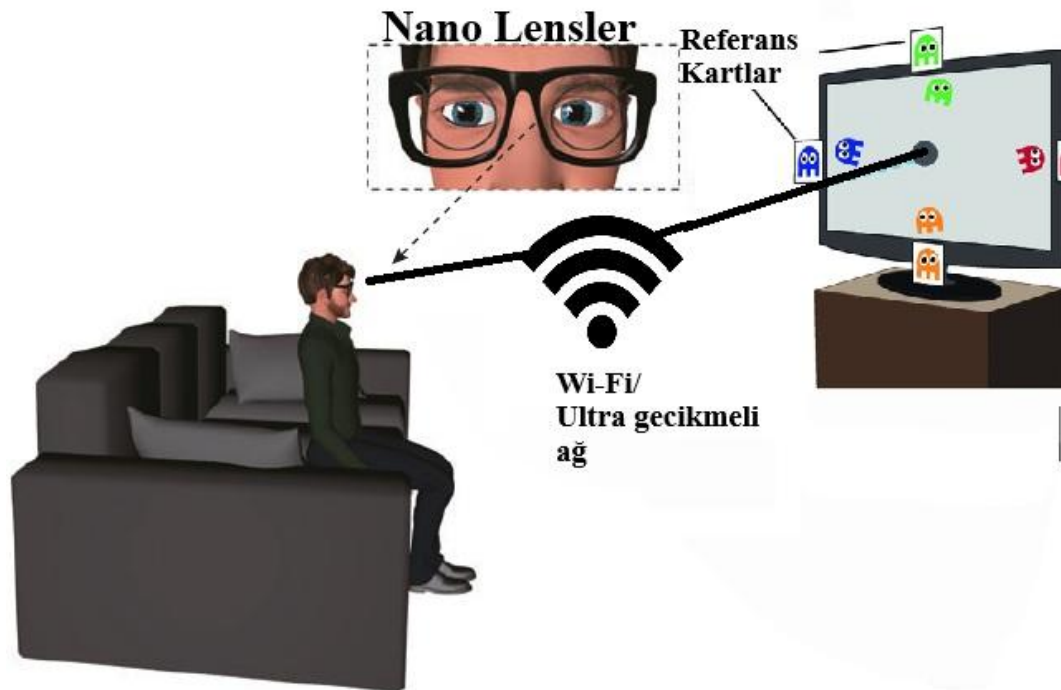
6G'nin dikkat çekici yönlerinden biri de algılayabilen bir ağ olmasıdır. Çevreyi ve insanları algılayabilecek bir ağ olmasıdır. Ağ nesnelerden yansıyan sinyalleri toplayarak tür, şekil, göreceli konum, hız hatta ve belki de malzeme özelliklerini belirleyerek bir durumsal bilgi kaynağı oluşturabilecektir. Bu algılama yöntemi diğer algılamalarla birleştiğinde varlıkların bir aynasını veyahut dijital ikizini oluşturmaya yardımcı olabilir. Böylelikle duyularımız ağın dokunduğu her noktaya genişleyebilir. Bu bilgilerin yapay zekâ ile birleşmesiyle, fiziksel dünyadan yeni iç görüler sağlayarak ağı daha bilişsel hale getirebileceği düşünülmektedir. (Nokia Corporation, 6G Explained, 2025).

5G ile başlayan ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim URLLC hizmeti, 6G'de milisaniyenin altında gecikme süresi de dâhil olmak üzere yoğun bağlantı gereksinimlerini karşılamak için geliştirilmiştir. Ağ güvenilirliği, eş zamanlı iletim, çoklu kablosuz hücre değişimleri, M2M ve yapay zekâ uygulamalarıyla arttırılabileceği muhtemeldir. Ultra düşük gecikme süresi ve gelişmiş güvenilirlikle bir araya geldiğinde yeni nesil mobil geniş bant ağı, gerçek zamanlı video iletimi, holografik deneyimler hatta gerçek zamanlı güncellenen dijital ikiz modelleri ile deneyimi iyileştirecektir. 6G ile belli gereksinimi karşılayan alt ağ kümelerinin oluşturulabilmesi muhtemeldir. Araç alan ağı veyahut vücut alan ağı, makine alanı ağları gibi yüz metreden daha kısa bir alanda yüzlerce sensöre sahip olabilir. Bu sensörlerin söz konusu makine alanının çalışması için son derece yüksek güvenilirlikle yüz mikro saniye içerisinde iletişim kurması muhtemeldir. Taşıtlardaki veya robotlardaki ağların kablosuz hale getirilmesi, bu cihazların tasarımcıları için yeni bir çağın başlangıcı olabilecektir; öyle ki artık uzun ve hantal

kablo sistemleri kurmaları gerekmeyecektir (Nokia Corporation, 6G Explained, 2025).

5G ilk olarak, endüstriyel uygulamalardaki kablolu bağlantı gereksinimini ortadan kaldırmak için çıktı. Ağ üzerindeki talep baskısı arttıkça sensörler daha gelişmiş mimarilere ihtiyaç duyması muhtemeldir. AI ve ML alanındaki gelişmelerden yararlanan yeni ağ ve hizmet düzenleme çözümleri, işletme maliyetlerini azaltacak ve benzeri görülmemiş düzeyde bir ağ otomasyonu sağlayacak olması beklenmektedir (Nokia Corporation, 6G Explained, 2025).

Her türden iletişim ağları siber saldırıların hedefi haline gelmesi muhtemeldir. Tehditlerin dinamik yapısı, sağlam güvenlik mekanizmalarının kurulmasını zorunlu kılmaktadır. 6G ağları, sinyal bozma gibi tehditlere karşı koruma sağlayacak şekilde tasarlanması beklenmektedir. Gerçek ve sanal nesnelerin dijital temsillerini birleştiren yeni karma gerçeklik dünyaları yaratıldığında gizlilik konularının dikkate alınması gerekecektir (Siddiky, M. N. A ve diğerleri, 2025). Sonuç olarak 6G, insan refahını destekleyerek ve henüz tanımlayamadığımız veya hayal edemediğimiz yeni olasılıkları ortaya çıkararak 5G'nin başarılarını daha da ileriye taşıması muhtemeldir.



Şekil 1.4. Nano-sensör uygulaması

Şekil 1.4'te bir nano-sensör uygulaması örneği görülmektedir. Buna göre, sistem dört aşamadan oluşmaktadır (Zhu, H., ve diğerleri, 2024 s. 9). Göze yerleştirilmiş bir sensör ile hareketler vektör analizi ile analog veriden dijital veriye dönüştürülür. Sonrasında dijital olarak modellenen veriler, 6G, THz uygulamalarıyla ultra düşük gecikmeli kararlı ağ üzerinden aynı ortamda bulunan veya uzakta yer alan bir sistemi, örneğin bilgisayar imleç kontrolü, cep telefonu kontrolü ya da uzakta bulunan bir aracı kontrol edebilme olanağına kavuşabilmesi muhtemeldir. Bu durum felçli, somatik sinirlerini kullanamayan hastalar için umut vericidir (Zhu, H ve diğerleri, 2024).



2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmamızda, elektromanyetik iletişim sistemlerinin performansını anlamak amacıyla Friis denklemi temel alınarak serbest uzayda iki anten arasındaki elektromanyetik dalgaların iletim gücünü hesaplayarak bir model geliştirdik. Bu modelde, antenlerin yerleştirileceği ortamın koşulları ve antenlerin özellikleri göz önünde bulundurularak belirli bir frekans aralığında çalışabilmesi muhtemel bir Nİ cihazının uygun frekans değer aralığını çıkardık. MATLAB kullanarak matematiksel denklemler ve algoritmalar üzerinde çalışarak, cihazın iletişim karakteristiklerini inceledik; bu süreçte anten kazancı, dalga boyu ve kayıpsız iletim mesafesi gibi önemli parametreleri analiz ettik. Elde ettiğimiz sonuçları daha anlamlı hale getirmek için Python programlama dili ve Matplotlib kütüphanesinden yararlandık. Bu kütüphane aracılığıyla, verilerin görselleştirilmesi işlemi gerçekleştirildi ve bu sayede grafikler, kullanıcıların analiz sonuçlarını daha kolay yorumlamalarına olanak tanıdı. Görselleştirmelerde, antenler arası mesafe ile iletim gücündeki değişiklikler, cihazın görev yaptığı frekans aralığının etkisi gibi dinamikleri daha net bir şekilde gözler önüne serdik. Ayrıca, bu araştırma, Nİ cihazlarının yükseklik, yönelim gibi çeşitli dış etkenlerden nasıl etkilendiği üzerine değerli bilgiler sağlamaktadır. Son olarak, çalışmamız, gelecekteki Nİ sistemleri için iletişim verimliliğini artırmaya yönelik stratejilerin belirlenmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Göz ortamında sinyal yayılım özellikleri, göz ortamının durumu dikkate alınarak yol kaybının üretilmesini gerektirir. Friis denkleminde (Friis, H.T., 1946.) vericiden r uzaklığında serbest uzayda alınan sinyal gücünün logaritmik formda aşağıdaki gibi ifade edildiği iyi bilinmektedir.

$$P_r = P_t + G_r + G_t + L_{wg} \quad (2.1)$$

Burada P_t iletim gücünü G_r ve G_t gönderici ve alıcı antenlerinin kazancını ve L_{wg} ise dB cinsinden serbest uzayda yol kaybını ifade etmektedir.

$$L_{wg} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{4 \pi f d}{c} \right) [dB] \quad (2.2)$$

Burada d verici ve alıcı terminaller arasındaki uzaklığın metre birimden ifadesini f MHz olarak operasyon frekansını ve c 3×10^8 m/s olarak ifade edilen ışık hızı

sabitini ifade etmektedir. Göz ortamında yayılım için Friis eşitliğinde bir düzeltme faktörü dâhil edilmelidir. Sonuç olarak alınan sinyal şu şekilde yazılabilir.

$$L_{wg} = L_0 + L_{goz} \quad (2.3)$$

Burada $L_{wg} = L_0 + L_{goz}$, L_{goz} , gözdeki yayılımın neden olduğu ek yol kaybını ifade etmektedir. Göz ortamında EM dalga yayılımının havadakine kıyasla aşağıdaki farklılıkları dikkate alınarak hesaplanır. Eş. (2.1)'deki sinyal hızı ve dolayısıyla λ dalga boyu farklıdır ve eş. (2.2) dalganın genliği frekansa göre zayıflayacaktır. Göz ortamında ek yol kaybı L_{goz} , iki bileşenden oluşur bunlar $L_{goz} = L_\beta + L_\alpha$ 'dır. Burada L_β , sinyalin göz ortamında dalga boyunun λ serbest uzaydaki dalga boyuna λ_0 kıyasla farkından kaynaklanan zayıflama kaybı ve L_α ise zayıflama sabiti α ile zayıflamanın neden olduğu iletim kaybıdır. Sonuç olarak $L_\beta = 20 \log(\lambda_0/\lambda)$ ve $L_\alpha = e^{2\alpha d}$. Dalga boyu $\lambda = 2\pi/\beta$ ve serbest uzay için $\lambda_0 = c/f$ 'dir. Burada β faz kaydırma sabiti, $c = 3 \times 10^8$ m/s ve f operasyon frekansı L_β ve L_α dB cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$L_\beta = 154 - 20 \log(f) + 20 \log(\beta) \text{ (dB)}$$

$$L_{goz} = L_\beta + L_\alpha \text{ ise}$$

$$L_\alpha = 8,69\alpha d \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

Serbest uzaydaki yol kaybının $L_0 = 20 \log(4\pi d/\lambda_0)$ ve göz ortamındaki EM dalgaların yol kaybı L_{wo}

$$L_{wo} = 6.4 + 20 \log(d) + 20 \log(\beta) + 8.69\alpha d \quad (2.5)$$

(2.5) numaralı denklem elde edilir. Burada d metre cinsinden uzaklık ifadesi, α zayıflama sabiti, 1/m cinsinden ve faz değişim sabiti β radyan/m'dir. (2.5) numaralı denklemde zayıflama sabiti α ve faz değişim sabiti β , suyun dielektrik özellikleriyle bağlantılıdır. Suyun dielektrik ifadesi, $\gamma = \alpha + j\beta$ eşitlikle ifade edilir.

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left[1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 - 1 \right]} \quad (2.6)$$

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left[1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 + 1 \right]} \quad (2.7)$$

Burada f operasyon frekansını, μ manyetik geçirgenliği ϵ' ve ϵ'' göz ortamındaki dielektrik sabitinin sırasıyla gerçekte ve sanal kısımlarını ifade eder. Göz ortamında THz frekanslarının yayılma davranışı tek yönlü bir kanal olarak modellenilebilir ve yol kaybının değeri (2.5) denklemiyle hesaplanır. Buna göre örneğin 0.1 THz frekansında sinyal, $\gamma = 32 + j65$ olmaktadır. Sistemin BHO'sunu hesaplayabilmek için İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama modülasyon türü seçilerek tüm frekans değerleri için uygulanmıştır. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama modülasyonunun seçilmesindeki amaç modülasyon türleri içerisinde ortamdan en az etkilenen ve en uzak mesafeye veri gönderebilen modülasyon türü olmasından ileri gelmektedir. Dolayısıyla BHO,

$$BHO = 0.5 \operatorname{erfc}(\sqrt{SGO}) \quad (2.8)$$

ile hesaplanır. Burada $\operatorname{erfc}(\cdot)$ hata fonksiyonunu simgeler, SGO ise sinyal gürültü oranını ifade eder.

$$SGO = P_t - P_r - P_n \quad (2.9)$$

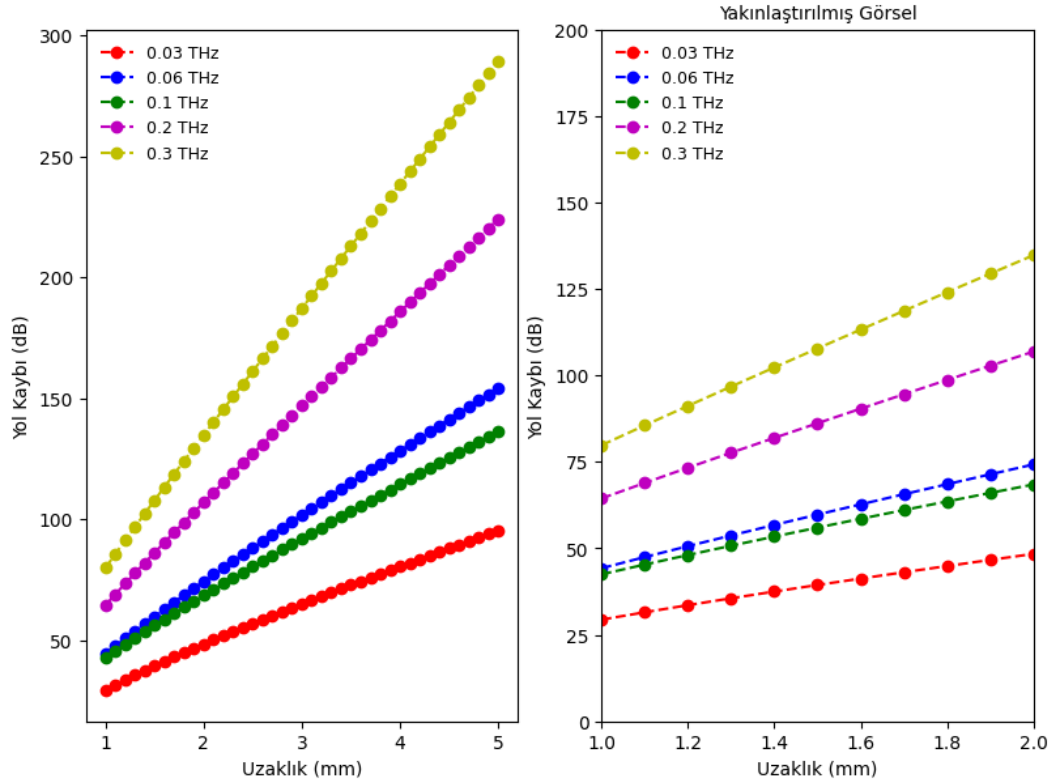
olarak temsil edilir. P_t iletim gücünü, P_r toplam yol kaybı, P_n ise gürültünün gücünü sembolize eder. Yapılan hesaplamalarda P_t iletim gücü -10 dBm ile +10 dBm arasında değişmektedir. P_n ise eş. (2.2)'ye göre hesaplanmıştır. Buna göre Tablo 3.1'de yer alan göz ortamında elektriksel yayılım verileri kullanılarak elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 3.1'de verilmiştir.

3. BULGULAR

Tablo 3.1. Göz ortamının 0.03 THz - 0.3 THz arasındaki ϵ' ve ϵ'' değerleri

Frekans(THz)	ϵ'	ϵ''
0.03	22.0	25.0
0.06	12.0	18.0
0.1	9.0	7.0
0.2	8.0	6.0
0.3	7.0	5.0

Tablo 3.1’de yer alan göz ortamının dielektrik sabiti değerleri (Mizuno, M. ve diğerleri, 2021) makalesinden alınmıştır. Tablo 3.1’de yer alan değerler kullanılarak “MATERYAL ve YÖNTEM” ana başlığı altında yapılan hesaplama sonucunda elde edilen ve detaylarına bu bölümde değindiğimiz tüm tablo ve grafikler algoritmanın ürettiği sonuçlar olduğundan atıfta bulunulmamıştır. Grafikler ve tablolarla ilgili sonuçların yorumlanmasına yer verilmiştir.



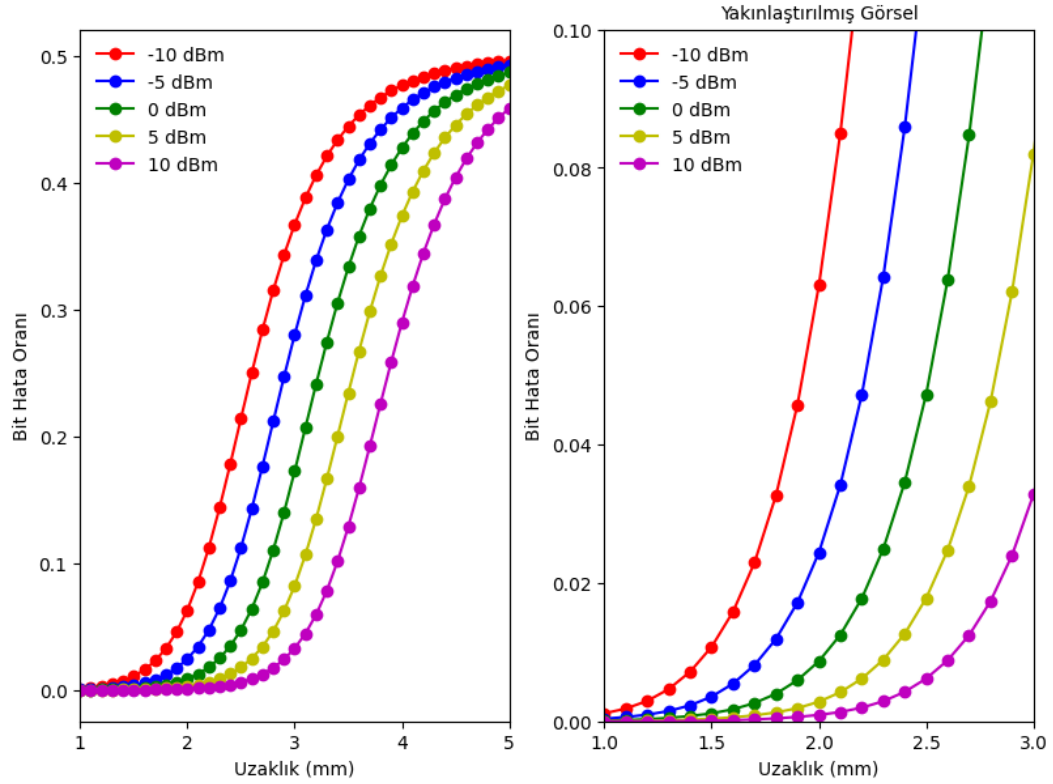
Şekil 3.1. 0.03 THz- 0.3 THz frekanslarında yol kaybı değişimi

Şekil 3.1, Tablo 3.1'deki parametrelerle gerçekleştirilmiş hesaplamaların sonucunda elde edilen grafiksel verileri kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Bu grafik, 0.03 THz ile 0.3 THz aralığında sinyalin göz ortamındaki kaybını dikkate alarak, frekans değişiminin iletişimdeki etkilerini detaylı bir biçimde ortaya

koymaktadır. Yakınlaştırılmış görselde 1-2 mm arasında filtrelenmiş verilerini göstermekte ve bu mesafelerde frekans artışının yol kaybına etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Yapılan analizler sonucunda, frekansların artmasıyla birlikte göz ortamında yaşanan yol kaybının belirgin bir şekilde yükselmesi dikkat çekmektedir. Bu durum, iletişim sistemlerinin tasarımında önemli bir çelişki yaratmaktadır; zira kullanılan frekansların azaltılması yol kaybını düşürmekteyken, bu uygulama aynı zamanda anten boyutlarının artmasına yol açmaktadır.

0.3 THz seviyesine doğru çıktıkça, yol kaybındaki artış daha da belirgin hale gelmektedir. THz ortamında dielektrik sabitleri arasında net bir orantı yoktur. Frekans değişimlerinin kayıplar üzerindeki etkisini karmaşıklştırmaktadır. Örneğin, 0.03 THz frekansında yol kaybı 25 dB ile 95 dB arasında değişirken, 100 dB civarında bir sistem tasarlandığı varsayıldığında, bu frekansta iletişimin 5 mm'ye kadar mümkün olabileceği gözlemlenmektedir. Öte yandan, 0.3 THz'de kayıpların 290 dB'e ulaşması, sistem tasarımını zorlaştırmaktadır. Bu bulgular, frekansın artmasının aynı iletim mesafesine sahip olabilecek sistemde yol kaybını artması gerektiği sonucunu doğurmuştur. Bu veriler sistem tasarımı ile ilgili stratejilerin belirlenmesine de rehberlik etmektedir. Örneğin, daha yüksek frekanslarda çalışmanın getirdiği zorlukları aşmak için anten tasarımı ve yerleşiminde bazı yenilikçi çözümler geliştirmek gerekebilir. Anten boyutları ile frekans arasındaki ilişki, iletişim sistemlerinin performansını doğrudan etkileyen önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, en uygun anten boyutlarının belirlenmesi ve frekansın en verimli şekilde kullanılması, iletişim sistemlerinin etkinliğini artırma ve kayıpları minimize etme açısından kritik bir strateji haline gelmiştir. Dolayısıyla, gelecekte THz iletişim sistemlerinin gelişimi, bu tür önemli verilerin dikkate alınarak yapılacak tasarım kararlarına bağlı olarak şekillenecektir. Nano haberleşme uygulamalarında yüksek hız ve güvenilirlik gerektiren sistemlerde, bu tür araştırmalar ve bulguların uygulanması, veri iletim kalitesinin artırılması ve iletişim sistem kurulumu açısından büyük önem taşımaktadır. Örneğin, MIMO anten sistemleri ve beamforming (ışınlama) teknikleri gibi yenilikçi yaklaşımlar, frekansı etkin bir şekilde kullanarak sistem performansını artırabilir ve kayıpları en aza indirebilir (Rappaport T. S ve diğerleri 2013). Bu türden birbirine yakın teknolojilerin uygulama alanları, otonom araç sistemlerinden, sanal gerçeklik uygulamalarına ve yüksek hızlı veri iletimine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Bu bağlamda, modelleme çalışmalarıyla farklı

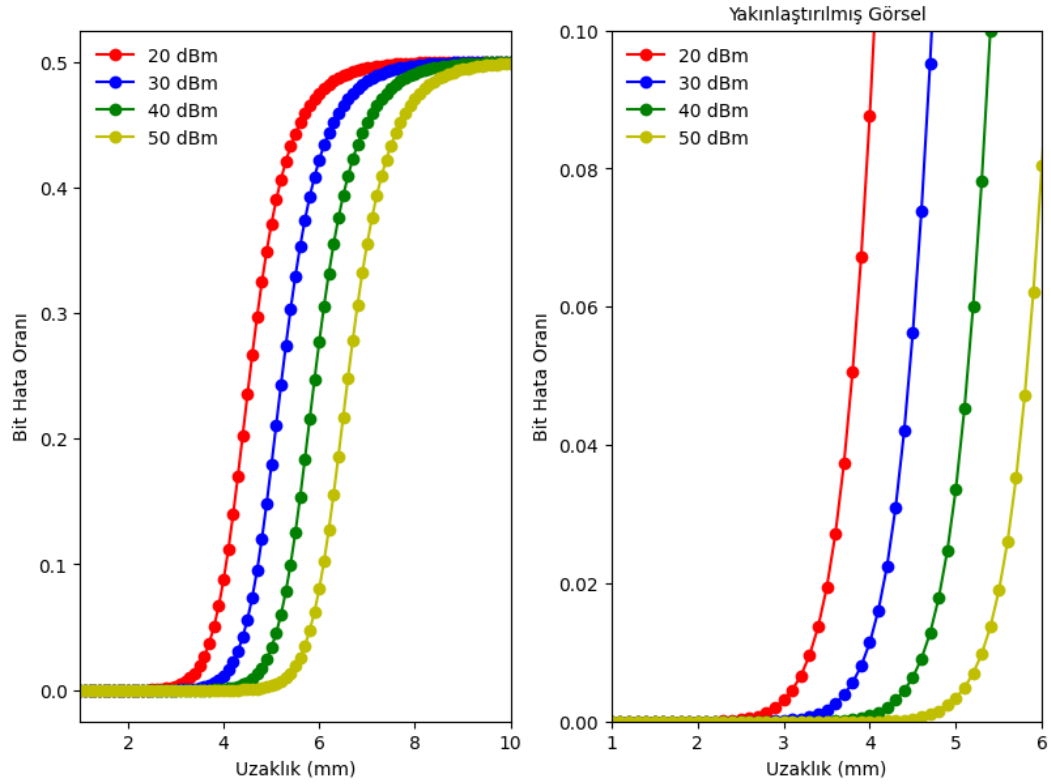
senaryolar altında iletişim sistemlerinin performansını değerlendirmek için hayati bir rol oynayabilmektedir. Böylelikle, toplanan veriler ile daha etkili iletişim stratejileri geliştirilmesi mümkün hâle gelebilmektedir.



Şekil 3.2. 0.03 THz frekansında BHO değişimi

Şekil 3.2, Tablo 3.1'deki parametrelerle gerçekleştirilmiş hesaplamaların sonucunda elde edilen grafiksel verileri kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. 0.03 THz iletim frekansındaki iletişim sisteminin performansını kapsamlı bir şekilde analiz eden iki ana grafikten oluşmaktadır. Soldaki grafik, -10 dB ile +10 dB arasındaki iletim güçlerinin mesafeye bağlı olarak BHO üzerindeki etkilerini göstermektedir. Bu grafik, iletim gücünün artmasıyla birlikte sistemin iletişim menziline de genişlediğini ortaya koymaktadır. Özellikle, -10 dB ile +10 dB arasında değişen iletim gücüne sahip bir sistemin iletişim menziline yaklaşık 1.2 ila 2.3 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Sağdaki grafik ise, daha özellikli bir durum göz önünde bulundurularak 1-2 mm'lik iletim mesafesinde iletim gücündeki değişimlerin BHO üzerindeki etkisini göstermektedir. Anten kazancı düşük iletim sistemlerinde dahi, mesafe artışının BHO'daki olumsuz etkilerinin belirginleştiğini ifade etmektedir. Özellikle +10 dB anten kazancına sahip bir lens tasarlandığında, bu tasarımın 0.03 THz frekansı kullanılarak gerçekleştirilmesi durumunda, 2.3 mm aralığına kadar neredeyse kayıpsız bir veri transferinin gerçekleşebileceği öngörülmektedir. Bu

durum, yüksek kazançlı anten tasarımlarının iletişim menzilinın artırılması açısından önemli bir strateji olduğunun altını çizmektedir.

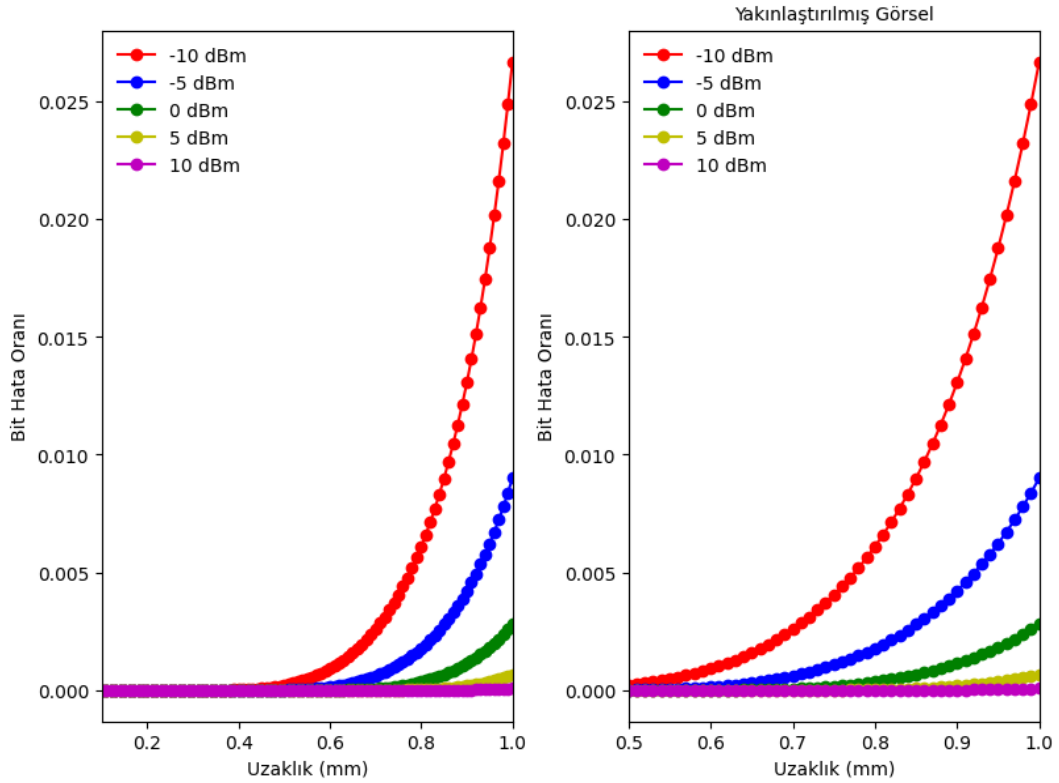


Şekil 3.3. 0.03 THz 20-50 dB arasında iletim mesafesi değişimi

Şekil 3.3, Tablo 3.1'deki parametrelerle gerçekleştirilmiş hesaplamaların sonucunda elde edilen grafiksel verileri kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. 0.03 THz frekansında anten gücü 50 dB olduğunda kayıpsız olarak nitelendirebileceğimiz iletim mesafesi yaklaşık olarak 4,4 mm olmaktadır. Anten gücünün 50 dB seviyesine ulaşmasına rağmen iletişim mesafesinde kayda değer bir iyileşme sağlanmadığı görülmekle beraber yüksek frekanslarda iletişim teknolojilerinin karmaşıklığını ve sınırlamalarını gözler önüne sermektedir. Bu çarpıcı sonuç, çok yüksek bir anten gücüne ulaşmanın, beklenen performans artışını sağlamadığını göstermektedir. Anten gücünü 5 kat artırmak, yalnızca iletişim mesafesinin yaklaşık 2.1 mm kadar artmasına neden olmuştur; bu da güç artırımının etkisinin, iletişim mesafesi üzerinde sınırlı olduğunu açıklamaktadır.

Yüksek frekanslarda, iletişimin daha kısa dalga boylarına sahip olduğu ve dolayısıyla atmosferdeki parçacıklarla etkileşimlerinin daha belirgin hale geldiği bilinir. Bu durum, frekans arttıkça iletim kayıplarının da artmasına yol açar. Sayısız kaynaktan gelen çeşitli yapısal ve ortam kayıpları, anten gücünün artırılmasının

iletişim mesafesini genişletmedeki etkinliğini azaltmaktadır. Yüksek frekanslarda, her ne kadar anten kazancı artırılrsa da bu kazanç, iletişim yolu boyunca meydana gelen kayıplarla dengelendiği için dışarıda beklenen kazanç sağlanmamaktadır. Bunun yanı sıra, iletim gücünü artırmanın diğer olumsuz yan etkileri de dikkate alınmalıdır. Tasarlanan sistemde anten kazancının artıyor olması, cihazların enerji tüketimini artırır ve bu da bataryalarının daha hızlı tükenmesine neden olur. Böyle bir durumda cihazın günlük kullanımında istenmeyen kesintilere yol açabilir ve cihazın verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Akıllı cihazların yanı sıra Nİ



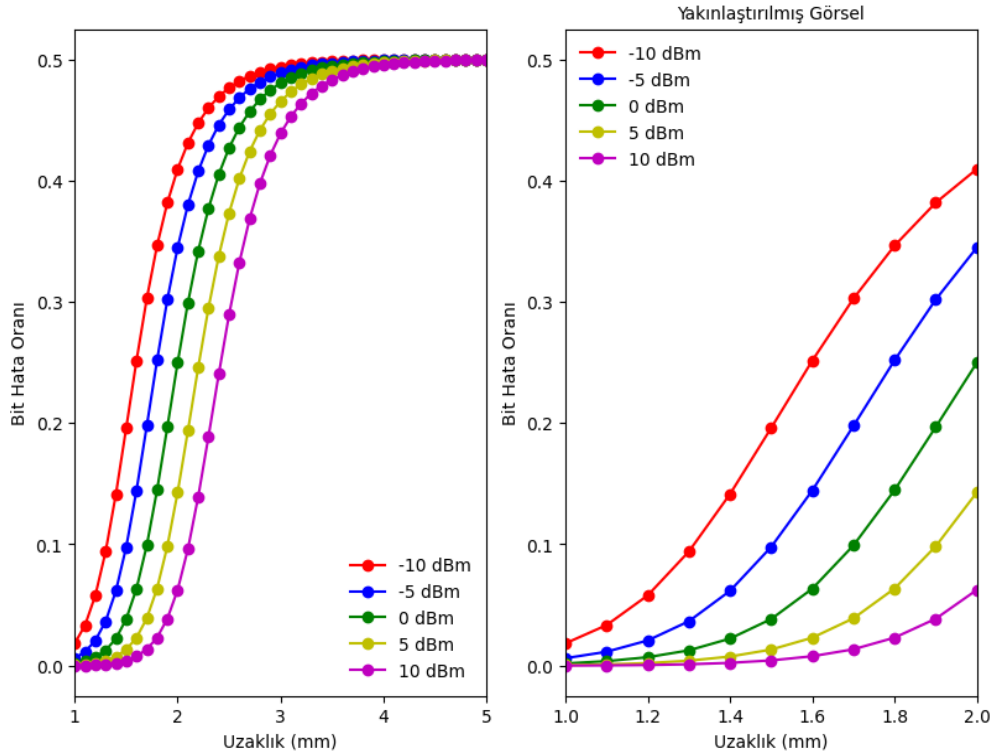
şekil 3.4. 0.06 THz frekansında BHO değişimi

uygulamaları, uzaktan iletişim ve yüksek hızlı veri transferi gibi modern teknolojilerin yaygınlığı göz önüne alındığında, bu durum daha da kritik bir hl alır.

şekil 3.4, Tablo 3.1'deki parametrelerle gerçekleştirilmiş hesaplamaların sonucunda elde edilen grafiksel verileri kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. 0.06 THz frekansında -10 dB ile +10 dB arasında değişen iletim kazancına sahip bir sistemde, kayıpsız iletim mesafesi yaklaşık olarak 1.0 mm dolaylarında gerçekleşmektedir. Bu düşük mesafe, yüksek frekansların iletişim üzerindeki etkisini gözler önüne sermekte ve sistemin etkinliğini belirgin bir şekilde sınırlamaktadır. Frekans arttığında, iletim kayıpları genellikle artar; bu durum, malzeme ve atmosferin yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları emme eğiliminden kaynaklanmaktadır.

Bu bağlamda, 0.03 THz frekansında elde edilen yaklaşık 2.3 mm kayıpsız iletim mesafesi, frekansın iki katına çıkmasıyla birlikte %56'lık bir düşüş ile 1.0 mm'ye kadar gerileyerek, sistemin performansında ciddi bir azalmaya sebep olmuştur. Böylece, yüksek frekanslar altında iletişim yaparken karşılaşılan zorluklar daha belirgin hale gelmiştir. Yüksek frekanslı sistemlerin tasarımında, sadece iletim mesafesindeki azalmanın değil, aynı zamanda anten tasarımında karşılaşılabilecek çeşitli zorlukların da dikkate alınması gerekmektedir. Yüksek frekanslarda iletim yapabilmek için kullanılan antenlerin boyutları, dalga boyunun kısalması nedeniyle yeniden düşünülmelidir. Antenlerin daha küçük boyutlarda tasarlanması, mühendislik açısından bazı karmaşıklıklar getirmekte ve daha fazla hesaplama yapılmasını gerektirebilmektedir.

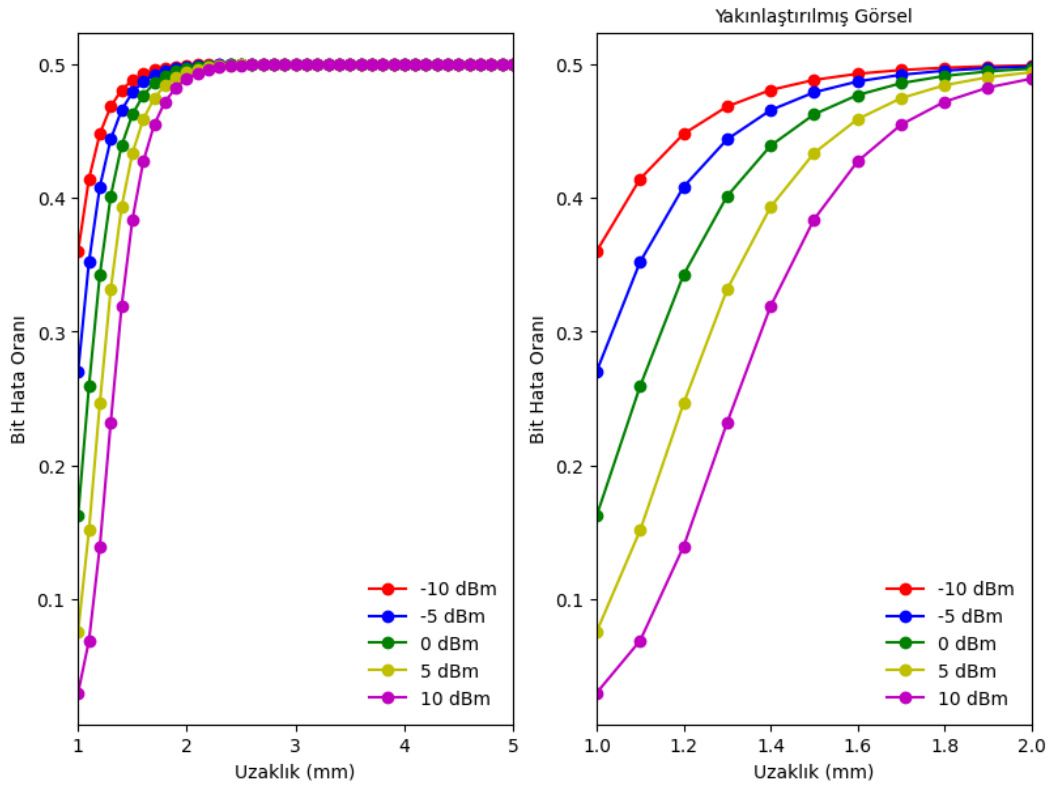
Sonuç olarak, 0.06 THz ile 0.03 THz frekansları arasındaki kayıpsız iletim mesafesindeki bu önemli değişimler, yalnızca iletişim sisteminin performansına olan etkilerini göstermektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte, iletişim altyapılarının hem yüksek veri iletim kapasiteleri sağlaması, hem de düşük kayıp oranları ile çalışabilmesi hedeflenmekte; bu doğrultuda yapılan araştırmalar, iletişim sistemlerinin gelecekteki uygulamaları için büyük bir potansiyel taşımaktadır.



Şekil 3.5. 0.1 THz frekansında BHO değişimi

Şekil 3.5, Tablo 3.1'deki parametrelerle gerçekleştirilmiş hesaplamaların sonucunda elde edilen grafiksel verileri kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Bu

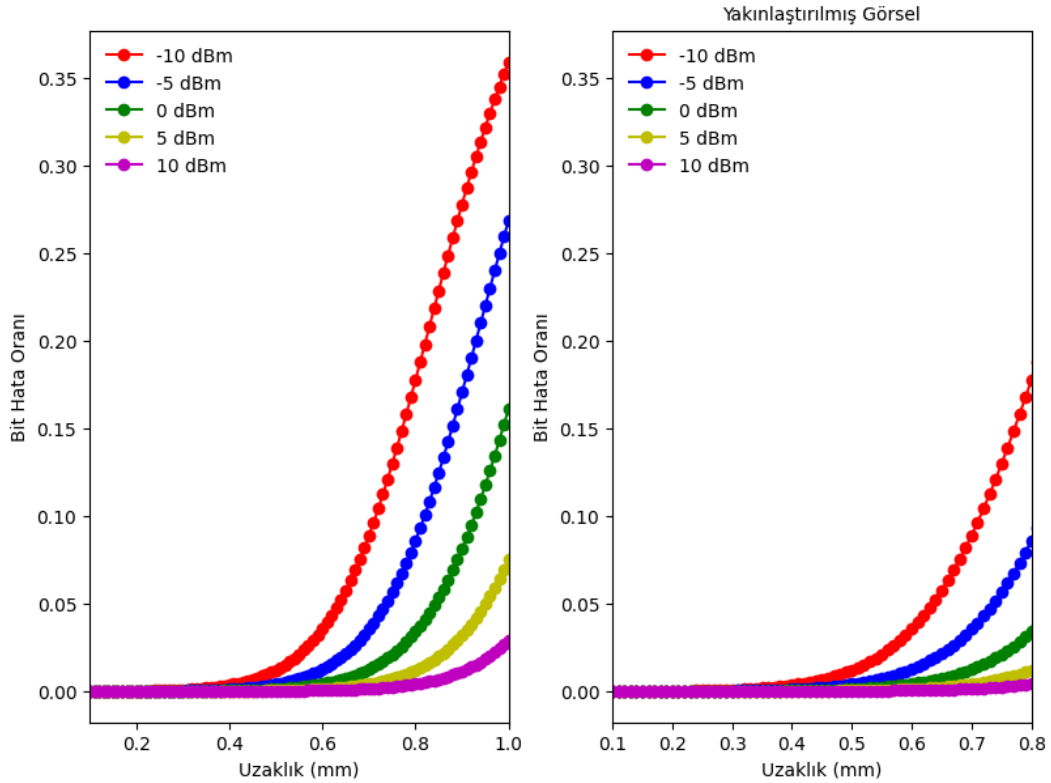
grafik, 0.1 THz iletim frekansında -10 dB ile +10 dB arasında değişen iletim kazançlarının, iletim mesafesine göre değişen BHO oranlarını göstermektedir. Sağdaki grafik, özellikle 1-2 mm aralığında filtrelenmiş verileri öne çıkartarak, iletim gücündeki artışın yol kaybına etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Yapılan analizler, iletim gücündeki artışla birlikte göz ortamında kayıpsız iletim mesafesinin uzadığını göstermektedir. Örneğin, 0.06 THz frekansında +10 dB kazanca sahip bir sistemde kayıpsız iletim mesafesi 1.0 mm'ye ulaşmıştır. Bu durum, 0.03 THz frekansına göre %56'lık bir kayıp anlamına gelmektedir. 0.06 THz'de kayıpsız yol mesafesi de 1.0 mm, 0.1 THz frekansında bu mesafe 1.0 mm olup değişiklik göstermemiştir. Sistem frekansını yaklaşık %60 artırmamıza rağmen, kayıpsız iletim mesafesinde artış yaşanmamıştır. Bunun nedeni göz ortamı için kullanılan sistem frekansına karşılık gelen dielektrik iletim sabitlerinin değişiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.6. 0.2 THz frekansında BHO değişimi

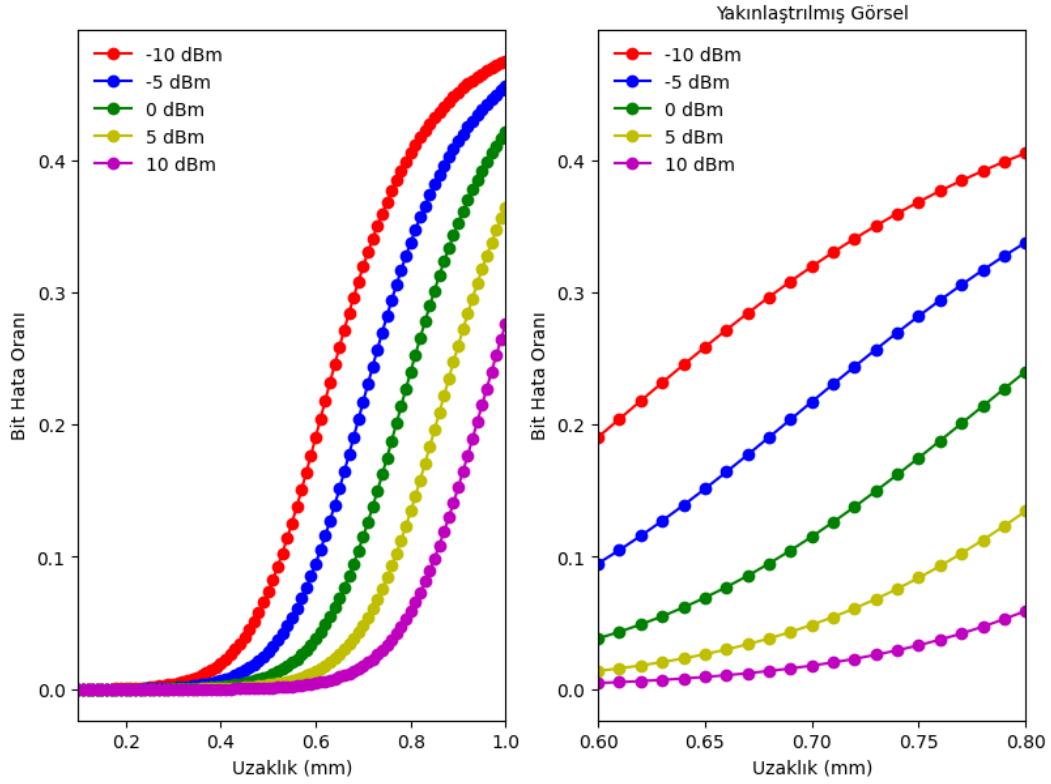
Şekil 3.6, Tablo 3.1'deki parametrelerle elde edilen hesaplamaların grafiksel verilerini detaylı bir şekilde sunmaktadır. Bu grafik, 0.2 THz iletim frekansında -10 dB ile +10 dB arasında değişen iletim kazançlarının, iletim mesafesine bağlı BHO oranları üzerindeki değişimlerini göstermektedir. Grafikten anlaşıldığı üzere kayıpsız iletişim mesafesi 1 mm civarına gerilemiştir. Bu nedenle daha net bir

yorumda bulunabilmek adına 0.1 ile 1 mm arasındaki grafiğe odaklanmamız gerekecektir.



Şekil 3.7. 0.2 THz frekansında 0.1 – 1.0 mm arasındaki BHO değişimi

Şekil 3.7, Tablo 3.1'deki parametrelerle gerçekleştirilmiş hesaplamaların sonucunda elde edilen grafiksel verileri kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Şekil 3.7 grafiğinden anlaşılabileceği üzere, +10 dB iletim gücüne sahip bir sistem için yaklaşık 0.75 mm kayıpsız iletim mesafesi olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla 0.03 THz frekansında +10 dB iletim gücüne sahip sistemle karşılaştırıldığında %67 oranında bir yoldan kayıp olacağını göstermektedir. Yine 0.06 ve 0.1 THz frekanslarında +10 dB iletim gücüne sahip bir sisteme oranla %25'tir. Bu bulgular benzer iletim gücüne sahip sistemlerde frekans artışının yol kaybını arttırdığını göstermektedir. Bunun sonucunda, iletişim sistemleri geliştirirken, daha yüksek frekansların sağladığı teorik avantajların uygulamada sınırlı kalabileceği dikkate alınmalıdır. Sonuç itibarıyla, bu tür analizler, iletişim mühendisliği alanında etkin ve verimli sistem tasarımı için kritik bir rol oynamakta, yol kaybı iletim mesafesinin artırılmasında başarılı bir strateji oluşturulmasına yardımcı olmaktadır. Bu tür verilerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi hem laboratuvar hem de gerçek dünya uygulamalarındaki performansı artırmak için oldukça önemlidir.



Şekil 3.8. 0.3 THz frekansında BHO değişimi

Şekil 3.8, Tablo 3.1'deki parametrelerle gerçekleştirilmiş hesaplamaların sonucunda elde edilen grafiksel verileri kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Şekil 3.8'de sunulan grafiksel veriler, 0.3 THz frekansında sinyalin iletim gücündeki değişimlerin kayıpsız iletim mesafesi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. 0.3 THz frekansında kayıpsız iletim mesafesi 0.55 mm düzeyine gerilemiştir. Yüksek frekansların iletim performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. İncelenen verilere göre, 0.03 THz frekansında +10 dB anten kazancına sahip bir sistemde elde edilen kayıpsız iletim verileri ile karşılaştırıldığında, %76 oranında bir kayıp yaşanmıştır. 0.06 THz frekansında +10 dB anten kazancına sahip bir sisteme göre bu kayıp %54, 0.1 THz +10 dB anten kazancına sahip bir sistemle de %54, 0.2 THz +10 dB anten kazancına sahip bir sistemle ise %27 oranında yol kaybı gerçekleşmiştir. Bu sayısal veriler ışığında frekansın arttıkça kayıpsız iletim mesafesinin belirgin bir şekilde daraldığını göstermektedir. Yakınlaştırılmış görselde yer alan veriler, özellikle 0.6 mm - 0.8 mm aralığında filtrelenmiş olup, güç artışının yol kaybı üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Güç seviyelerinin artışı, belirli bir noktaya kadar iletim kaybını azaltabilirken, sonrasında frekansta karşılaşılan kayıplar, iletim mesafesinin kısılmasına neden olmaktadır. Bu durum, iletim sistemlerinin tasarımında dikkate

alınması gereken önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Yüksek frekanslı iletişim sistemlerinde, kayıpların yönetilmesi ve optimize edilmesi, hem veri iletim hızını artırmak hem de sistem verimliliğini sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Bileşenlerin seçimi, malzeme özellikleri ve tasarım stratejileri gibi faktörlerin, yüksek frekanslı iletişimde kayıpların minimize edilmesinde önemli rol oynadığını belirtmek gerekir. Frekans değişiminin kayıpsız iletim mesafesi üzerindeki etkilerini anlamak, yeni nesil iletişim sistemlerinin geliştirilmesinde kritik bir adım olacaktır. Gelecekteki araştırmaların, alternatif iletim yöntemleri ve malzeme tasarımları üzerinde yoğunlaşarak, yüksek frekanslarda daha kararlı iletim sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

Tablo 3.2. Frekans artışına bağlı olarak değişen yol kaybı değişimi

	Frekans (THz)				
	0.03	0.06	0.1	0.2	0.3
Yol Kaybı (dB)	29.40	44.25	42.49	64.44	79.82
	31.52	47.48	45.32	68.91	85.54
	33.58	50.63	48.07	73.31	91.18
	35.57	53.72	50.76	77.64	96.77
	37.51	56.77	53.40	81.93	102.30
	39.41	59.76	55.99	86.17	107.79
	41.27	62.72	58.55	90.37	113.24
	43.10	65.65	61.07	94.54	118.66
	44.89	68.54	63.56	98.68	124.05
	46.66	71.41	66.03	102.79	129.41
	48.40	74.25	68.47	106.88	134.74
	50.13	77.08	70.89	110.95	140.06
	51.83	79.88	73.29	115.00	145.35
	53.52	82.66	75.67	119.02	150.63
	55.18	85.43	78.04	123.04	155.89
	56.84	88.18	80.39	127.03	161.14
	58.48	90.92	82.73	131.02	166.37
	60.10	93.65	85.05	134.99	171.58
	61.72	96.36	87.36	138.95	176.79
	63.32	99.07	89.66	142.89	181.99
	64.91	101.76	91.95	146.83	187.17
	66.50	104.44	94.23	150.76	192.35
	68.07	107.12	96.50	154.68	197.51
	69.64	109.78	98.77	158.59	202.67
	71.20	112.44	101.02	162.49	207.82
	72.75	115.09	103.27	166.38	212.96
	74.29	117.73	105.51	170.27	218.10

Tablo 3.2. (devam). Frekans artışına bağlı olarak değişen yol kaybı değişimi

	Frekans (THz)				
	0.03	0.06	0.1	0.2	0.3
Yol Kaybı (dB)	75.83	120.37	107.74	174.15	223.23
	77.36	123.00	109.97	178.02	228.35
	78.88	125.62	112.19	181.89	233.47
	80.40	128.24	114.41	185.76	238.58
	81.92	130.85	116.62	189.61	243.68
	83.42	133.46	118.82	193.46	248.78
	84.93	136.06	121.03	197.31	253.88
	86.43	138.66	123.22	201.15	258.97
	87.92	141.26	125.41	204.99	264.05
	89.41	143.85	127.60	208.82	269.13
	90.89	146.43	129.78	212.65	274.21
	92.38	149.01	131.96	216.48	279.28
	93.85	151.59	134.13	220.30	284.35
	95.33	154.16	136.31	224.12	289.42

Tablo 3.2, Tablo 3.1’de yer alan değerlerle “MATERYAL ve YÖNTEM” ana başlığında açıklandığı denklemle elde edilmiştir. Elde ettiğimiz Tablo 3.2’deki verilerde THz ve yol kaybı değerleri incelendiğinde, THz bandındaki elektromanyetik sinyallerin yayılım karakteristikleri hakkında önemli bulgular elde edilmiştir. 0.06 THz değerinden 0.1 THz değerine geçişte gerçekleşen azalma dielektrik sabitindeki değişimden kaynaklanmaktadır. Genel eğilim olarak, frekans arttıkça yol kaybının belirgin şekilde arttığı açıkça görülmektedir. Örneğin, en düşük frekans olan 0.03 THz’de yol kaybı nispeten daha düşük seviyelerde başlarken (yaklaşık 29 dB) en yüksek frekans olan 0.3 THz’de başlangıç yol kaybı dahi önemli ölçüde yükselmiştir. (Yaklaşık 80 dB). Benzer frekans altında listelenen farklı yol kaybı değerleri, değişen dielektrik koşulları temsil etmektedir; ancak her durumda, frekans yükseldikçe, benzer koşullar altında dahi maksimum yol kaybı değerleri dramatik bir artış göstermektedir. Özellikle 0.2 THz ve 0.3 THz frekanslarında gözlemlenen çok yüksek yol kaybı değerleri (200 dB’yi aşan) bu bandın üst kısımlarında uzun mesafeli veya engelli ortamlarda iletişimin ciddi sinyal zayıflama zorluklarıyla karşı karşıya olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, THz bandının özellikle yüksek frekanslarının kullanımının, genellikle çok kısa mesafelerle veya özel uygulamalarla sınırlı kalacağını, güçlü sinyal işleme ve anten teknolojileri gerektireceğini göstermektedir. THz frekans bantlarındaki yol kayıplarının frekansla doğrudan

ilişkili olduğunu ve frekans arttıkça belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Her bir frekans değeri altında listelenen çoklu yol kaybı değerleri, sinyal yayılımının mesafeye, ortama, engellere ve diğer çevresel faktörlere olan yüksek duyarlılığını yansıtmaktadır. Aynı frekansta dahi yol kaybı büyük ölçüde değişebilmektedir. Örneğin 0.03 THz’de ~65 dB’lik bir değişim aralığı mevcut. THz yayılımının oldukça değişken ve bir senaryoya bağımlı olduğunu göstermektedir. 0.2 THz ve 0.3 THz frekanslarındaki çok yüksek yol kaybı değerleri (bazı senaryolarda 280 dB’yi aşan) bu frekanslarda sinyalin birkaç metre veya oda içi gibi çok kısa mesafeler dışında hızla gücünü kaybedeceğine işaret etmektedir.

Tablo 3.3. 0.03 THz ile 0.3 THz arasında sistemin çeşitli güç seviyelerindeki mm cinsinden kayıpsız iletim mesafeleri

Güç(dB)	Frekans(THz)				
	0.03	0.06	0.1	0.2	0.3
-10	1.20	0.68	0.66	0.37	0.27
-5	1.40	0.82	0.82	0.45	0.34
0	1.70	0.97	0.98	0.55	0.40
5	2.00	1.00	1.00	0.65	0.48
10	2.30	1.00	1.00	0.75	0.55

Tablo 3.3, Tablo 3.1’de yer alan değerlerle “MATERYAL ve YÖNTEM” ana başlığında açıklandığı “BHO” denkleminin 0’a eşitlenmesiyle elde edilmiştir.

Tablodan görülebileceği gibi, genellikle frekans arttıkça iletim mesafesi kısalmaktadır; örneğin, 0.03 THz’de mesafeler 1.20 mm ile 2.30 mm arasında değişirken, 0.3 THz’de bu değerler 0.27 mm ile 0.55 mm aralığına düşmektedir. Gücün artması ise her frekansta iletim mesafesini bir miktar artırma eğilimindedir. İnsan korneasının merkezi kalınlığı genellikle yaklaşık 0.5-0.6 mm civarındadır. Tabloda gösterilen iletim mesafeleri (0.27 mm’den 2.30 mm’ye kadar değişen aralıkta olması) birçok frekans ve güç kombinasyonu için kornea kalınlığı ile karşılaştırılabilir düzeydedir veya onu aşmaktadır. Bu durum, özellikle düşük frekanslarda (0.03 THz - 0.3 THz arası) ve daha yüksek güç seviyelerinde elde edilen daha uzun mesafelerin, korneanın içine veya potansiyel olarak içinden bir miktar penetrasyonun mümkün olabileceğini düşündürmektedir.

4. TARTIŞMA

Son yıllarda THz kablosuz haberleşme teknolojisi, hem vücut içi nano haberleşme ağları hem de medikal algılama alanlarında büyük ilgi görmektedir (Mittleman, D. M. , 2018). Bu literatür taraması, THz'nin insan vücudu dokularıyla etkileşimini ve potansiyel uygulamalarını inceleyen önemli çalışmaları özetlemektedir.

THz frekansları, geleneksel radyo frekanslarına göre daha yüksek bant genişliği potansiyeli sunarak, özellikle vücut içi iletişimde yeni kapılar aralamaktadır. Yang (2016) doktora tezinde, insan vücudu dokularındaki in-vivo terahertz iletişim kanalını karakterize etmiştir. Bu çalışma, gelecekteki nano haberleşme ağları için temel bir anlayış sağlamış ve THz dalgalarının vücut içi yayılım özelliklerini, absorpsiyon ve saçılma etkilerini detaylı bir şekilde araştırmıştır. Bu tür bir karakterizasyon, vücut içi tıbbi cihazlar ve sensörler arasında güvenilir ve yüksek hızlı veri aktarımı için kritik öneme sahiptir. Özellikle bu tez çalışmayla üzerinde durduğumuz göz gibi hassas organların incelenmesinde THz'nin potansiyeli dikkat çekicidir.

THz dalgalarının insan dokusu üzerindeki termal etkileri de önemli bir araştırma konusudur. Elmaadawy ve Jornet (2023), yeni nesil arttırılmış gerçeklik başlıklarındaki kablosuz alt-THz dalgaların insan gözü üzerindeki termal etkisini incelemiştir. Bu çalışma, THz tabanlı cihazların güvenli kullanım için termal yönetim stratejilerinin geliştirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Yüksek frekanslı dalgaların doku tarafından emilimi, lokalize ısınmaya neden olabilir ve bu durum, özellikle uzun süreli maruziyetlerde biyolojik etkilerin dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır.

THz kablosuz haberleşme teknolojisi sadece iletişim ile sınırlı kalmayıp bütünleşik algılama ve iletişim yetenekleri sunarak 6G gibi gelecek nesil iletişim sistemlerinde kritik rol oynamaktadır. Li ve arkadaşları (2021), taşınabilir bir cihazda yüksek çözünürlüklü THz algılamanın prototipini sunarak, bütünleşik algılama ve iletişim yeteneklerini göstermişlerdir. Bu tür bir entegrasyon, aynı THz frekans bantlarının hem algılama hem de iletişim amaçlı kullanılmasına olanak tanıyarak, cihazların daha kompakt ve çok yönlü olmasını sağlayabilir.

Sonuç olarak THz kablosuz haberleşme teknolojisi, vücut içi iletişimde yüksek bant genişliği potansiyeli sunarken, medikal algılamada da yeni ufuklar

açmaktadır. Bunula birlikte, biyolojik dokular üzerindeki potansiyel termal etkilerin dikkatlice değerdendirilmesi ve uygun güvenlik önlemlerinin geliştirilmesi, bu teknolojinin geniş çapta benimsenmesi için gereklidir. THz hem iletişim hem de algılama yeteneklerini birleştiren bütünleşik algılama uygulamaları, gelecekteki tıbbi cihazlar ve iletişim sistemleri için heyecan verici fırsatlar sunmaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elde edilen bulgular ışığında, THz frekanslarının potansiyel uygulamaları ve sistem tasarımları için aşağıdaki öneriler getirilebilir.

THz bandının yüksek yol kaybı nedeniyle, öncelikli kullanım alanları ultra-kısa mesafeli iletişimler olmalıdır. Bunlara örnek olarak oda içi kablosuz ağlar, kiosklarda yüksek hızlı veri transferi, M2M iletişim, yonga üzeri veya yongadan yongaya bağlantılar veya kablosuz veri merkezi bağlantıları verilebilir.

Yol kaybını telafi etmek ve sinyal enerjisini belirli alıcılara yönlendirmek için adaptif hüzmeye şekillendirme yeteneğine sahip, yüksek kazançlı, genellikle faz dizili antenlerin kullanılması zorunludur. Bu, özellikle çok yüksek frekanslarda kritik öneme sahiptir.

Engellerin yol açtığı yüksek kayıp nedeniyle, mümkün olduğunca görüş hattı bağlantıları hedeflenmelidir. Engelli senaryolarda iletişim kurmak için yansımalarından yararlanma veya çok yoğun ağlar kurma gibi alternatif stratejiler geliştirilmelidir.

Atmosferik koşullar (nem, yağmur, kar, sis) ve ortamdaki engellerin türü (duvar, cam vb.) yol kaybını büyük ölçüde etkileyeceğinden, sistem tasarımında bu faktörlerin detaylı modellenmesi ve dinç (robust) çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Yüksek yol kaybına ve bandın genişliğine özgü zorluklara (örneğin frekansa bağlı kanal zayıflaması) karşı koymak için ileri düzey modülasyon, kodlama ve eşitleme (equalization) tekniklerinin geliştirilmesi ve kullanılması gerekir.

Elde edilen veriler, THz frekans bandının yüksek bant genişliği potansiyeline rağmen, özellikle yükselen frekanslarla birlikte hızla artan yol kaybı gibi önemli yayılım zorluklarına sahip olduğunu doğrulamaktadır. Bu durum, THz iletişim sistemlerinin menzilinın mevcut kablosuz sistemlere kıyasla çok daha kısıtlı olacağını göstermektedir. Bu nedenle, THz teknolojisinin yaygınlaşması, öncelikle ultra-kısa mesafeli, yüksek hızlı veri transferi gerektiren niş uygulamalara odaklanmayı, buna uygun ileri düzey anten ve sinyal işleme tekniklerinin benimsenmesini ve çevresel koşullara duyarlılığın dikkate alınmasını gerektirecektir. THz bandı, zorluklarına rağmen, geleceğin kablosuz dünyası için çığır açıcı yetenekler sunma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Bu

potansiyeli gerçekleştirmek için detaylı yayılım karakterizasyonları ve yaratıcı mühendislik çözümleri büyük önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., & Han, C. (2014). Terahertz band: Next frontier for wireless communications. *Physical communication*, 12, 16-32.
- Alsharif, M.H., Nordin, R. Evolution towards fifth generation (5G) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive MIMO, and small cells. *Telecommun Syst* 64, 617–637 (2017)
- Asir, T. R. G., Manohar, H. L., Anandaraj, W., & Sivaranjani, K. N. (2016). IoT as a service. In *International Conference on Innovations in information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)* (Vol. 3, pp. 1093–1096).
- Baykaş, T., & Akkaş, M. A. (2019). Yüksek frekanslarda insan derisinin kablosuz vücut alan ağlarına etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(4), 825-831.
- Bogale, T. E., & Le, L. B. (2016). Massive MIMO and mmWave for 5G wireless hetNet: Potential benefits and challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11(1), 64–75.
- Boulogeorgos, A. A. A., Alexiou, A., Merkle, T., Schubert, C., Elschner, R., Katsiotis, A., ... & Rodrigues, F. (2018). Terahertz technologies to deliver optical network quality of experience in wireless systems beyond 5G. *IEEE Communications Magazine*, 56(6), 144-151.
- Elmaadawy, S., Jornet, J.M., 2023. The thermal impact of wireless sub-terahertz radios on the human eye in next-generation extended reality headsets, in: 2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF), pp. 1–6.
- El-Saleh, A. A., Alhammedi, A., Shayea, I., Alsharif, N., Alzahrani, N. M., Khalaf, O. I., & Aldhyani, T. H. H. (2022). Measuring and Assessing Performance of Mobile Broadband Networks and Future 5G Trends Sustainability, 14(2), 829. <https://doi.org/10.3390/su14020829>
- Engr. Muhammad Farooq, Engr. Muhammad Ishtiaq Ahmed, Engr. Usman M Al, "Future Generations of Mobile Communication Networks" Academy of Contemporary Research Journal V II (I), 15-21, ISSN:2305-865, January 2013
- Erbey, A. (2024). Yönetim Bilişim Sistemlerinde Güncel Konular: Nesnelerin İnterneti (IoT)
- Federal Communication Commision, Millimeter wave propagation: Spectrum management implications, Office of Engineerig and Technology, Bulletin Number 70, July 1997
- Friis, H.T., 1946. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE* 34, 254–256.
- I. F. Akyildiz, F. Fekri, R. Sivakumar, C. R. Forest and B. K. Hammer, "Monaco: fundamentals of molecular nano-communication networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 12-18, Oct. 2012.
- IEEE Std 802.15.d-2017, IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-media Networks, Amendment 2: 100 Gb/s wireless switched point-to-point physical layer (IEEE, 2017)
- Kulakowski, P., Turbic, K., & Correia, L. M. (2020). From nano-communications to body area networks: A perspective on truly personal communications. *Ieee Access*, 8, 159839-159853.
- Kürner, T., & Priebe, S. (2014). Towards THz communications-status in research, standardization and regulation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35, 53-62.
- Li, O., He, J., Zeng, K., Yu, Z., Du, X., Liang, Y., Wang, G., Chen, Y., Zhu, P., Tong, W., Lister, D., Ibbotson, L., 2021. Integrated sensing and communication in 6g a prototype of high

- resolution thz sensing on portable device, in: 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), pp. 544–549.
- MacCartney, G. R., & Rappaport, T. S. (2019). Millimeter-wave base station diversity for 5G coordinated multipoint (CoMP) applications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(7), 3395-3410.
- Mittleman, D. M. (2018). Twenty years of terahertz imaging. *Optics express*, 26(8), 9417-9431.
- Mizuno, M., Kitahara, H., Sasaki, K., Tani, M., Kojima, M., Suzuki, Y., ... & Wake, K. (2021). Dielectric property measurements of corneal tissues for computational dosimetry of the eye in terahertz band in vivo and in vitro. *Biomedical Optics Express*, 12(3), 1295-1307.
- Nakano, T. v.d. 2012: Dixon, R.A. ve Chistopher J.L, 1990
- Nokia Corporation (2025). 6G Explained, <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/6g-explained/> adresinden 20 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.
- Pi, Z., & Khan, F. (2011). An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE Communications Magazine*, 49(6), 101–107.
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., ... & Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE access*, 1, 335-349.
- Rappaport, T. S., Xing, Y., MacCartney, G. R., Molisch, A. F., Mellios, E., & Zhang, J. (2017). Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—With a focus on propagation models. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 65(12), 6213-6230.
- Rodwell, M. J. W. (2013, November). Sub-mm-wave technologies: Systems, ICs, THz transistors. In *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)* (pp. 509-511). IEEE.
- Rodwell, M. J. W., Fang, Y., Rode, J., Wu, J., Markman, B., Brunelli, S. Š., ... & Urteaga, M. (2018, December). 100-340ghz systems: Transistors and applications. In *2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* (pp. 14-3). IEEE.
- Sak, Semih, Mustafa Alper Akkaş. "6G'de Nesnelerin İnterneti Teknolojisinin Medikal Alandaki Gelişmeleri." *Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi* 17.1: 1-8.
- Sharma, V., & Nayanam, K. (2024). Sixth Generation (6G) to the Waving Seventh (7G) Wireless Communication Visions and Standards, Challenges, Applications. *International Journal of Advanced Research in Science & Technology*, 13(2), 1248-1255.
- Siddiky, M. N. A., Rahman, M. E., Uzzal, M. S., & Kabir, H. M. D. (2025). A Comprehensive Exploration of 6G Wireless Communication Technologies. *Computers*, 14(1), Article 15. <https://doi.org/10.3390/computers14010015>
- Siegel, P. H. (2002). Terahertz technology. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 50(3), 910-928.
- Singh, R. K., Bisht, D., & Prasad, R. C. (2017). Development of 5G mobile network technology and its architecture. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)*, 3(10), 196-201.
- Stüber, G. L., & Steuber, G. L. (2001). *Principles of mobile communication* (Vol. 2, p. 752). Boston: Kluwer academic
- T. S. Rappaport et al., "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019,
- Tawalbeh, L., Muheidat, F., Tawalbeh, M., & Quwaider, M. (2020). IoT Privacy and Security: Challenges and Solutions. *Applied Sciences*, 10(12), 4102.

- Taylor, Z. D., Garritano, J., Sung, S., Bajwa, N., Bennett, D. B., Nowroozi, B., ... & Grundfest, W. S. (2015). THz and mm-wave sensing of corneal tissue water content: electromagnetic modeling and analysis. *IEEE transactions on terahertz science and technology*, 5(2), 170-183.
- Tissaoui, A., & Saidi, M. (2020). Uncertainty in IoT for smart healthcare: Challenges, and opportunities. In *The Impact of Digital Technologies on Public Health in Developed and Developing Countries: 18th International Conference, ICOST 2020, Hammamet, Tunisia, June 24–26, 2020, Proceedings 18* (pp. 232-239). Springer International Publishing.
- X. Li, A. Gani, R. Salleh and O. Zakaria, "The Future of Mobile Wireless Communication Networks," 2009 International Conference on Communication Software and Networks, Chengdu, China, 2009, pp. 554-557, doi: 10.1109/ICCSN.2009.105.
- Xing, Y., & Rappaport, T. S. (2018, December). Propagation measurement system and approach at 140 GHz-moving to 6G and above 100 GHz. In *2018 IEEE global communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 1-6). IEEE.
- Yang, K., 2016. Characterisation of the In-vivo Terahertz Communication Channel within the Human Body Tissues for Future Nano-Communication Networks. Ph.D. thesis. Queen Mary University of London.
- Yiping, C., & Yuhang, Y. (2007). A new 4G architecture providing multimode terminals always best connected services. *IEEE Wireless Communications*, 14(2), 36-41.
- Zhu, H., Yang, H., Xu, S., Ma, Y., Zhu, S., Mao, Z., ... & Xu, F. (2024). Frequency-encoded eye tracking smart contact lens for human-machine interaction. *Nature Communications*, 15(1), 3588.