

Didem BORAN



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**TERAHERTZ HABERLEŞME
SİSTEMLERİNDE KANAL
MODELLEME**

Didem BORAN

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

KASIM 2022

KASIM 2022



**TERAHERTZ HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE
KANAL MODELLEME**

Didem BORAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2022

Didem BORAN tarafından hazırlanan “TERAHERTZ HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KANAL MODELLEME” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / ~~OY ÇOKLUĞU~~ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Selva ÇÜRÜK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. Mehmet SÖNMEZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Mehmet Ali BELEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 02/11/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - 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.

İmza

Didem BORAN

02/11/2022

TERAHERTZ HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KANAL MODELLEME
(Yüksek Lisans Tezi)

Didem BORAN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Kasım 2022

ÖZET

Günümüz kablosuz haberleşmesinde kullanılan radyo frekans bandı, özellikle son yıllarda hızla artan büyük miktarda yüksek hızda veri transferi ihtiyacını karşılamakta zorlanmaktadır. Bu darboğazın aşılması için bilim dünyası elektromanyetik spektrumda Terahertz (THz) boşluğu olarak adlandırılan frekans bandını kullanarak, bu bandın sunduğu geniş bant ile yüksek veri hızına ulaşmayı amaçlamaktadır. Ancak yeni olması nedeniyle THz haberleşmesi pek çok açıdan araştırılmaya ihtiyaç duyulan bir tekniktir. Farklı ortamlarda kullanılması amaçlanan THz kablosuz haberleşme sistemlerinin karşılaştığı kanal, bu sistemlerin performansı açısından incelenmesi gereken öncelikli konulardan birisidir.

Bu çalışmada öncelikle THz kanal yapıları araştırılmıştır. THz kanalları kullanıldıkları ortama bağlı olarak dış mekân, iç mekân ve çip ölçekli olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Çip ölçekli haberleşme kanalı çok yeni ve sınırlı kullanımı olan bir konudur. Dış mekân kanalının modellenmesi haberleşmenin görüş hattına bağlı olması nedeniyle nispeten daha kolaydır, literatürde ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Ancak THz haberleşme sistemlerinin yoğun olarak kullanılması planlanan iç mekânlarda kanal çokyollu yapısı nedeniyle karmaşıktır ve literatürde bulunan çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmada öncelikle THz kanallarında yol kaybı incelenmiştir. Yol kaybının sebep olduğu frekans seçici kanal yapısı dikkat çekmektedir, haberleşme için ani zayıflamaların olmadığı alt bant aralıkları seçilmelidir. Ardından, iç mekân çokyollu kanalın modellenmesi için Işın İzleme tekniği THz kanallarına uyarlanmış, farklı ortamlarda oluşan kanal yapısı simülasyonlarla incelenmiştir. Simülasyonlar yansımaların dalgalarda oluşan güçlü zayıflama nedeniyle görüş hattına göre etkisiz kaldığını göstermiştir. Ancak çokyollu kanal yapısı frekans seçici bir kanala neden olmaktadır. Son olarak, Işın İzleme tekniği ile Saleh-Valenzuela kanal modeli kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda iki model arasında benzerlik bulunsa da Saleh-Valenzuela modelin görüş hattı ile yansıma arasındaki belirgin farkı modellemekte zorlandığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : THz haberleşme sistemleri, kanal modelleme, yol kaybı, çoklu yol
sönümlenmesi

Sayfa Adedi : 55

Danışman : Doç. Dr. Selva ÇÜRÜK

CHANNEL MODELING IN TERAHERTZ COMMUNICATION SYSTEMS
(M. Sc. Thesis)

Didem BORAN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

November 2022

ABSTRACT

The radio frequency band used in today's wireless communication has difficulties in meeting the rapidly increasing need for high-speed data transfer, especially in recent years. In order to overcome this bottleneck, the scientific world aims to reach high data rates by using the frequency band called Terahertz (THz) gap in the electromagnetic spectrum, with the offered wide band. However, since it is new, THz communication is a technique that needs to be researched in many subjects. The channel that THz wireless communication systems encounter, since they are intended to be used in different environments, is one of the priority issues to be examined in terms of the performance of these systems.

In this study, first of all, THz channel structures were investigated. THz channels are divided into three classes as outdoor, indoor and chip-scale, depending on the environment in which they are used. The chip-scale communication channel is a very new topic with limited use. Modeling of the outdoor channel is relatively easy since the communication depends on the line of sight, related studies exist in the literature. However, in indoor areas where THz communication systems are planned to be used intensively, the channel is complex due to its multipath structure and studies in the literature are limited. In this study, the path loss in THz channels was investigated first. The frequency selective channel structure because of path loss is remarkable, sub-band gaps without sudden attenuation should be selected for communication. Following, the Ray Tracing technique for indoor multipath channel was adapted to THz channels, and the channel structure formed in different environments was examined with simulations. The simulations have shown that the reflections are ineffective relative to the line of sight due to the strong attenuation of the waves. However, the multipath channel structure results in a frequency selective channel. Finally, the Ray Tracing technique is compared with the Saleh-Valenzuela channel model. As a result of the comparison, it is concluded that, although there are similarities between the two models, the Saleh-Valenzuela model has difficulty in modeling the significant difference between the line of sight and the reflections.

Key Words : THz communication systems, channel modeling, path loss, multipath fading
Page Number : 55
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Selva ÇÜRÜK

TEŞEKKÜR

Tez araştırma ve çalışma süresi boyunca danışmanlığımı üstlenen, yardımlarını esirgemeyen, tecrübe ve bilgilerini benimle paylaşan sevgili hocam Doç. Dr. Selva ÇÜRÜK'e teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Hayatımın her aşamasında her zaman yanımda olup, beni destekleyen sevgili aileme sonsuz teőekkürler ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TERAHERTZ HABERLEŞMEDE KANAL.....	7
2.1. Çip Ölçekli Terahertz Haberleşmede Kanal.....	9
2.2. Dış Mekân Terahertz Haberleşmede Kanal	9
2.3. İç Mekân Terahertz Haberleşmede Kanal	10
2.3.1. İç mekân kanallarda blokaj sönümlemesi	11
2.3.2. İç mekân kanallarda yanlış hizalama sönümlemesi	11
2.3.3. İç mekân kanallarda yol kaybı sönümlemesi	11
2.3.4. İç mekân kanallarda gölgeleme sönümlemesi.....	15
2.3.5. İç mekân kanallarda çokluyol sönümlemesi	16
2.4. Kanalin Karakteristiği	17
3. SİMÜLASYON BULGULARI	19
3.1. Yol Kaybı	20
3.1.1. Boş alan yol kaybı.....	20
3.1.2. Moleküler soğurma	21
3.1.3. Toplam yol kaybı	27

	Sayfa
3.2. Çokluyol Sönümlenmesi	29
3.2.1. Çokyollu kanalın deterministik modellenmesi.....	29
3.2.2. Çokyollu kanalın stokastik modellenmesi	39
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR	48



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Oda-1, Oda-2, Oda-3 ve Oda-4 için alıcı konumları	30
Çizelge 3.2. Işın izleme tekniği τ_{rms} , B_c , K_{rf} değerleri	36
Çizelge 3.3. Saleh-Valenzuela modeli parametre tablosu	39
Çizelge 3.4. Oda-2 için Saleh-Valenzuela modeli parametre tablosu	44



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrumda THz dalgalar	7
Şekil 2.2. Büyük- ve küçük-ölçekli sönümleme	8
Şekil 3.1. İç mekân THz kanal simülasyon ortamı	19
Şekil 3.2. Boş alan yol kaybı, 1 m, 5 m, 10 m	21
Şekil 3.3. Moleküler soğurma katsayısı, HITRAN, BSM1, BSM2, 25°C, %50 nem, 1 atm.....	22
Şekil 3.4. Moleküler soğurma katsayısı, BSM2, 15°C, 25°C, 35°C, %50 nem, 1 atm ..	23
Şekil 3.5. Moleküler soğurma katsayısı, BSM2, 25°C, %20, %50, %80 nem, 1 atm	23
Şekil 3.6. Moleküler soğurma katsayısı, BSM2, 25°C, %50 nem, 1, 0,999, 0,989 atm .	24
Şekil 3.7. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem,1 atm, d = 1m.....	25
Şekil 3.8. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm	26
Şekil 3.9. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm	26
Şekil 3.10. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm	27
Şekil 3.11. Yol kaybı, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm.....	28
Şekil 3.12. Yol kaybı kazancı, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm.....	28
Şekil 3.13. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, 300 GHz, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği	31
Şekil 3.14. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, Rx-1, 300 GHz, 3 ve 2 yansıma sayısı	32
Şekil 3.15. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, Rx-1, 300 GHz, %95 ve %50 yansıma gücü....	32
Şekil 3.16. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, Rx-1, 300 GHz ve 500 GHz.....	33
Şekil 3.17. Kanal dürtü tepkisi, Oda-2, 300 GHz, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği	34
Şekil 3.18. Kanal dürtü tepkisi, Oda-3, 300 GHz, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği	34

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Kanal dürtü tepkisi, Oda-4, 300 GHz, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği	35
Şekil 3.20. Kanal frekans tepkisi, Oda-1, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği.....	37
Şekil 3.21. Kanal frekans tepkisi, Oda-2, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği.....	37
Şekil 3.22. Kanal frekans tepkisi, Oda-3, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği.....	38
Şekil 3.23. Kanal frekans tepkisi, Oda-4, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği.....	38
Şekil 3.24. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 1	40
Şekil 3.25. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 2.....	41
Şekil 3.26. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 3.....	41
Şekil 3.27. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 4.....	42
Şekil 3.28. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 5.....	42
Şekil 3.29. Kanal dürtü yanıtı, 500 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 5.....	43
Şekil 3.30. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Oda-2, Rx-1, Rx-2, Rx-3, Saleh-Valenzuela modeli.....	45
Şekil 3.31. Kanal frekans tepkisi, Oda-2, Rx-1, Rx-2, Rx-3, Saleh-Valenzuela modeli.	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

dB	Decibel
Gbps	Gigabit per second
Tbps	Terabit per second
K_{rf}	Rician faktör
B_c	Uyumluluk bant genişliği

Kısaltmalar

6G	6. Generation
ABG	Alpha-Beta-Gamma Model
B5G	Beyond 5.Generation
CI	Close-In Model
CFR	Channel Frequency Response
CIR	Channel Impulse Response
FI	Floating-Intercept Model
FSPL	Free Space Path Loss
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LoS	Line of Sight
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMC	Modified Monte Carlo
NLoS	Nonline of Sight
Rms	Root Mean Square
SAGE	Space-alternating Generalized Expectation-maximization
THz	Terahertz

1. GİRİŞ

Veri iletiminde, özellikle mobil uygulamalarda, sağladığı avantajlar nedeniyle kablosuz haberleşme tercih edilmektedir. Günümüz kablosuz haberleşme sistemlerinin çoğunluğu radyo frekansı dalgalarını kullanmaktadır. Ancak haberleşme sistemlerinden beklenen veri miktarı ve hızı her gün ciddi oranda artmaktadır. Yapılan çalışmalar her on sekiz ayda iletilmek istenen veri miktarının iki katına çıktığını göstermektedir [1]. Buna göre veri hızı ihtiyacının yakın zamanda 10 Gbps'yi aşması kaçınılmazdır [2]. Bu artış kablosuz ağlarda veri trafiğinde yüksek yoğunluk meydana getirmektedir. Saniyede birkaç gigabit veri hızından fazlasını destekleyemeyen sınırlı radyo frekansı spektral bandı bu yoğunluğu kaldırmakta zorlanmaktadır, yakın zamanda yetersiz kalacağı açıktır [3].

Haberleşmede hızla artan talebi karşılamak ve veri hızını artırmak için çalışmalar yapılmaktadır [4]. Literatürde bu problemin çözümü için çoğullama, modülasyon yöntemleri, veri sıkıştırma gibi tekniklerle spektral verimliliği artırmayı amaçlayan yaklaşımlar bulunmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar tıkanmayı geciktirse de bu darboğazın aşılması için yeni frekans bantlarının kullanılması tek çözümdür ve bu konuda da yoğun araştırmalar devam etmektedir. Elektromanyetik spektrumda mikrodalga ve optik frekans bantları arasında bulunan aralık, Terahertz (THz) bandı, kablosuz haberleşmede kullanılabilir alternatif frekans bantları arasında öne çıkmaktadır. Çok yüksek frekans aralığında bulunan THz dalgaları sağladıkları geniş bant genişliği sayesinde yüksek hızlı veri iletimini mümkün kılmaktadır. Bu yeni teknoloji ile düşük gecikme süreli ve terabit seviyelerinde veri iletim hızına ulaşılması amaçlanmaktadır [5, 6].

Terahertz teknolojisi, sahip olduğu üstün özelliklerinden dolayı, birçok farklı ortamda uygulama alanı bulmaktadır. THz dalgaların ilk kullanım alanları arasında hava limanı güvenliği, tıbbi görüntüleme, savunma endüstrisi, spektroskopi, mikro elektronik mekanik sistemler (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) sayılabilir. Bunlara ek olarak, çiplerde kablosuz ağlarda (Wireless Networks-on-Chip, WiNoC) kullanılması öngörülmektedir [7]. 5. Nesil ötesi (Beyond 5. Generation, B5G) ve 6. Nesil (6. Generation, 6G) hücresel yerel ve kişisel alan ağlarında THz dalgaların kullanılması ile ultra yüksek hızlı terabit haberleşmesi amaçlanmaktadır: 5G ile saniyede 20 Gigabite ulaşan veri hızının 6G'de 1 - 10 Tbps'ye ulaşması beklenmektedir [8, 9]. THz haberleşmesinin planlanan diğer bir

uygulama alanı kimlik işlemlerinde yaygınlaşan mikro işlemci kontrollü bilgisayar ve dokunmatik ekrandan oluşan kiosklardır [10]. Bant genişliği ve veri iletim hızı büyük önem taşıdığı için Veri Merkezleri (Data Centers) için de THz teknolojisinin kullanımı ön plana çıkmaktadır [11].

THz dalgaları ile haberleşmenin avantajlarının yanında çözüm bekleyen zorlukları da bulunmaktadır. En belirgin kısıtlama dalga boyunun küçük olması nedeniyle iletim mesafesinin kısa olmasıdır. THz dalgalarda yol kaybı oldukça yüksektir [12], bu da iletilmek istenen sinyalin gücünün mesafeyle ilişkili olarak ciddi oranda azalmasına ve iletim mesafesinin kısalmasına neden olur. Ayrıca, THz dalgalar opak cisimlere nüfuz edebilirken, su buharı ve oksijen molekülleri tarafından soğurulurlar. Yağmur, rüzgâr, sis, bulut gibi atmosferik koşulların da iletim mesafesini kısaltan etkenler arasında olduğu çalışmalarda gösterilmiştir. Bu nedenle açık hava THz haberleşme sistemlerinde sinyal zayıflamasının daha düşük olduğu 1 THz altındaki bantlar tercih edilmektedir [13]. İletim mesafesini artırmak için yüksek kazançlı yönlü antenlerin kullanılması gereklidir [14]. THz haberleşmesinin diğer bir zorluğu THz boşluğu olarak bilinen bu aralıkta frekans üretiminin zor olmasıdır. Ancak teknolojideki yeni gelişmelerle beraber grafen gibi nano malzemelerin kullanımıyla yüksek frekanslı sinyallerin üretilmesi mümkün olmaktadır [15].

THz bandında haberleşmeye artan ilgi, işlevsel ve yüksek performanslı sistemler için çalışmaları hızlandırmış, güvenilir haberleşme için bu banda ait standartlar oluşmaya başlamıştır. Bu amaçla 2008 yılında kurulan THz İlgi Grubu (THz Interest Group) 275-3000 GHz frekans bandı için IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association) 802.15 standardını geliştirmiştir [16]. Ardından 2014 yılında bu standardı güncelleyerek 275-325 GHz bandında veri hızını saniyede 100 gigabite yükseltmek amacıyla Görev Grubu 3d (The Task Group 3d) adlı bir grup oluşturulmuştur [2, 16]. 2017 yılında ise 300 GHz'de ilk standart olan IEEE 802.15.3d-2017 onaylanmıştır [2]. Düzenlenen bu standartların amacı kapsama alanı, veri hızı, kanal karakteristiği ve modülasyon tekniklerini belirleyerek iletişimi daha verimli hale getirmektir.

Bilindiği üzere, haberleşme kanalı sistem performansını etkileyen en önemli faktördür. Verimli, hızlı, güvenilir bir haberleşme sistemi için çalışılan kanalın etkisinin belirlenip bertaraf edilmesi gerekmektedir. Düşük frekanslı sistemler için geliştirilen kanal modelleri, THz frekanslarındaki yüksek yol kaybı ve moleküler soğurma nedeniyle THz kanalları için

uygun değildir. Bu nedenle THz haberleşmesi için sistem tasarımının ilk adımı kanalın gerçekçi şekilde modellenmesiyle başlamalıdır.

Literatürde kullanılan kanal modelleme teknikleri temelde deterministik ve stokastik olmak üzere ikiye ayrılır. Haberleşme sistemlerinde genellikle büyük ölçekli sönümlenme (Large-scale fading) deterministik modellenirken, küçük ölçekli sönümlenmenin (Small-scale fading) modellenmesinde stokastik yaklaşım kullanılmaktadır [17]. Simülasyon sonuçları ve ölçümler deterministik modellerin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermiştir. Ancak deterministik modellemede bulunan ortam tamamen tanımlı olmalıdır, dolayısıyla ortamın fiziksel şartları bilinmelidir. Bu modeller karmaşık yapıya sahiptirler ve ortamda oluşan değişiklik, hesaplamaların tekrar yapılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle mobil haberleşmede veya sürekli değişen çevresel etkenlerin olduğu durumlarda tercih edilmezler. Stokastik modellemede kanal parametreleri deneysel ölçümlere dayanarak, çevre etkilerinin ortalaması alınarak rastgele dağılımlar ile modellenir. Bu nedenle stokastik modellemede işlem karmaşıklığı daha azdır [18].

Literatürde THz kanalları için deterministik ve stokastik modellerin yanı sıra, bunların birleşimiyle oluşan hibrit kanal modelleri de geliştirilmektedir [1], ancak bu konudaki çalışmalar sınırlı sayıdadır [17]. Bu çalışmalara göre, THz kanalları kullanıldığı senaryoya bağlı olarak iç mekân, dış mekân ve çip ölçekli olarak sınıflandırılmıştır. Çip ölçekli haberleşme kanalı yeni ve sınırlı kullanımı olan bir konudur. Dış mekân kanalının modellenmesi haberleşmenin görüş hattına bağlı olması nedeniyle kolaydır. Ancak THz haberleşme sistemlerinin yoğun olarak kullanılması planlanan iç mekânlarda kanal çokyollu yapısı nedeniyle karmaşıktır. İç mekân THz dalgaların uygulamaları, kullanılması gereken cihaz ve anten teknolojileri, kanal ölçüm ve modellenmesi hakkında bilgi veren çalışmalar arasında [19 – 29] öne çıkmaktadır. İç mekân THz haberleşmede yansıma kaybı, çokluyol sönümlenmesi veya blokaj gibi değişken etkenlerden dolayı yayılımı istatistiksel olarak karakterize etmeyi tercih eden [30]'un yazarları, bu amaçla duvarların, nesnelerin ve insan vücudunun sebep olduğu etkileri analiz etmiş, oluşan yol kaybı için uygun kanal modellerini araştırmıştır. Bir diğer çalışmada [31] ofis ortamında 140 GHz merkez frekansında kanal incelenerek bir simülatör tasarlanmıştır. Çalışmada yayılma gecikmesi, yol kaybı, anten kazancı gibi parametreler üzerinde durulmuştur.

Stokastik kanal modeli öneren diğer bir çalışma [32], iç mekân THz yayılımını 1987 yılında önerilen Saleh-Valenzuela (SV) modeline dayandırmaktadır. İç mekânlarda yaygın kullanılan bu modele göre, işaretler ışıklardan (ray) oluşan kümeler (cluster) halinde alıcıya ulaşır. Kümeler binanın temel yapısı tarafından oluşturulurken, ışınlar çevredeki nesnelere tarafından oluşturulur. Bu modeli THz bandına uyarlayan çalışmada verici ve alıcı arasındaki mesafenin etkisinin frekans bandında değişikliklere neden olduğu gösterilmiştir. [33, 34]'un yazarları iç mekânda gerçekleştirilen çalışmalarla, 28 ve 140 GHz'de stokastik kanal modeli ile yol kaybı, kümelerin sayısı ve gecikmeleri incelenmiştir. Küme tabanlı yayılma modelinin kullanıldığı başka bir çalışmada [35] bir veri merkezinde Görüş Hattı (Line of Sight, LoS) ve Görüş Hattı Olmayan (Non-Line of Sight, NLoS) senaryolar için THz kanalı incelenmektedir.

THz ağlarda stokastik kanal modellemenin performansını inceleyen [36]'da analitik sonuçlar Monte-Carlo simülasyonları ile doğrulanmaktadır. [37]'de bir koridorda Uzay-değişken Genelleştirilmiş Beklenti-maksimizasyonu (Space-alternating Generalized Expectation-maximization, SAGE) algoritması ile çokyollu bileşenler incelenmiş, görüş hattı için yol kaybı, gölge sönmülmesi, gecikme yayılması ve küme parametreleri gibi kanal özellikleri analiz edilirken, görüş hattı olmayan yansımaları kuvvetlendirmek için duvarlara ekstra yansıtıcı folyolar koyarak ölçümler yapılmıştır. [38]'de Kiosk indirme, ofis, salon ve tipik endüstriyel ortamlar gibi seçili iç mekânlarda 50 ile 325 GHz arasında kanal ölçümleri yapılmıştır. Başka bir çalışmada ise endüstriyel iç mekân THz kablosuz iletişim uygulamalarında sistem modellemesi yapılarak fiziksel katman güvenliğine değinilmektedir [39]. [40 - 43]'de yapılan çalışmalarla alışveriş merkezi, havaalanı ve bir üniversitenin giriş salonunda yapılan ölçümlere dayanarak THz kanal Rayleigh, Rice, Nakagami-m ve α - μ dağılımlarıyla modellenmiş, ölçümlerle en uyumlu sonucu α - μ dağılımının verdiği gösterilmiştir. Bir başka çalışmada yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler [25] kullanan bir THz sisteminde α - μ sönmülme ve işaretleme hatalarının birleşik etkisinin sistem performansı üzerine etkisi incelenmiştir [44].

Işın izleme (Ray Tracing, RT) tekniği de çokyollu kanal modellemesinde sıklıkla kullanılır. Bu teknikte ışınlar odada rastgele şekilde ilerlemeye devam ederken yüzeylere çarptığında, güçleri yüzeylerin yansımalarına bağlı olarak azalır ve rastgele yönlerde yeni ışınlar oluşur. Oluşan ışınlar oda boyunca izlenir ve alıcıya ulaşan bütün ışınlarla kanal dürtü tepkisi elde edilir. 130 – 143 GHz arasında tipik bir toplantı odası için kanal ölçümlerini inceleyen bir

çalışmada [45], THz sinyallerinin dalga yayılımını araştırmak için RT tekniğini kullanılmıştır. 201 - 209 GHz'de iç mekân THz haberleşmesi için ışın izleme ve stokastik yöntemleri birleştiren [46]'da hibrit bir kanal modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada büyük ölçekli yol kayıpları analiz edilirken, küme sayısı, gecikme yayılması, açısal yayılma ve küme varış zamanı gibi küçük ölçekli kanal parametreleri uygun dağılımlarla modellenmektedir. Işın İzleme metodunun kullanıldığı [47 - 49]'da verilen çalışmalarda, farklı frekanslarda atmosferik zayıflama ve dağınık yansımının etkileri incelenmektedir. [50]'de ise geliştirilen üç boyutlu Işın İzleme algoritması ile gerçekçi ofis ortamında THz frekanslarında çokyollu yayılma incelenmektedir. [51]'de, iç mekân ofis ve dış mekân sokak için THz kanal deterministik olarak karakterize edilmiştir. 300 GHz'de yine iç mekânda yapılan bir çalışmada [52], Rayleigh-Rice saçılma modelini kullanarak Işın İzleme tekniğine dayanan model ile farklı malzemelerle oluşan yansıma yolları incelenmektedir.

Çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) THz sistemler için [53]'de alıcı/verici tasarımı ve kanal modellemedeki gelişmeler değerlendirilmiştir. Yine bu sistemler için [54]'de küresel dalga ve düzlemsel dalga kanal modellerinin verimlilikleri incelenerek, daha az sayıda kanal parametresine sahip hibrit küresel ve düzlemsel dalga kanal modeline değinilmiştir. Başka bir MIMO sistemin incelendiği [55]'de ise deterministik modele sahip bir THz kanalının frekans seçiciliği incelenerek, stokastik kanal modelinin avantajlarına değinilmiştir. [56]'nın yazarları ise alt THz bantlarda uzamsal çoğullama ile ilgili temel unsurları incelemektedir.

Bu çalışmanın amacı, iç mekân THz sistemleri için kanal karakteristiklerine uygun modelin belirlenmesine katkı sağlamaktır. Bu amaçla Bölüm 2'de, öncelikle literatürde bulunan THz haberleşme sistemlerinde kullanılan kanal modelleri araştırılıp bilgi birikimi oluşturulmuştur. THz kanallarda boş alan yol kaybı ile moleküler soğurma ciddi boyuttadır. Çokyollu kanal modellemesi yapılırken kullanılan en yaygın yaklaşım Kanalın Dürtü Yanıtının (Channel Impulse Response, CIR) ve/veya Kanalın Frekans Tepkisinin (Channel Frequency Response, CFR) bulunmasıdır. CIR ve CFR kullanılarak kanalların dc kazanç, Karekök Ortalama (Root Mean Square, Rms) gecikme yayılımı, Uyumluluk Bant Genişliği (Coherence Bandwidth, B_c) ve ortalama aşırı gecikme özelliklerine ulaşmak mümkündür.

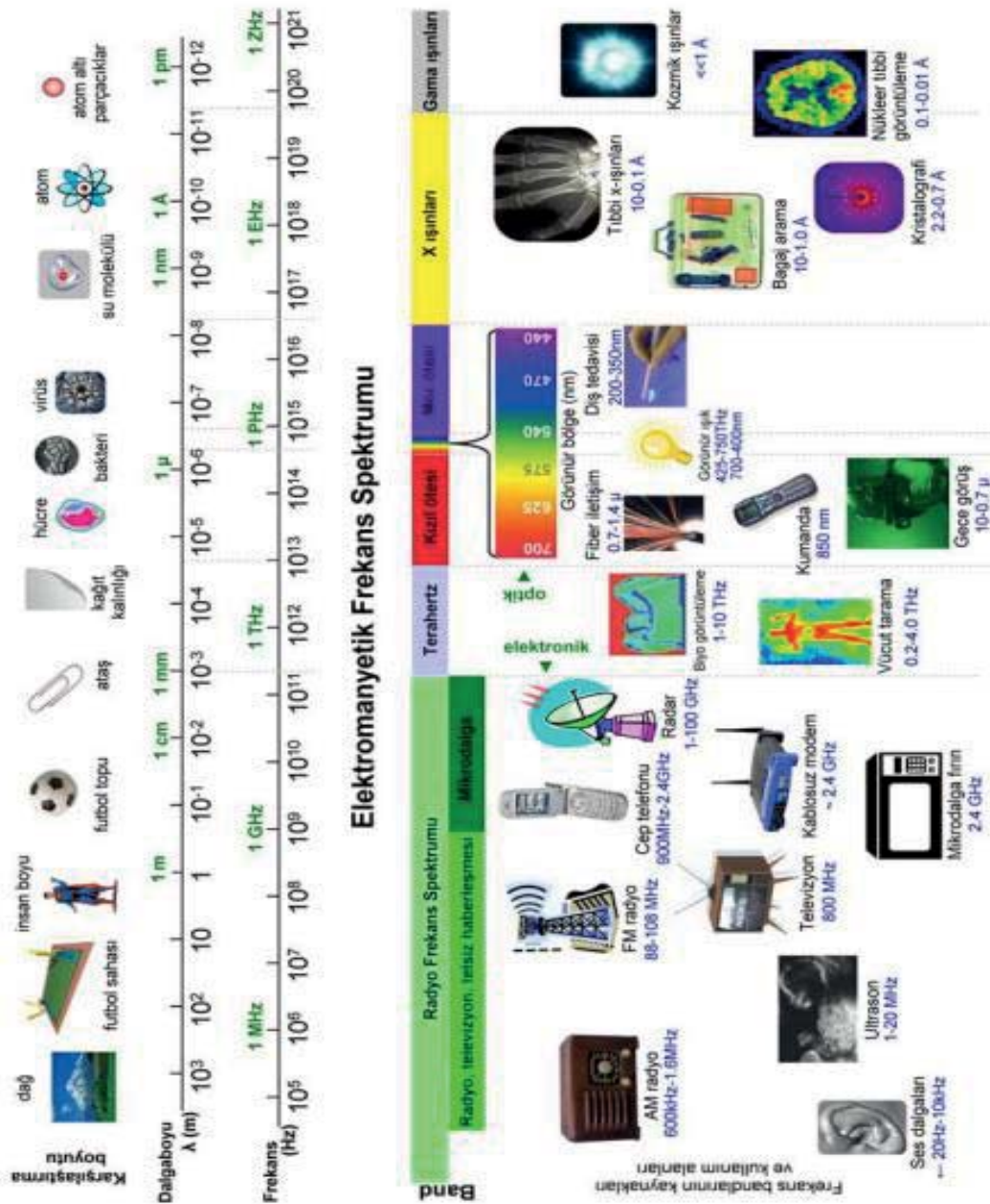
Bölüm 3'de MATLAB simülasyonları ile THz kanal karakteristiği irdelenmiştir. 0,1 – 10 THz bandında boş alan yol kaybı ve moleküler soğurma incelenmiş, boş alan yol kaybının

frekans ve mesafe ile birlikte artığı görülmüştür. Moleküler soğurma kaybı ise frekansla beraber sıcaklık ve nem değerlerindeki artışın moleküler soğurma katsayısını artırmasına bağlantılı olarak artmaktadır. Toplam yol kaybı 0,1 – 10 THz arasındaki bantta frekans seçiciliğe neden olmaktadır. Verimli bir iletişimin sağlanması için durağan alt bantların tercih edilmesi gerekmektedir. İç mekân THz kanalın çokyolluluğunun modellenmesi için yapılan ön çalışma sonucunda Işın İzleme deterministik modeli ile Saleh-Valenzuela istatistiksel modelinin ayrıntılı incelenmesine karar verilmiştir. Bu yöntemler iç mekân THz kanallar için uyarlanmış, ardından MATLAB programı kullanılarak farklı konfigürasyonlarda (kullanılan frekans, ortamın boyutu, alıcı/verici arasındaki uzaklık) oluşan kanalın özelliklerine ait simülasyon sonuçları elde edilerek önemli kanal karakteristikleri incelenmiştir. Çalışmada istatistiksel modellemenin yetersiz kaldığı gösterilmiştir.

Son bölümde tez çalışmasıyla elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Ardından ihtiyaç olduğu görülen ve ileride araştırılması planlanan konular gelecekteki olası çalışmalar ifadesiyle önerilmiştir.

2. TERAHERTZ HABERLEŞMEDE KANAL

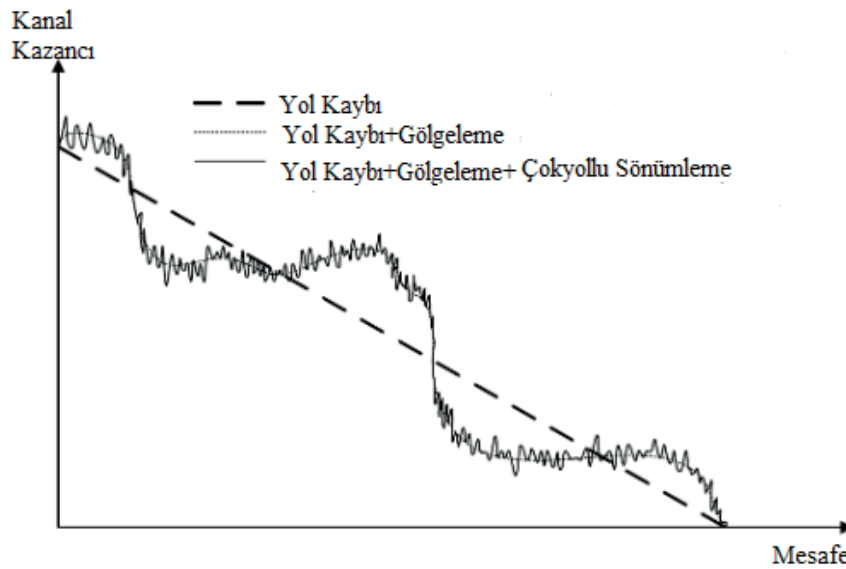
Terahertz frekans bandı, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, spektrumda mikro dalgalar ile kızılötesi dalgalar arasında bulunan 0,1 - 10 THz bandını kapsayan bölgede yer alır. Spektrumdaki bu aralık, THz dalgalar hakkında henüz birçok bilinmezliğin olması ve çok yüksek frekanslarda frekans üretiminin zorluğu nedeniyle, THz boşluğu olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrumda THz dalgalar [57]

THz bandını kullanan haberleşme sistemlerinde, diğer sistemlerde olduğu gibi, haberleşme kanalı araştırılması gereken öncelikli konular arasındadır. Bilindiği üzere, haberleşmenin yapılacağı fiziksel ortamın etkisiyle iletilmek istenen sinyalde bozulma, zayıflama ve semboller arası girişim oluşur. Buna ek olarak, kanalda kullanılan elektronik cihazların neden olduğu termal gürültü ve diğer gürültü çeşitleri de gözlemlenecektir. Özetle haberleşme kanalı sistemin iletim kapasitesi ve performansı açısından büyük önem taşır ve sistemlerin tasarımı aşamasında, öncelikle kullanılacak fiziksel ortamlar için kanal ölçümlerinin yapılması, ardından kanalın matematiksel olarak modellenmesi gereklidir.

Kablosuz kanallarda oluşan zayıflama ve bozulmalar büyük ölçekli sönümlenme ve küçük ölçekli sönümlenme olarak ikiye ayrılır. Mesafeyle ilişkili oluşan yol kaybı, engebeli yeryüzü şekilleri ve çok katlı binaların gölgelemesi nedeniyle işaretin gücünde görülen zayıflamalar büyük ölçekli sönümlenmeye neden olur (Şekil 2.2). Alıcı ve verici durumlarındaki küçük değişimler (antenlerin konfigürasyonu, yerleşimi, varış/çıkış açısı vs.) sonucu işaretin genlik ve fazında oluşan değişimler ise küçük ölçekli sönümlenmeyi meydana getirir. Kanal modellenirken büyük ve küçük ölçekli sönümlenmenin beraber ele alınması kanalın doğru şekilde karakterize edilmesi için önemlidir [58].



Şekil 2.2. Büyük- ve küçük-ölçekli sönümlenme

Kanal modeli haberleşme sisteminin kullanıldığı senaryoya bağlı olarak farklılık gösterir. THz haberleşmede sinyalin iletimi sırasında görüş hattı ve/veya görüş hattı olmayan yayılım gerçekleşir. Verici ve alıcı antenlerin birbirlerini direkt gördüğü durumda LoS hattı

oluşacaktır. Bunun yanı sıra özellikle kapalı ortamlarda çevredeki nesnelere yansımalar NLoS yayılımına sebep olacaktır. NLoS yayılımında iletilen sinyal, yansıma (reflection), saçılım (scattering) ve kırınım (diffraction) maruz kalır. Bunun sonucunda gönderilen sinyal farklı yayılım yollarında farklı gecikme ve zayıflama ile ilerleyerek alıcıya ulaşır. Neticede ortama göre farklılık gösteren çokyollu kanal yapısı oluşur [59]. THz kanalı bu çokyollu bileşenler ve moleküler soğurma nedeniyle frekans seçicidir [58]. NLoS hatlar LoS hattına göre çok daha zayıf kalsa da özellikle verici alıcı arasında engelleme olduğunda haberleşme için kritik önem taşırlar. Literatürde THz bandında kontrollü yansımalar kullanılarak NLoS iletim ile yüksek veri hızlarına ulaşılabileceği gösterilmiştir [60].

Literatürde farklı ortamlar ve senaryolar için THz kanal ölçümlerine ait çalışmalara dayanarak kanal modelleri oluşmaya başlamıştır [61]. Bu çalışmalara göre, THz kanallar kullanıldığı senaryoya bağlı olarak iç mekân, dış mekân ve çip ölçekli olarak sınıflandırılmıştır.

2.1. Çip Ölçekli Terahertz Haberleşmede Kanal

Yüksek frekans sebebiyle alıcı/verici antenlerin küçülmesi çip ölçekli kablosuz ağların gelişmesine katkı sağlamıştır. Çip ölçekli THz kablosuz iletişim çip içi ve çipler arası olmak üzere ikiye ayrılır [62]. Çip içi yayımda dalgalar çipin katmanlarından geçerek yayılır. Çipler arası yayımda ise çipten ayrılan dalgalar, başka bir çipe ulaşana kadar çipler arası boşluktan geçer. Çip ölçekli THz kanallarda yüksek yol kaybı oluşur [7], ve bu kaybın üstesinden gelinmesi için modellemede yüksek enerjili bileşenler kullanılmalıdır [63].

2.2. Dış Mekân Terahertz Haberleşmede Kanal

THz bandı haberleşmesi dış mekânlarda uygulama alanı bulmaktadır. Literatürde bu uygulamalarına örnek olarak 237,5 GHz'de 20 metrenin üzerinde bir mesafeye saniyede 100 Gbit'lik veri aktarım hızına ulaşılan bir dış mekân haberleşme sistemi sunulmaktadır [64]. Dış mekân THz haberleşmesi genellikle LoS hattına dayanarak yapılır. Sinyalin yayıldığı ortam, bağıl nem, sıcaklık ve basınç moleküller soğurmayı etkileyen faktörlerdendir [65]. Bu nedenle, bu kanallarda yol kaybı ve moleküler soğurmanın modellenmesi büyük önem taşımaktadır.

2.3. İç Mekân Terahertz Haberleşmede Kanal

Kısa iletişim mesafesi nedeniyle THz dalgaların iç mekânlarda kullanılması daha yaygındır. İç mekân kanallarda LoS hattının yanında, farklı nesnelere veya insan vücudunun engellemesiyle sinyallerde yansımaya, saçılmaya ve/veya kırınımına maruz kalan NLoS hatlar da gözlemlenir. Bu durumda alıcıya ulaşan sinyal, iletilen sinyalin farklı gecikmelere ve zayıflama seviyelerine sahip kopyalarının süperpozisyonları olacaktır. Bu nedenle kanal çokyollu olarak modellenir ve CIR, alıcıya ulaşan bütün bileşenlerin toplamı şeklinde ifade edilir:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \delta(\tau - \tau_i) \quad (2.1)$$

N yol sayısı, a_i ve τ_i sırasıyla i . inci yayılmanın zayıflamasını ve gecikmesini ifade eder. Teorik olarak sonsuz sayıda yol alıcıya ulaşacaktır, ancak belli bir yansıma sonrası zayıflamanın etkisi ile alıcıya ulaşan bileşenlerin gücü ihmal edilecek seviyede olacaktır. Bu nedenle N sonlu bir sayı olarak alınır. LoS iletimde CIR tek bileşenli ($N=1$) olacaktır.

Çokyollu bir kanalda haberleşmenin sağlıklı yapılabilmesi için zaman karakteristiğinin (dürtü tepkisi) yanında bant karakteristiği de (frekans tepkisi) ele alınmalıdır. CFR kanal dürtü tepkisinin Fourier dönüşümü ile elde edilir (Δt zaman dilimi genişliği):

$$h(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t} \quad (2.2)$$

THz kanaldaki hem büyük hem de küçük ölçekli sönümlenmeyi içeren kanalın CFR'si aşağıdaki şekilde ifade edilir [66]:

$$h(f) = h_{bl}(f) \cdot h_{mis}(f) \cdot h_{pl}(f) \cdot h_{sh}(f) \cdot h_{mf}(f) \quad (2.3)$$

burada $h_{bl}(f)$, $h_{mis}(f)$, $h_{pl}(f)$, $h_{sh}(f)$ ve $h_{mf}(f)$ sırasıyla blokaj (blockage), yanlış hizalama (misalignment), yol kaybı (path loss), gölgeleme (shadowing) ve çokluyol (multipath fading) sönümlenmeleridir. Yol kaybı ve çokluyol sönümlenmesi iç mekân uygulamalarında mutlaka yaşanır, ancak diğer sönümlenmeler senaryoya bağlı olarak oluşmayabilir. Alıcıda alınan güç P_R ;

$$P_R = P_T \cdot |h(f)|^2 \quad (2.4)$$

denklemiyle ifade edilir.

2.3.1. İç mekân kanallarda blokaj sönümlemesi

Verici ve alıcı arasında LoS iletimin tamamen engellendiği durumda blokaj sönümlemesi yaşanır. Bu durumda haberleşme tamamen yansımalar üzerinden gerçekleşir. Literatürde iç mekân THz haberleşmesinde yönlü anten ve yansıtıcılar yardımıyla kontrollü yansımalar kullanılarak NLoS ile yüksek veri hızı iletimi yapılabileceği gösterilmiştir [60].

2.3.2. İç mekân kanallarda yanlış hizalama sönümlemesi

THz haberleşmesinde kullanılan antenlerin yapısı iletim performansını etkiler [67]. Yüksek performanslı ve düşük gecikme süresine sahip sistemler için yüksek kazançlı dar ışınlı yönlü antenler tercih edilmelidir [14, 17]. Yanlış anten seçimi veya alıcı/verici antenlerin konumlandırılmasındaki hata kapsama alanını etkiler, bu da sönümleme ile sonuçlanır. Bu sönümleme, alınan güçte düşüş yaratacaktır [17, 68, 69]. Yanlış hizalamanın modellenmesi genellikle stokastik metotlarla gerçekleştirilmektedir.

2.3.3. İç mekân kanallarda yol kaybı sönümlemesi

THz kanalda mutlaka görülen yol kaybı sönümlemesi frekans, antenler arası mesafe, arazi şartlarına bağlı etkenlere bağlı olduğu gibi, sıcaklık ve su buharı konsantrasyonu gibi atmosferik koşullardaki değişimlere de bağlıdır. THz sistemlerde toplam yol kaybı;

$$h_{pl}(f) = h_{fsp}(f) \cdot h_{ma}(f) \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $h_{fsp}(f)$ boş alan yol kaybı (Free Space Path Loss, FSPL), $h_{ma}(f)$ ise moleküler soğurma (Molecular Absorption) kaybıdır.

Frekans ve iletim mesafesine bağılı olan boş alan yol kaybı, boş uzayda alıcı/verici antenler arasında herhangi bir engel olmadan sinyal gücündeki zayıflamayı modellemek için kullanılır. Friis denklemi yardımı ile bulunur [70]:

$$h_{fspl}(f) = \frac{c \cdot \sqrt{G_T \cdot G_R}}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d} \quad (2.6)$$

c ışık hızını, f çalışma frekansını, d alıcı ve verici arasındaki iletim mesafesini, G_T ve G_R sırasıyla verici ve alıcı anten kazançlarını temsil etmektedir.

Moleküler soğurma, elektromanyetik dalga enerjisinin atmosferdeki moleküller tarafından emilmesinden kaynaklanır [71]. THz bandında nem, sıcaklık ve basınç moleküler soğurmaya etkileyen faktörlerdir [65]. Su buharı soğurmaya neden olan en etkili moleküllerdendir [72]. Moleküler soğurma kaybını hesaplamak için literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanları Beer-Lambert yasasından yararlanır [72, 73]:

$$h_{ma}(f) = e^{-\frac{d}{2} \cdot k(f)} \quad (2.7)$$

Burada $k(f)$ moleküler soğurma katsayısı olup kanalın basınç, sıcaklık, nem ve moleküler yapısına göre değişiklik gösterir.

Diğer sönümlenmelerin olmadığı LoS THz haberleşmesi için desibel cinsinden yol kaybı iletilen güç ile alınan güç oranının logaritması alınarak bulunur:

$$PL_{[dB]} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_R} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{|h_{pl}(f)|^2} \right) \quad (2.8)$$

Anten kazançları ihmal edildiğinde, desibel cinsinden yol kaybı aşağıda verilmiştir:

$$PL_{[dB]} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{c} \right)^2 + 10 \cdot k(f) \cdot d \cdot \log_{10}(e) \quad (2.9)$$

Moleküler soğurma katsayısı $k(f)$ spektroskopik veritabanları yardımıyla hesaplanabilir. HITRAN tabanlı (High Resolution Transmisson Molecular Absorption Database)

veritabanında T sıcaklığında P basıncı altında g gazının i izotopoloğunun soğurma katsayısı [58, 72];

$$k^{Hit}(f) = \sum_{i,g} N_A \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_{STP}}{T} \cdot \frac{P}{RT} \cdot q^{(i,g)} \cdot S^{(i,g)}(T) \cdot \left(\frac{f}{f_c^{(i,g)}} \right)^2 \cdot \frac{\tanh\left(\frac{\hbar \cdot c \cdot f}{2 \cdot K_B \cdot T}\right)}{\tanh\left(\frac{\hbar \cdot c \cdot f_c^{(i,g)}}{2 \cdot K_B \cdot T}\right)} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{\alpha_L^{(i,g)}}{(f - f_c^{(i,g)})^2 + (\alpha_L^{(i,g)})^2} + \frac{\alpha_L^{(i,g)}}{(f + f_c^{(i,g)})^2 + (\alpha_L^{(i,g)})^2} \right] \quad (2.10)$$

ile ifade edilir. T_{STP} standart basınç altındaki sıcaklık, P_0 referans basınç (1 atm), \hbar Planck sabiti, K_B Boltzman sabiti, R gaz sabiti, N_A ise Avogadro sabitidir. $q^{(i,g)}$ karışım oranı ve $S^{(i,g)}(T)$ belirli bir molekül tarafından soğurmanın gücünü tanımlayan çizgi yoğunluğudur.

Rezonans frekansı $f_c^{(i,g)}$;

$$f_c^{(i,g)} = f_{c0}^{(i,g)} + \zeta^{(i,g)} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (2.11)$$

$f_{c0}^{(i,g)}$ rezonansın sıfır basınç konumu ve $\zeta^{(i,g)}$ doğrusal basınç kaymasını ifade eder. Lorentz yarı-genişlik katsayısı $\alpha_L^{(i,g)}$;

$$\alpha_L^{(i,g)} = \left[(1 - q^{(i,g)}) \cdot \alpha_0^{(air)} + q^{(i,g)} \cdot \alpha_0^{(i,g)} \right] \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^\iota \quad (2.12)$$

T_0 referans sıcaklık değeridir (296 Kelvin). $\alpha_0^{(air)}$ hava ve $\alpha_0^{(i,g)}$ kendiliğinden genişleyen yarı genişlikler, ι sıcaklık genişleme katsayısıdır. Katsayılar HITRAN veritabanından elde edilmektedir.

İşlem karmaşıklığının yoğun olduğu HITRAN tabanlı soğurma modeline alternatif olarak literatürde 275 - 400 GHz bandı için basitleştirilmiş soğurma modeli BSM1 geliştirilmiştir [74]. Bu modele göre moleküler soğurma katsayısı;

$$k^{BSM1}(f) = \sum_{i=1}^2 y_i(f, \eta) + g(f) \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Denkleştirme faktörü olan $g(f)$ polinomu aşağıda verilmiştir:

$$g(f) = 5,54 \cdot 10^{-37} \cdot f^3 - 3,94 \cdot 10^{-25} \cdot f^2 + 9,06 \cdot 10^{-14} \cdot f - 6,36 \cdot 10^{-3} \quad (2.14)$$

İki tane soğurma hattı içerir [66, 74, 75]:

$$y_1(f, \eta) = \frac{0,2205 \cdot \eta \cdot (0,1303 \cdot \eta + 0,0294)}{(0,4093 \cdot \eta + 0,0925)^2 + (\frac{f}{100 \cdot c} - 10,835)^2} \quad (2.15)$$

$$y_2(f, \eta) = \frac{2,014 \cdot \eta \cdot (0,1702 \cdot \eta + 0,0303)}{(0,537 \cdot \eta + 0,0956)^2 + (\frac{f}{100 \cdot c} - 12,664)^2} \quad (2.16)$$

η ise belirli bir hacimdeki su buharı kütlesinin kuru hava kütlesine oranını belirtir:

$$\eta = \frac{\phi}{100} \cdot \frac{p_w(T, p)}{p} \quad (2.17)$$

ϕ bağıl nem, $\phi \cdot p_w(T, p)/100$ ise p basıncı ve T sıcaklığında su buharı kısmi basıncıdır ve doymuş su buharı kısmi basıncı p_w Buck denklemi ile bulunur:

$$p_w(T, p) = 6,1121 \cdot (1,0007 + 3,46 \cdot 10^{-6} \cdot p) \cdot \exp \left\{ \frac{17,502 T}{240,97 + T} \right\} \quad (2.18)$$

100 - 450 GHz bandı için moleküler soğurma katsayısını hesaplayan ikinci yaklaşım (BSM2) [73] ise altı tane soğurma hattının toplanmasıyla elde edilmektedir:

$$k^{BSM2}(f) = \sum_{i=1}^6 y_i(f, \eta) + g(f) \quad (2.19)$$

Denkleştirme faktörü $g(f)$ polinomu ve soğurma hatları ise aşağıda verilmiştir (η önceki modelde tanımlanan şekildedir.):

$$g(f) = \frac{\eta}{0,0157} \cdot (2 \cdot 10^{-4} + 0,915 \cdot 10^{-112} \cdot f^{9,42}) \quad (2.20)$$

$$y_1(f, \eta) = \frac{5,159 \cdot 10^{-5} \cdot (1-\eta) \cdot (-6,65 \cdot 10^{-5} \cdot (1-\eta) + 0,0159)}{(-2,09 \cdot 10^{-4} \cdot (1-\eta) + 0,05)^2 + (\frac{f}{100 \cdot c} - 3,96)^2} \quad (2.21)$$

$$y_2(f, \eta) = \frac{0,1925 \cdot \eta \cdot (0,1350 \cdot \eta + 0,0318)}{(0,4241 \cdot \eta + 0,0998)^2 + (\frac{f}{100 \cdot c} - 6,11)^2} \quad (2.22)$$

$$y_3(f, \eta) = \frac{0,2251 \cdot \eta \cdot (0,1314 \cdot \eta + 0,0297)}{(0,4127 \cdot \eta + 0,0932)^2 + \left(\frac{f}{100 \cdot c} - 10,84\right)^2} \quad (2.23)$$

$$y_4(f, \eta) = \frac{2,053 \cdot \eta \cdot (0,1717 \cdot \eta + 0,0306)}{(0,5394 \cdot \eta + 0,0961)^2 + \left(\frac{f}{100 \cdot c} - 12,68\right)^2} \quad (2.24)$$

$$y_5(f, \eta) = \frac{0,177 \cdot \eta \cdot (0,0832 \cdot \eta + 0,0213)}{(0,2615 \cdot \eta + 0,0668)^2 + \left(\frac{f}{100 \cdot c} - 14,65\right)^2} \quad (2.25)$$

$$y_6(f, \eta) = \frac{2,146 \cdot \eta \cdot (0,1206 \cdot \eta + 0,0277)}{(0,3789 \cdot \eta + 0,0871)^2 + \left(\frac{f}{100 \cdot c} - 14,94\right)^2} \quad (2.26)$$

İki yaklaşımın da standart atmosfer koşullarında iletimin 1 km'ye kadar doğru sonuçlar verdiği gösterilir [77, 78].

2.3.4. İç mekân kanallarda gölgeleme sönümlenmesi

Literatürde THz kanalında gölgeleme genellikle yol kaybı ifadesinde Gauss dağılıma sahip rastgele değişken şeklinde tanımlanır [70, 76 - 79]. Tek-frekans bandı olan kanallar için kullanılan Yakın (Close-In, CI) modelinde gölgelemeli yol kaybı [77, 80];

$$PL_{[dB]}^{CI} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{c} \right)^2 + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2.27)$$

Referans mesafesi d_0 ölçümleri kolaylaştırmak amacıyla 1 metre olarak alınır n , yol kaybı üssü, iç mekân haberleşmesinde 2'ye eşittir [80, 81]. X_σ σ standart sapmalı, sıfır beklenen değerli Gauss rastgele değişkeni olarak modellenen gölgeleme sönümlenmesidir.

Yine tek-frekans bantlı kanallarda kullanılan Kayan Kesişim (Floating-Intercept, FI) modeli, CI modelinin aksine, referans mesafesini dikkate almaz:

$$PL_{[dB]}^{FI} = a_{FI} + 10 \cdot b_{FI} \cdot \log_{10}(d) + X_\sigma \quad (2.28)$$

şeklinde verilir. a_{FI} kayan kesişimi belirtir, d mesafesinde yol kaybının artış hızını temsil eden b_{FI} ise modelin eğimidir [79]. a_{FI} , b_{FI} değerleri standart sapmanın minimize edilip

türevlerinin sifira eşitlenmesiyle bulunur [78]. Aynı verilerle yapılan ölçümlerle, FI modelinin tahmininin daha doğru olduğu gösterilmiştir [70].

Çok-frekanslı kanallar için kullanılan Alfa-Beta-Gama (Alpha-Beta-Gamma, ABG) modeli de CI modeli gibi hem frekansa hem de mesafeye bağlıdır [70]:

$$PL_{[dB]}^{ABG} = a_{ABG} + 10 \cdot b_{ABG} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right) + X_{\sigma} \quad (2.29)$$

b_{ABG} optimize edilmiş offset değeri, a_{ABG} ve γ mesafe ve frekansa bağlı katsayılarıdır. Bu parametreler, FI modelindeki katsayıların bulunma yöntemiyle aynı şekilde bulunur.

2.3.5. İç mekân kanallarda çokluyol sönümlemesi

Küçük ölçekli sönülmeye neden olan çokyollu kanal yapısında iletilen sinyal bileşenleri kanaldan farklı şekillerde etkilendiğinden THz bandı frekans seçicidir. Literatürde çokluyol sönümlemesinin etkisi stokastik olarak Üstel, Gama, Nakagami-m, Rayleigh veya α - μ gibi dağılımlar kullanılarak modellenmiştir [7, 40 - 43]. Yansıyan/saçılan sinyal bileşenlerinin istatistiksel olarak bağımsız olduğu kabul edilir. Üstel dağılım kolaylığı nedeniyle kullanımı daha yaygındır. LoS yayılımının olmadığı NLoS yayılıma sahip bir iletim kanalında yansıyan sinyallerin toplamı Rayleigh veya Nakagami-m dağılım ile ifade edilmektedir [40]. Nakagami-m, kolaylığı açısından diğerlerine göre daha geniş alanlarda kullanılırken, deneysel verilerle uyuşmadığı olmaktadır [41]. Nakagami-m, Rayleigh gibi geleneksel dağılımların yeterli gelmediği durumlar için α - μ sönümleme modelinin iyi sonuç verdiği gösterilmiştir [41]. Bu dağılım Gauss, Weibull, Nakagami-m, Rayleigh, gibi diğer dağılımların genel formudur [7, 40 - 43], ancak karmaşıklığı yüksektir.

Literatürde, deterministik olarak CIR bulmak için kullanılan yaygın yöntemlerden birisi Işın İzleme metodudur [78]. Değişen ortam koşullarına göre dalgaların iletimini hesaplamak için kullanılan ışın izleme simülasyonları gerçek ölçümlerle karşılaştırıldığında daha düşük maliyetli olup, zaman kazandırır [78]. Bu yöntemde, alıcıya giden her ışın için yol tahmini yapılarak yol kaybı ve faz değişimleri belirlenir. Yüzeyden yansıma kayıpları nesnenin materyaline, şekline ve pürüzlülük katsayısına bağlıdır. NLoS iletimde yüzey pürüzlülüğü

küçük dalga boyuna sahip THz bandı için sorun oluşturabilir. THz dalganın ve çarptığı nesnenin dalgaboyu ilişkisine göre yansıma, saçılma veya kırınım olayları gerçekleşebilir.

2.4. Kanalin Karakteristiği

Kanalın dürtü ve frekans tepkileri kanalın davranışını anlatır. Ancak literatürde kanalın karakteristik özelliklerinin kıyaslanmasında kullanılan parametreler de bulunmaktadır. Bunlardan biri kanalın dc kazancıdır:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t). dt \quad (2.30)$$

Ancak, frekans tepkisinin salınım yaptığı baskın LoS bileşeninin varlığı durumunda bu parametre kanalın frekans seçiciliği derecesini belirlemek için yeterli değildir. Çokyollu bir kanalda Rician faktörü, LoS bileşeninin baskınlığını gösterir. LoS ve NLoS hatlarının güçleri arasındaki oran olarak tanımlanmıştır [82]:

$$K_{rf} = \frac{P_{LoS}}{P_{NLoS}} \quad (2.31)$$

Bağlantı kalitesinin bir ölçüsü olan Rician faktörü çokyolluluğun seviyesinin göstergesidir; K_{rf} 'in sıfır değerini alması LoS olmayan en şiddetli durumu gösterirken, sonsuz değeri alması NLoS olmadığını ifade eder.

Çokyollu kanalların zaman yayılım özelliklerini ölçmek için literatürde sıkça kullanılan anahtar parametreler arasında Rms gecikme yayılımı ve uyumluluk bant genişliği bulunmaktadır. Gecikme yayılımı, alıcıya ulaşan ilk bileşen olan LoS ile çokyollu son bileşenin varış zamanları arasındaki farktır. Rms gecikme yayılımı ise yansımaların gecikme değerlerinin standart sapmalarının normalize edilmiş halidir [83] ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t-\bar{\tau})^2 \cdot h^2(t). dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t). dt}} \quad (2.32)$$

Burada ortalama gecikme yayılımı $\bar{\tau}$;

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t.h^2(t).dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t).dt} \quad (2.33)$$

olarak tanımlanmıştır. CIR ve τ_{rms} deterministik parametreler olarak kabul edilebilir ve verici ve alıcı pozisyonları değişmedikçe sabit olacaktır. Bir haberleşme sisteminde sembol süresi kabaca gecikme yayılımından 10 kat daha büyük ise simgeler arası girişim olmadan iletişim olması beklenilir [83].

Kritik bir diğer parametre olan uyumluluk bant genişliği B_c sinyal zayıflamasının sabit kabul edilebileceği, kullanılabilen maksimum bant genişliğinin bir tahmini olan frekans aralığıdır ve Rms gecikme yayılımı yardımıyla bulunur. Rms gecikme yayılımının büyümesiyle uyumluluk bant genişliği düşer ve kanal frekans seçici yapıya dönüşür. Kanal korelasyonunun 0,5'i geçtiği maksimum frekans aralığında B_c [58];

$$B_c \approx \frac{1}{5.\tau_{rms}} \quad (2.34)$$

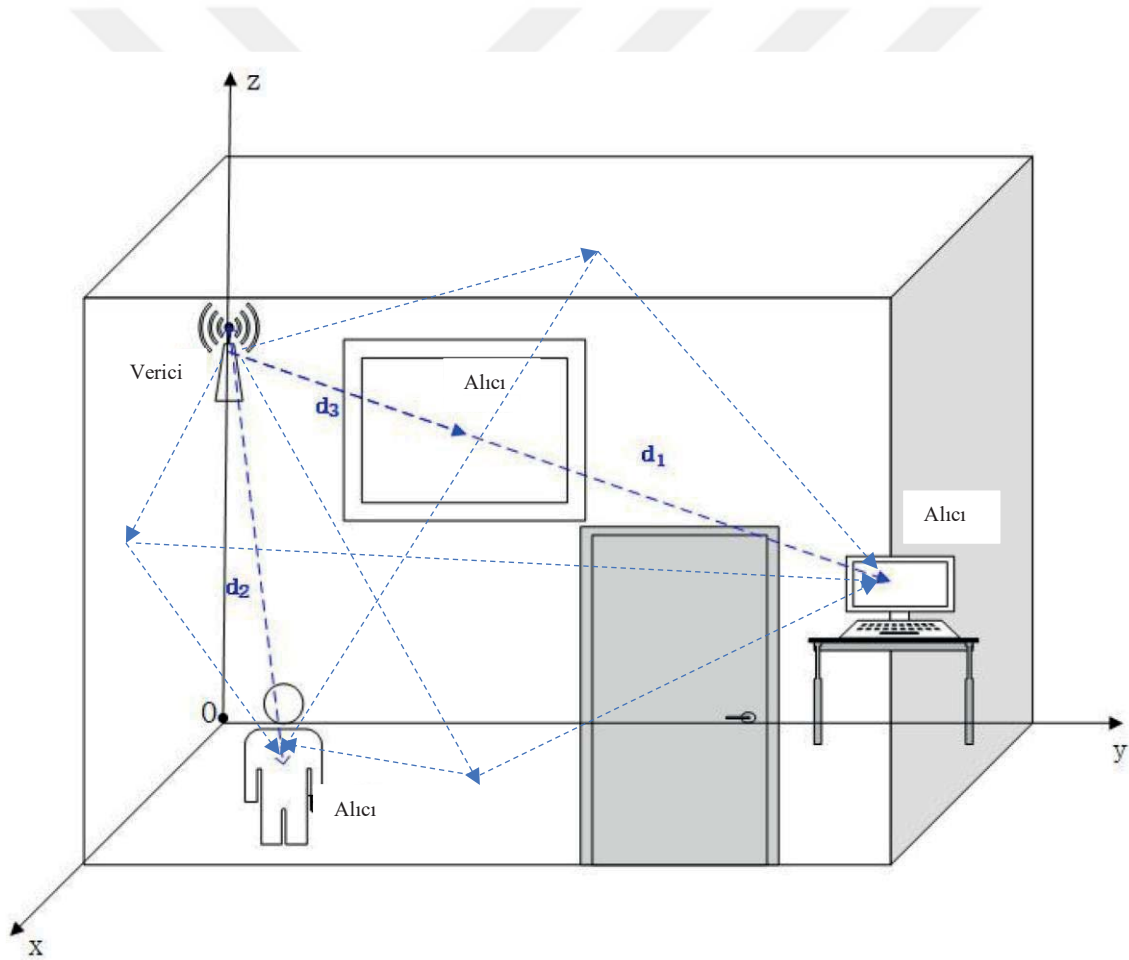
ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Rms gecikme yayılımı kullanılarak bulunan bir diğer parametre ise veri aktarım hızının üst sınırıdır [83]:

$$R_b \leq \frac{1}{10.\tau_{rms}} \quad (2.35)$$

3. SİMÜLASYON BULGULARI

Bu çalışmada iç mekân THz kanallarında yol kaybı ve çokluyol sönümlenmesi bilgisayar ortamında MATLAB yazılımı simülasyonları kullanılarak incelenmiştir. Simülasyonlarda vericinin alıcılarla LoS oluşturması amacıyla odanın köşesinde tavana yakın şekilde sabitlendiği, alıcının ise bir masanın üzerinde veya bir kişinin elinde olduğu düşünülerek zeminden belli bir yükseklikte olduğu varsayılmıştır (Şekil 3.1). Alıcı anteni çokyönlü olması nedeniyle her yönden gelen dalgayı almaktadır. Simülasyonlarda sadece kanalın etkisini görebilmek amacıyla alıcı ve verici antenleri ideal kabul edilmiş, kazançları G_T ve G_R 'nin değeri 1 alınmıştır.



Şekil 3.1. İç mekân THz kanal simülasyon ortamı

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere iç mekân THz kanalı vericiden çıkan dalganın bir engelle çarpmadan alıcıya ulaştığı LoS yolu ve vericiden gönderilen dalganın bir yüzeye çarpmasının ardından yansımalar yaparak farklı yollardan alıcıya ulaştığı NLoS yolları ile oluşan bir kanaldır. Teorik olarak, kapalı bir ortamda doğrudan bir yol ve sonsuz sayıda yansıma

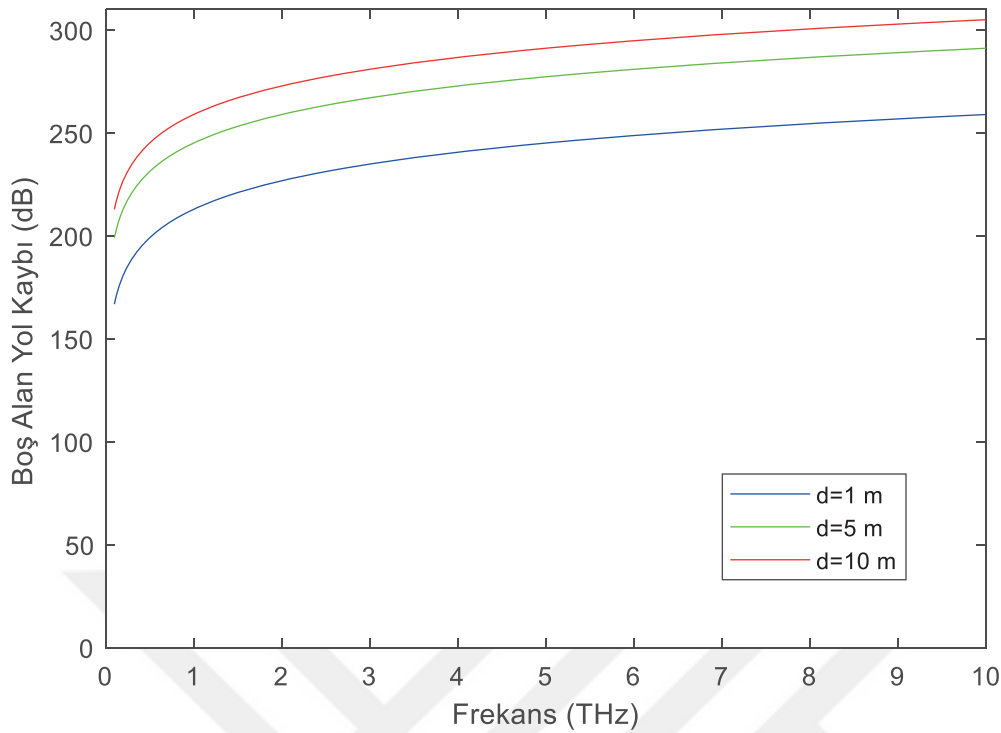
oluşacaktır. Ancak her yansımanın ardından zayıflayan dalganın belirli sayıda yansımanın ardından alıcıya ulaştığında gücü ihmal edilebilir seviyede olacaktır.

3.1. Yol Kaybı

THz kanallarda yol kaybı (2.5) eşitliğinde verildiği gibi boş alan yol kaybı ve moleküler soğurma kaynaklıdır.

3.1.1. Boş alan yol kaybı

THz kanalları için boş alan yol kaybı ile iletim mesafesi arasındaki ilişki Şekil 3.2’de verilmektedir. Sinyal üreteçlerinin sınırları nedeniyle literatürdeki araştırmaların çoğu düşük THz bandına, 300 GHz’in altındaki banda, odaklanmaktadır. Ancak ileriki çalışmalara ışık tutması amacıyla bu çalışmada HITRAN veritabanının tanımlı olduğu 0,1 - 10 THz bant aralığı için simülasyon yapılmıştır. Yüksek frekans nedeniyle THz bandındaki yol kaybının diğer bantlara kıyasla daha büyük olduğu literatürde verilen bir gerçektir. Verilen şekilde bu bilgiyle uyumlu olarak frekans arttıkça kaybın daha da arttığı görülmektedir. Alıcı ile verici arasındaki mesafe iç mekân olması nedeniyle 1 m, 5 m ve 10 m olarak seçilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, iletim mesafesi arttıkça boş alan yol kaybı artmaktadır, bu da iletim mesafesinin boş alandaki yol kazancını sınırlayan bir faktör olduğunu onaylamaktadır.

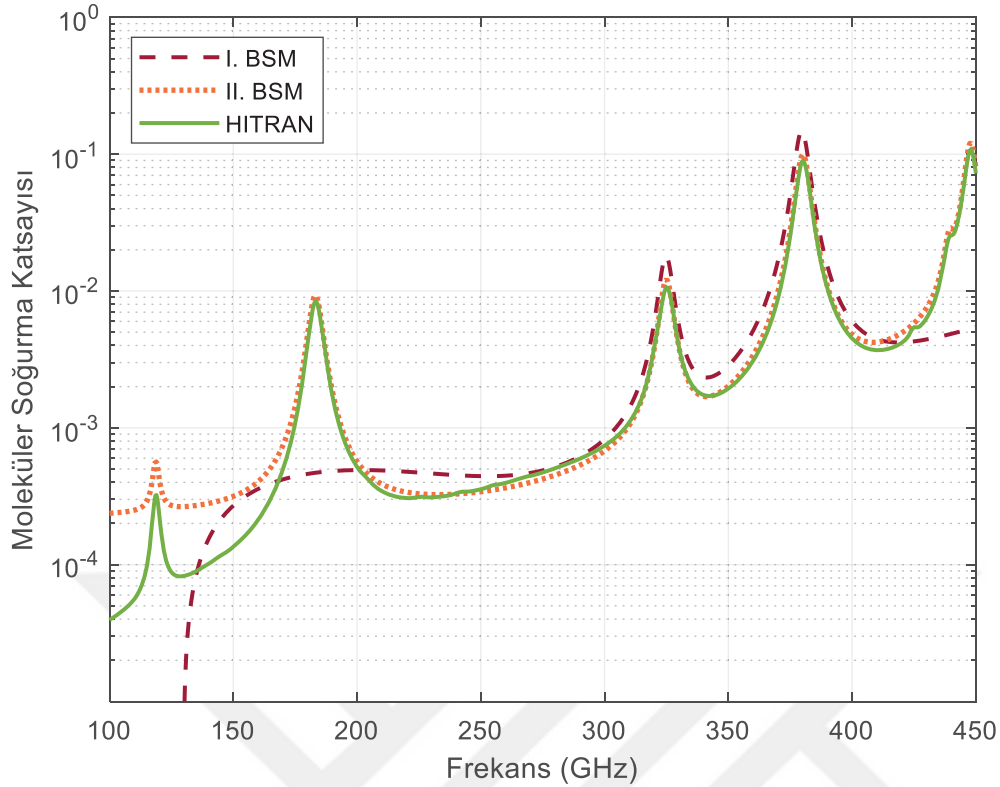


Şekil 3.2. Boş alan yol kaybı, 1 m, 5 m, 10 m

3.1.2. Moleküler soğurma

THz bandında sinyal gücünün zayıflamasında en büyük etki moleküler soğurmadır. Moleküler soğurma hesabında gerekli olan katsayı önceki bölümde açıklanan HITRAN ve basitleştirilmiş soğurma modelleri kullanılarak elde edilmektedir. HITRAN veritabanı 0,1 - 10 THz bandında tanımlıyken BSM1 275 - 400 GHz bandında, BSM2 ise 100 - 450 GHz bandında tanımlıdır.

Moleküler soğurma katsayısı BSM1, BSM2 ve HITRAN veritabanı kullanılarak 25°C, %50 nem, 1 atm için (literatürde kullanılan ortalama değerler) elde edilmiş, karşılaştırmak amaçlı Şekil 3.3’de verilmektedir. Bant aralığı iki yaklaşımı da kapsayacak şekilde 100 – 450 GHz olarak seçilmiştir. Moleküler soğurma katsayısı bulmak için geliştirilen yaklaşımların HITRAN veritabanı ile uyduğu açıkça görülmektedir. Görüldüğü üzere BSM1 tanımlı olduğu 275 – 400 GHz bandında HITRAN ile oldukça uyumludur. BSM2 de yine tanımlı olduğu 100 – 450 GHz bandında uyumludur. Ancak bu yaklaşımların tanımlandıkları bant dışında kullanılmaları hatalı sonuçlar doğuracaktır.

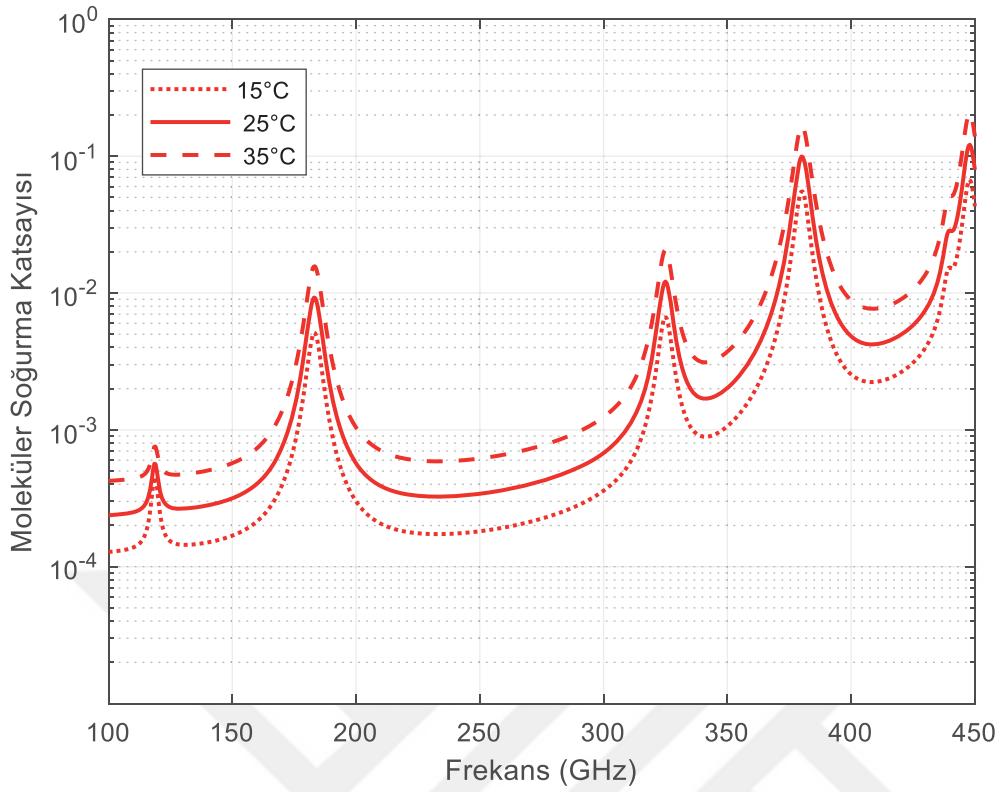


Şekil 3.3. Moleküler soğurma katsayısı, HITRAN, BSM1, BSM2, 25°C, %50 nem, 1 atm

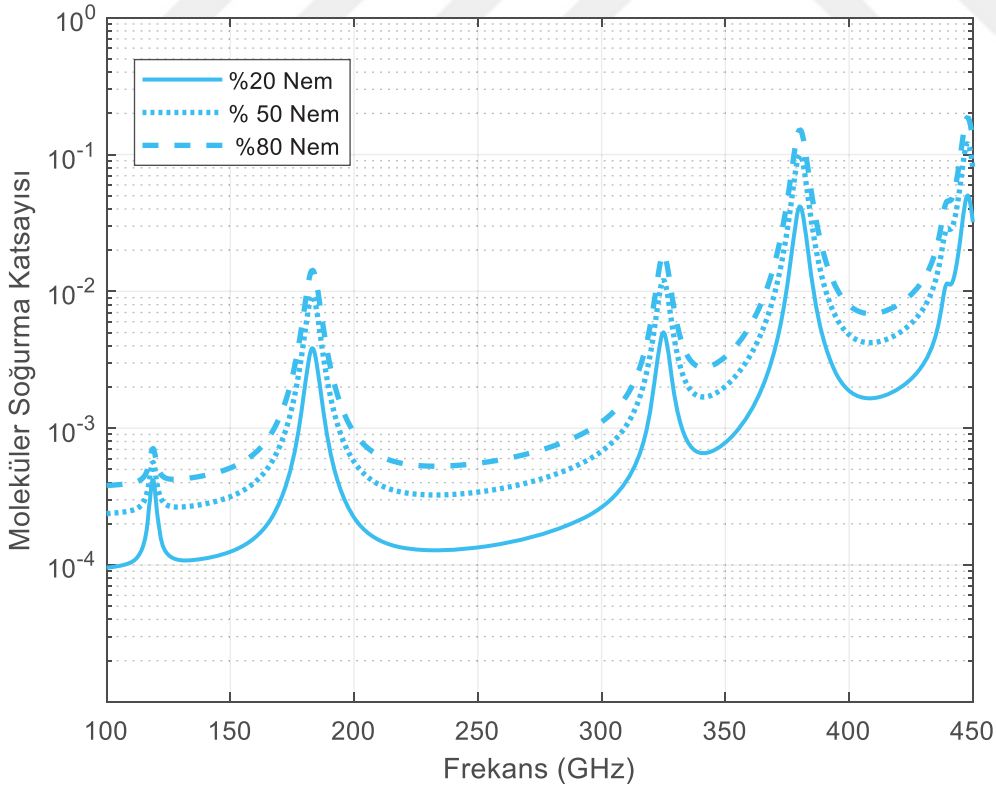
Sıcaklık, nem ve basıncın moleküler soğurma katsayısı üzerine etkisini incelemek amaçlı da simülasyonlar yapılmıştır. 100 – 450 GHz bandında 15°C, 25°C ve 35°C ortam sıcaklığı için moleküler soğurma katsayısı kıyaslanmak amaçlı Şekil 3.4’de verilmiştir. Simülasyonlarda iç mekân uygulamaları göz önünde bulundurulmuş ve sıcaklık, basınç ve nem için değerler belirlenmiştir. Bu nedenle ısı değerleri çok düşük tutulmamıştır. Görüldüğü üzere ısı ile moleküler soğurma katsayısı arasında doğru bir ilişki vardır, ısı arttıkça katsayı artmaktadır.

Nemin etkisini gösteren grafikler Şekil 3.5’de verilmiştir. %20, %50, %80 nem için verilen grafikte sıcaklığa benzer şekilde nem arttıkça moleküler soğurmanın arttığı görülmektedir.

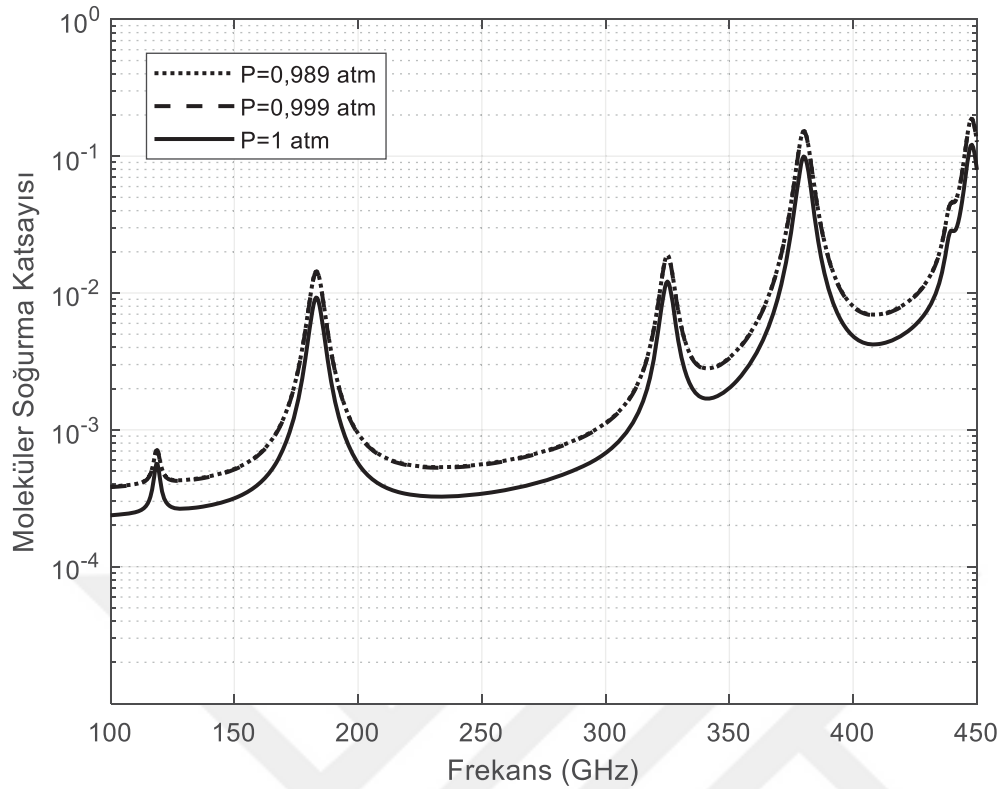
Basınca ait grafikler ise Şekil 3.6’da verilmektedir. Görüldüğü üzere 1 atm basınçtan küçük bir düşüş moleküler soğurma katsayısının artmasına sebep olmaktadır. Ancak bu düşüşün devam etmesi durumunda moleküler soğurma katsayısında artış olmasına rağmen bu fark önemsiz hale gelmektedir.



Şekil 3.4. Moleküler soğurma katsayısı, BSM2, 15°C, 25°C, 35°C, %50 nem, 1 atm

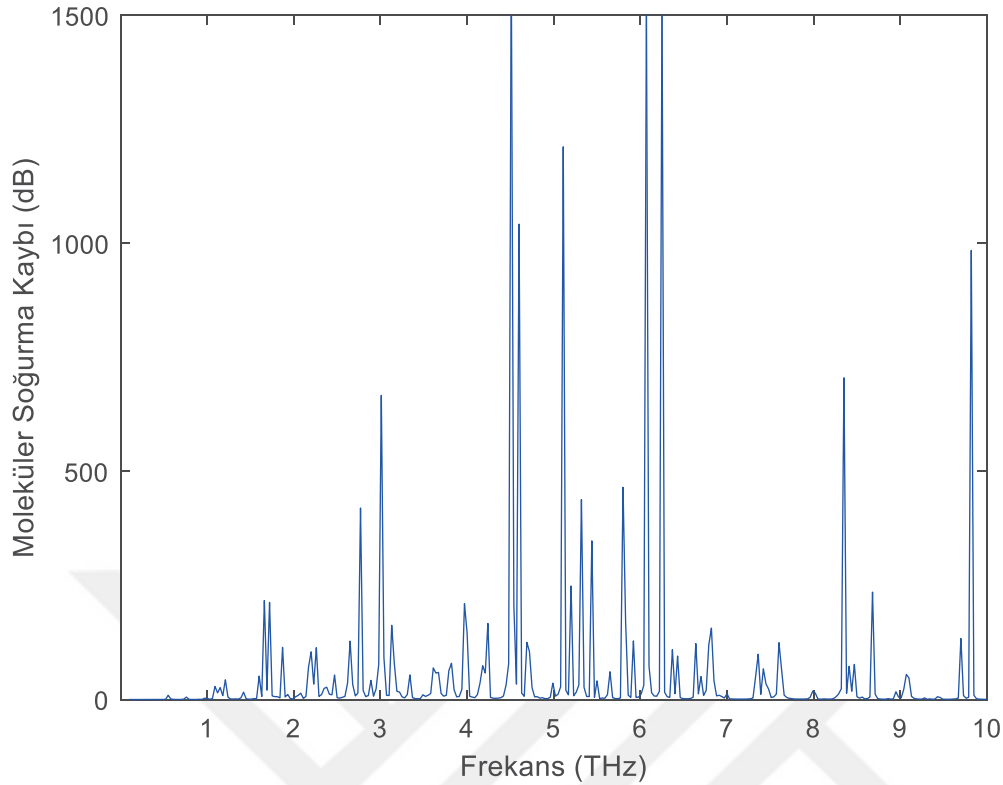


Şekil 3.5. Moleküler soğurma katsayısı, BSM2, 25°C, %20, %50, %80 nem, 1 atm



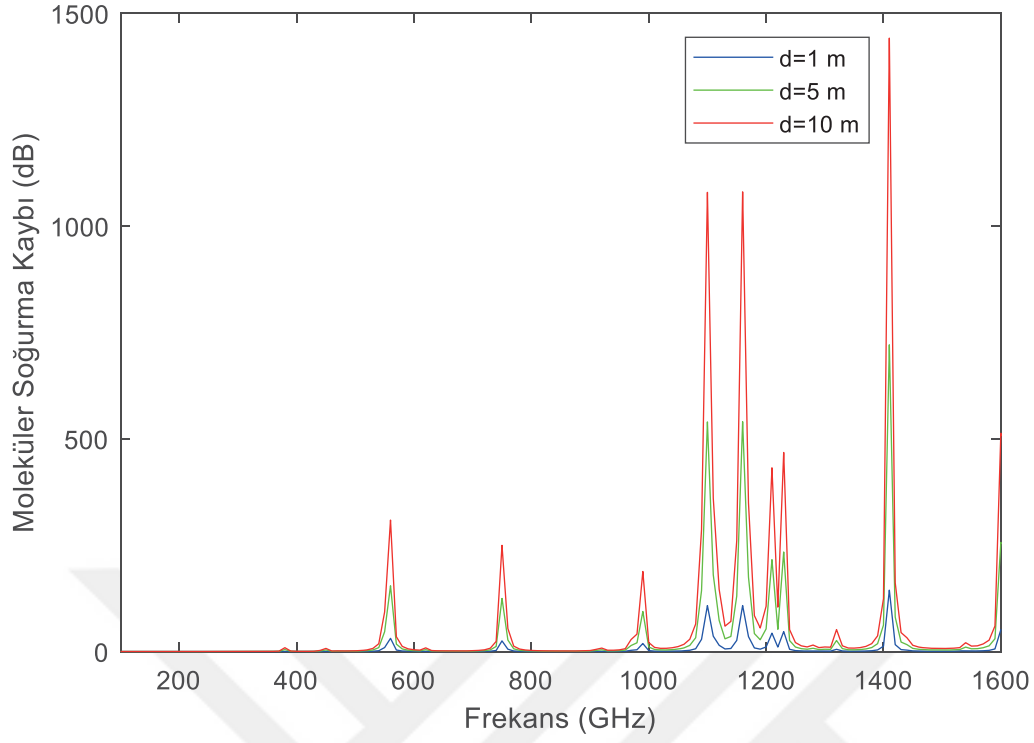
Şekil 3.6. Moleküler soğurma katsayısı, BSM2, 25°C, %50 nem, 1, 0,999, 0,989 atm

0,1 – 10 THz bandı için HITRAN veritabanının kullanılmasıyla elde edilen moleküler soğurma kaybı Şekil 3.7’de verilmektedir. Alıcı ile verici arasındaki mesafe 1 m olarak seçilmiştir. Görüldüğü üzere kanal frekans seçici bir yapıya sahiptir. 1,5 – 7 THz bandında alıcı verici mesafesi küçük iken bile yoğun soğurma yaşanmaktadır. Yaşanan moleküler soğurma kaybı boş alan yol kaybına oranla çok daha yüksek olmaktadır. Ancak bazı bant aralıklarında soğurma görülmemektedir, bu bantlar haberleşme için uygun pencereler oluşturmaktadır.

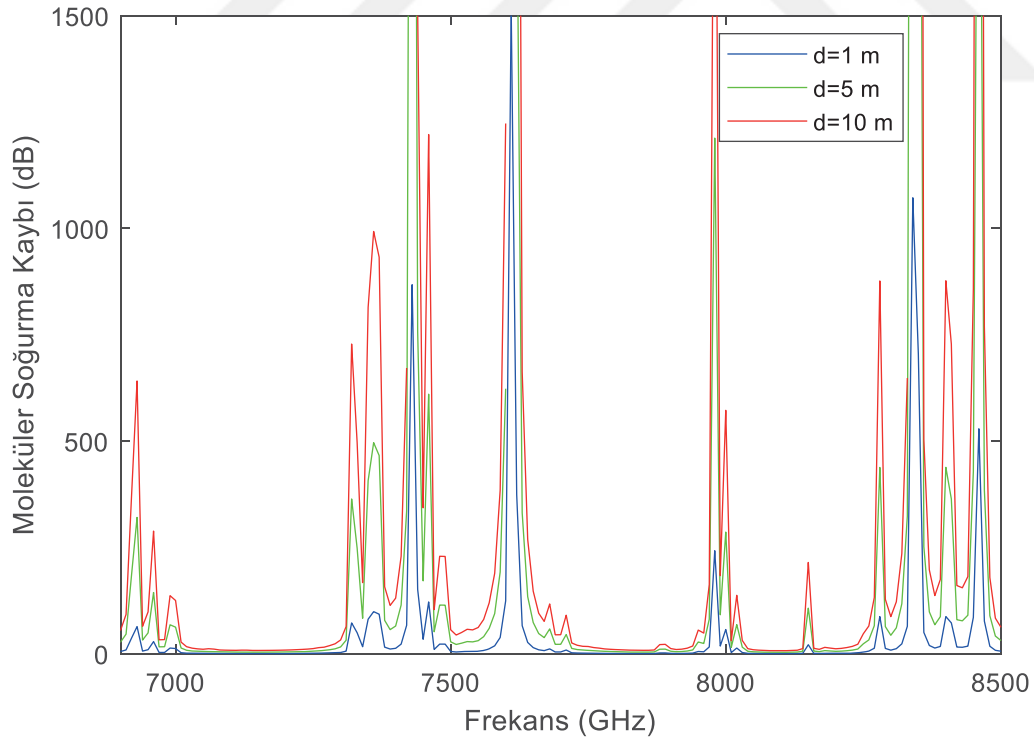


Şekil 3.7. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm, d = 1m

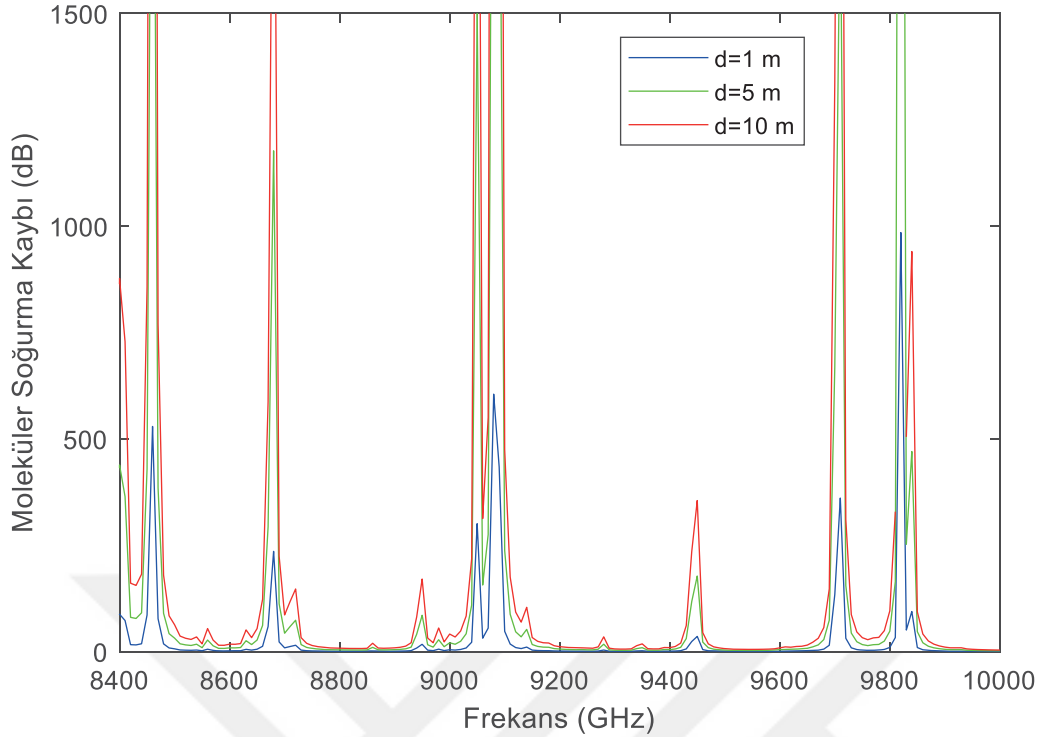
Soğurmanın daha az yaşandığı 0,1 – 1,6 THz, 6,9 – 8,5 THz ve 8,4 – 10 THz alt bantlarına ait moleküler soğurma kaybı daha detaylı incelenmek üzere sırasıyla Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da verilmektedir. Şekillerde alıcı ve verici arasındaki mesafenin de moleküler soğurma üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 3.8 incelendiğinde, 1,5 THz e kadar soğurmanın çok belirgin olmadığı, sadece birkaç frekansta anlık artış yaşandığı görülmektedir. Ancak alıcı verici arasındaki mesafenin artmasıyla, moleküler soğurma ciddi boyutta artmaktadır. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 incelendiğinde, 7 – 10 THz bandında birkaç frekansta ciddi soğurma olmasına rağmen, 7,0 – 7,3 THz, 7,7 – 7,95 THz, 8,0 – 8,25 THz ve 8,5 – 8,65 THz, 8,7 – 9,0 THz, 9,1 – 9,65 THz aralarının kullanılabilir alt bantlar olduğu görülmektedir. Bu bantlarda çalışacak sistemlerin, bu durumu göz önünde bulundurarak durağan olan bantları tercih etmesi gerekmektedir. Burada da alıcı verici arasındaki mesafenin etkisi açıkça görülmektedir. Bu frekanslarda çalışan sistemlerin kısa mesafeli olması gerektiği açıktır.



Şekil 3.8. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm



Şekil 3.9. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm

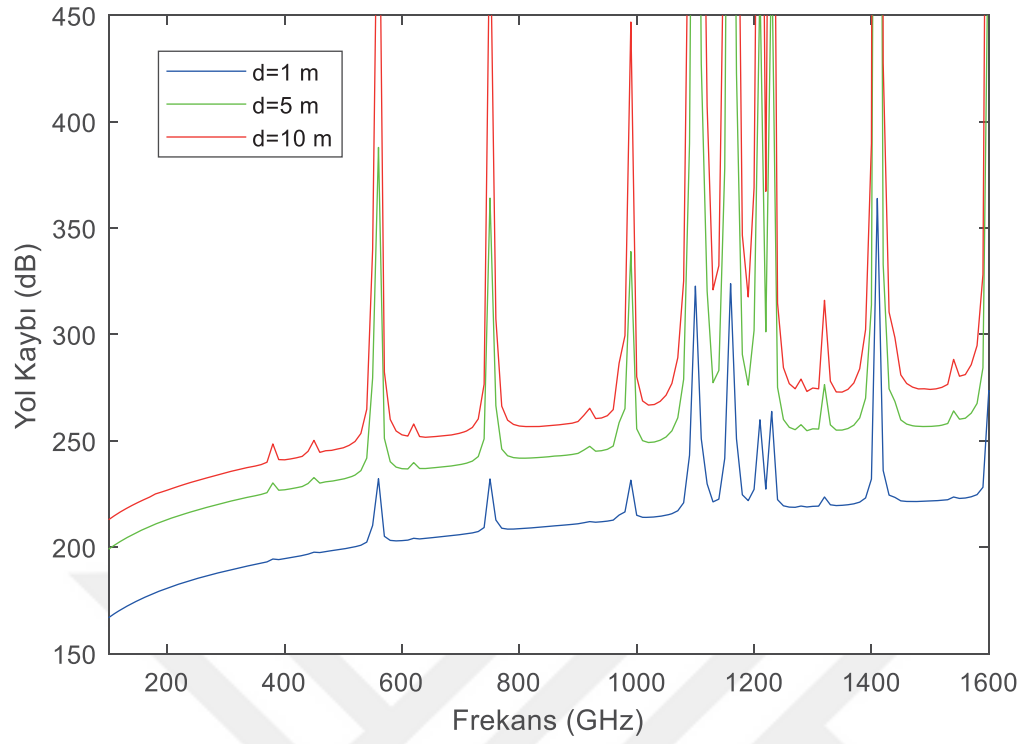


Şekil 3.10. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm

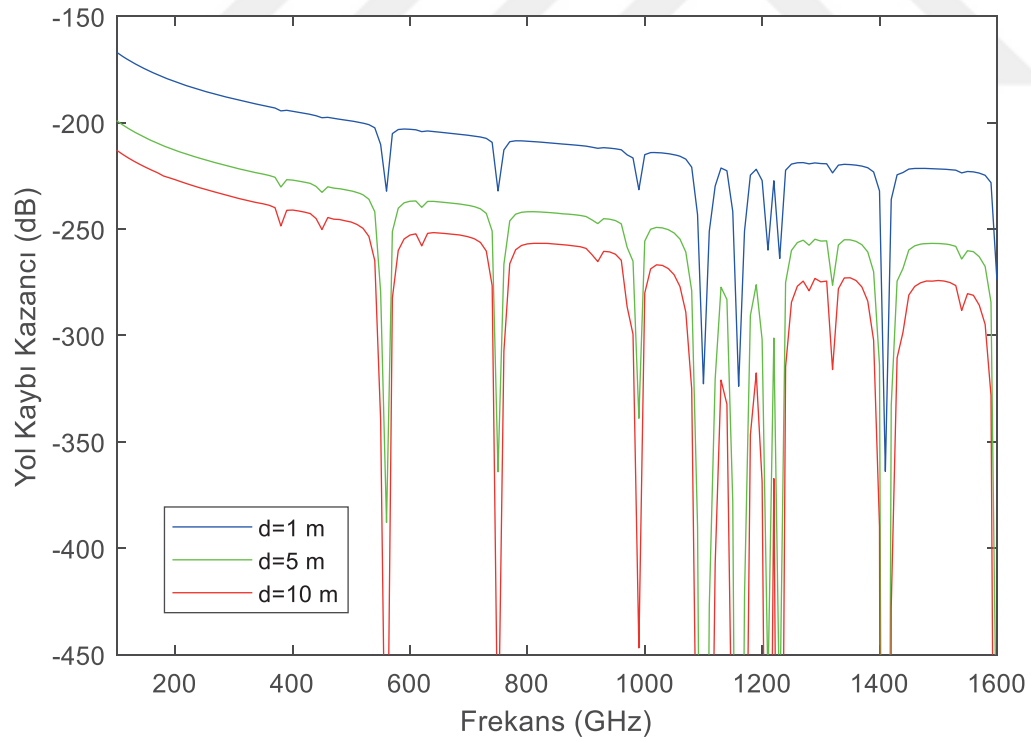
3.1.3. Toplam yol kaybı

Boş alan yol kaybı ve moleküler soğurmanın toplam etkisi olan yol kaybı, 0,1 – 1,6 THz alt bandında 1 atm, 25°C ve %50 nem ortamı için HITRAN veritabanı kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3.11’de verilmiştir. İki kaybın bileşik etkisi görülmektedir. Beklendiği üzere, frekans arttıkça ve alıcı ile verici arasındaki mesafe arttıkça yol kaybı artmaktadır. Moleküler soğurmadaki anlık yükselişler etkisini göstermektedir. Özellikle mesafe büyük olduğunda bu kaybın boş alan yol kaybına oranla çok daha etkili olduğu görülmektedir. Üst bantlarda da moleküler soğurmaya paralel bir yol kaybı gözlemlenecektir.

Yol kaybı kazancı da Şekil 3.12’de verilmiştir. THz dalgaların frekans seçiciliği açıkça görülmektedir. Sistemlerin çalışma bandı belirlenirken belli frekanslardaki ani düşüşlerin yaşandığı frekanslardan kaçınmak gereklidir. Özellikle alıcı verici arasındaki mesafe arttıkça bu frekanslara daha çok dikkat etmek gerekmektedir.



Şekil 3.11. Yol kaybı, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm



Şekil 3.12. Yol kaybı kazancı, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm

3.2. Çokluyol Sönümlemesi

THz kanalların, çokluyol sönümlemesinin simülasyonları deterministik Işın İzleme tekniği ile stokastik Saleh-Valenzuela modeli kullanılarak yapılmıştır. Bu modeller çokluyol sönümlemesini içerdiği gibi LoS yol kaybını da içerir.

3.2.1. Çokyollu kanalın deterministik modellenmesi

Işın izlemeye ait ilk tekniklerden olan Monte Carlo (MC) Işın İzleme tekniğinde [84] rastgele yayılan ışınlar yüzeylere çarptığında, güçleri yüzeylerin yansıma katsayısıyla azalır ama yine yönleri olasılıksal bulunan yeni ışınlar üretilir. Rastgele yönlerde üretilen bu ışınlar oda boyunca izlenir ve alıcıya ulaşan ışınlarla CIR elde edilir. Ancak bu algorithmada alıcıya ulaşabilen ışın sayısı düşüktür, bu nedenle kanalın modellenmesi uzun zaman almaktadır. Süreyi kısaltmak için geliştirilen Modifiye Monte Carlo (MMC) algoritmasında [85] ışınlar odada rastgele şekilde belirlenen yönlerle ilerlemeye devam ederken, her yansıma noktasından alıcıya LoS olduğu varsayılır, böylece kaynaktan çok daha az sayıda çıkan ışın CIR hesaplamak için yeterli olacaktır. Bu çalışmada THz kanalının deterministik modellenmesi için literatürde bulunan MMC'nin bir versiyonu [86] uyarlanmıştır.

Kısa dalgaboyu nedeni ile THz dalgalarında yansımaların yanında saçılma ve kırılmalar da görülecektir [87]. Ancak dalgaboyu ile yüzeyin pürüzlülüğü ilişkisi ve geliş açısına bağlı olarak saçılma ve kırılmalarda zayıflama ciddi boyutta olacaktır. Literatürdeki çalışmalarda kanal ölçümlerinde saçılma ve kırılmaların belirgin etkisi görülmemiştir. Bu nedenle simülasyonlarda saçılma ve kırılmalar ihmal edilmiş, sadece yansımalar ele alınmıştır. Simülasyonlarda bir diğer varsayım odanın boş olduğudur. Eşya olma durumunda yansıma sayısının artması beklenir, ancak güçleri çok daha düşük seviyede olacaktır. Dolayısıyla eşyalara çarparak oluşabilecek yansımalar ihmal edilmiş, sadece duvarlardan, tavandan ve zeminden olan yansımalar ele alınmıştır.

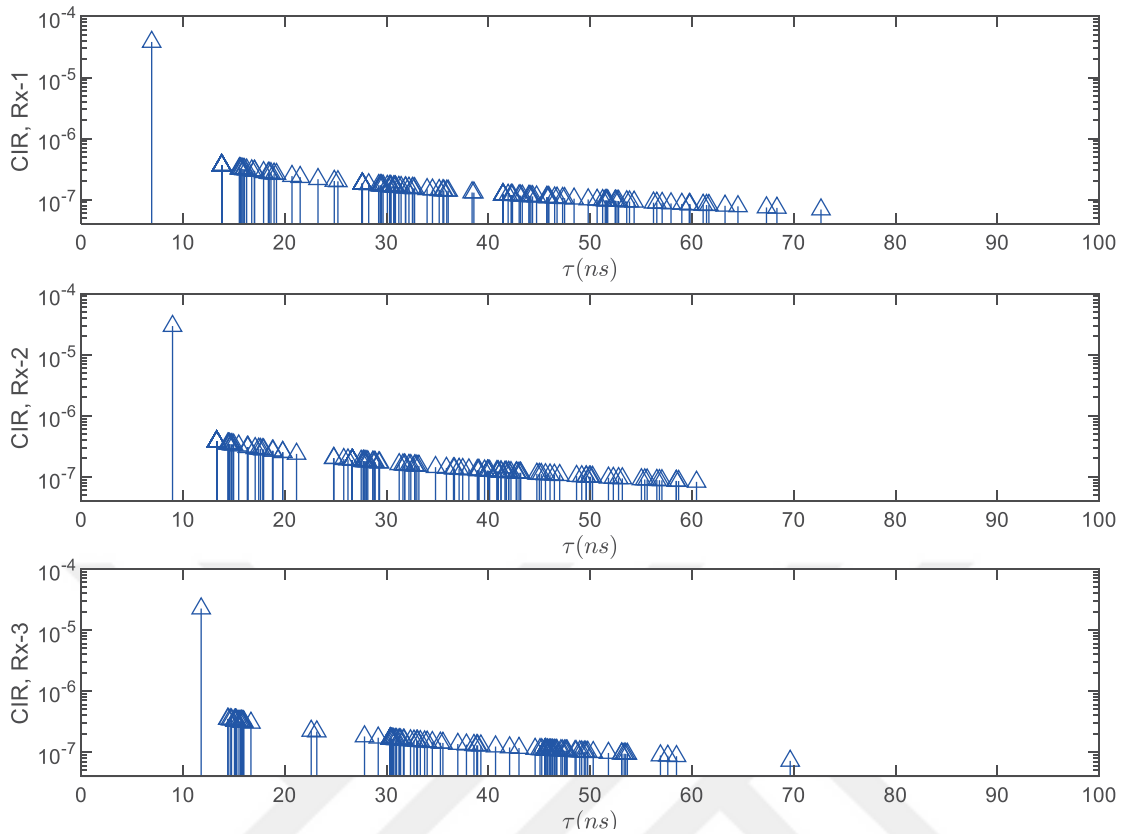
Oda boyutunun ve alıcı verici konumlarının CIR üzerindeki etkisini gözlemlemek için, yükseklikleri 3 m olan dört farklı oda ele alınmıştır. Bu odalardan Oda-1 6 m², Oda-2 8 m², Oda-4 12 m² boyutlarında dikdörtgen şeklinde iken Oda-3, 9 m² kare şeklindedir. Vericinin odanın üst tavan köşesine, tavandan 0,20 m aşağıda ($[x \ y \ z] = [0 \ 0 \ 2,80]$ m) monte edildiği varsayılmıştır. Alıcının ise bir masanın üzerinde veya bir kişinin elinde, zeminden 0,80 m

yukarıda olduğu varsayılmıştır. Çokluyol sönümlemesinin etkisini daha iyi gözlemlemek amacıyla bu odalarda vericiye yakın köşede, odanın ortasında ve vericiye uzak köşede olmak üzere üç farklı alıcı konumu belirlenmiştir. Oda ve alıcı bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Oda-1, Oda-2, Oda-3 ve Oda-4 için alıcı konumları

	Alıcı	Konum [x y z]	Alıcı/Verici Mesafesi
Oda-1 (2m x 3m x 3m)	Rx-1	[0,40 0,40 0,80] m	2,07 m
	Rx-2	[1,00 1,50 0,80] m	2,70 m
	Rx-3	[1,50 2,50 0,80] m	3,53 m
Oda-2 (2m x 4m x 3m)	Rx-1	[0,40 0,40 0,80] m	2,07 m
	Rx-2	[1,00 2,00 0,80] m	3,00 m
	Rx-3	[1,50 3,50 0,80] m	4,30 m
Oda-3 (3m x 3m x 3m)	Rx-1	[0,40 0,40 0,80] m	2,07 m
	Rx-2	[1,50 1,50 0,80] m	2,91 m
	Rx-3	[2,50 2,50 0,80] m	4,06 m
Oda-4 (3m x 4m x 3m)	Rx-1	[0,40 0,40 0,80] m	2,07 m
	Rx-2	[1,50 2,00 0,80] m	3,20 m
	Rx-3	[2,50 3,50 0,80] m	4,74 m

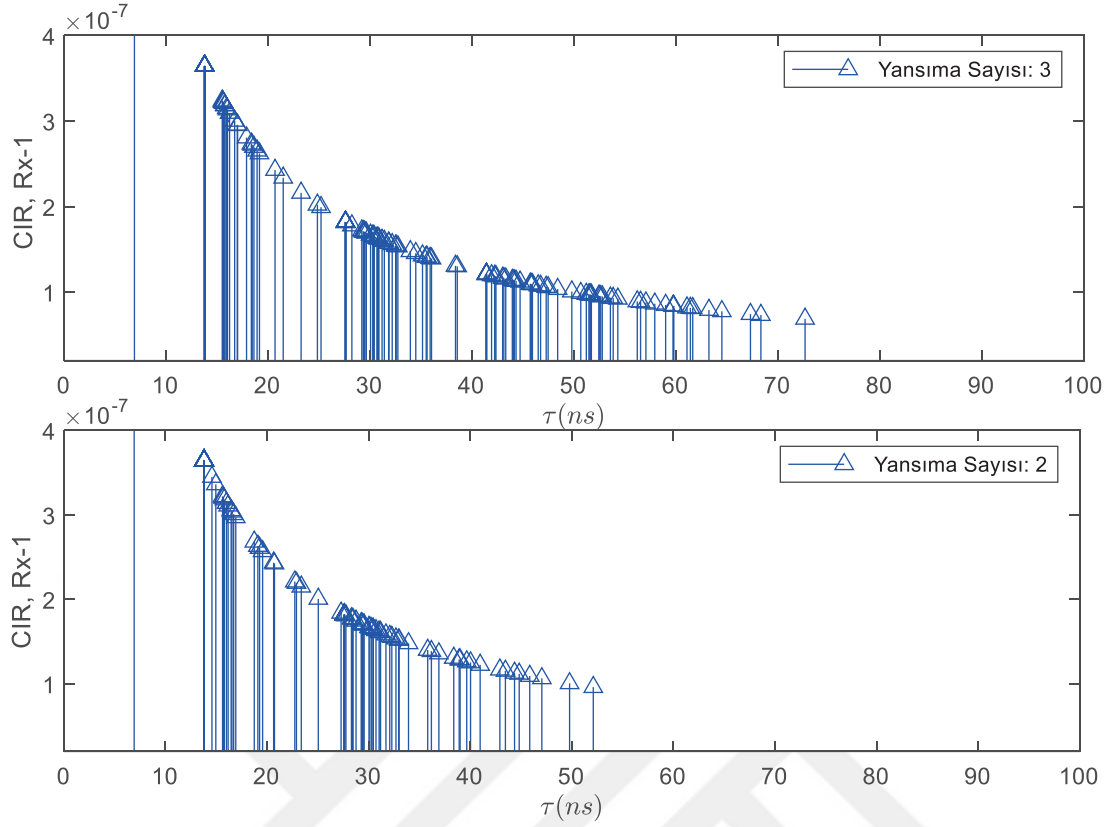
Bu odalarda belirtilen alıcı konumlarında merkez frekans 300 GHz için kanalın dürtü ve frekans tepkileri incelenmiştir. 1 atm basınç, 25°C sıcaklık ile %50 nemli ortamlar ele alınmıştır. Üretilen ışın sayısı 50, yansıma sayısı 3’tür. Yansımaların etkisini maksimum oranda görebilmek adına yansımalarda dalganın gücünün %95 yansıdığı varsayılmıştır. Oda-1’deki Rx-1, Rx-2 ve Rx-3 konumları için CIR grafikleri Şekil 3.13’de verilmiştir. Rx-1 konumunda LoS hattı 6,93 ns’de genliği $3,82 \cdot 10^{-5}$ olarak görülmektedir. Rx-2 konumunda $2,95 \cdot 10^{-5}$ genlikli LoS hattı 8,98 ns gecikmelidir. Rx-3 konumunda ise $2,24 \cdot 10^{-5}$ genlikli LoS hattı 11,79 ns gecikmiştir. Alıcı vericiden uzaklaştıkça LoS ve tüm yansımaların genlikleri düşmekte, gecikmeleri artmaktadır. Dikkat çeken bir diğer nokta LoS ile en güçlü yansıma arasındaki büyük genlik farkıdır. Rx-1 konumunda bu genlik farkı yaklaşık olarak 105 kat, Rx-2 konumunda 78 kat ve Rx-3 konumunda ise 64 kat olarak görülmüştür. THz dalgalarda mesafeyle yol kaybının ciddi artması bu sonucu doğurmuştur.



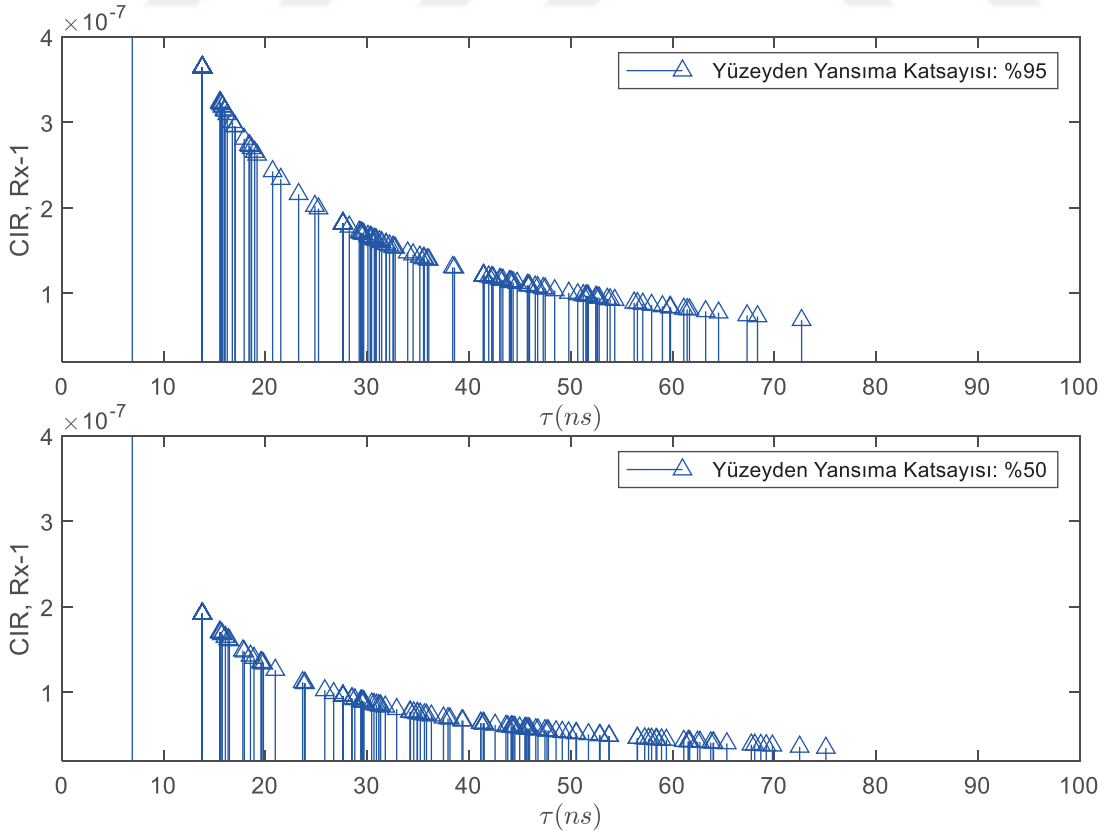
Şekil 3.13. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, 300 GHz, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği

Yansıma sayısı ile yansımalar arasındaki ilişkiyi daha iyi gözlemlemek için Oda-1 Rx-1 konumunda aynı şartlara ait CIR grafiği ama iki yansımalı haliyle Şekil 3.14’de verilmiştir. Görüldüğü üzere bir eksik sayıda yansıma sonucu ile gelenler daha yüksek genlikli ve daha az gecikmeli olmaktadır. Güçlerin zayıflaması üstel özellik göstermektedir. Yansıma sayısını artırmak, maksimum yansıma süresini ve oluşan yansıma sayısını artırsa da güçler azalacağından ihmal edilecek seviyededir. Diğer yansımaların CIR üzerindeki etkisi önemsiz olacağı için çalışmanın geri kalanında azami yansıma sayısı 3 olarak seçilmiştir.

Yansıma katsayısının etkisini görmek ve kıyaslamak amacıyla %95 ve %50 güçle yansıma ile Oda-1 Rx-1 konumuna ait grafikler Şekil 3.15’de verilmiştir. Görüldüğü üzere pürüzlü yüzeylerde yansıma katsayısı düşüktüğü yansımalar daha da zayıflamaktadır.

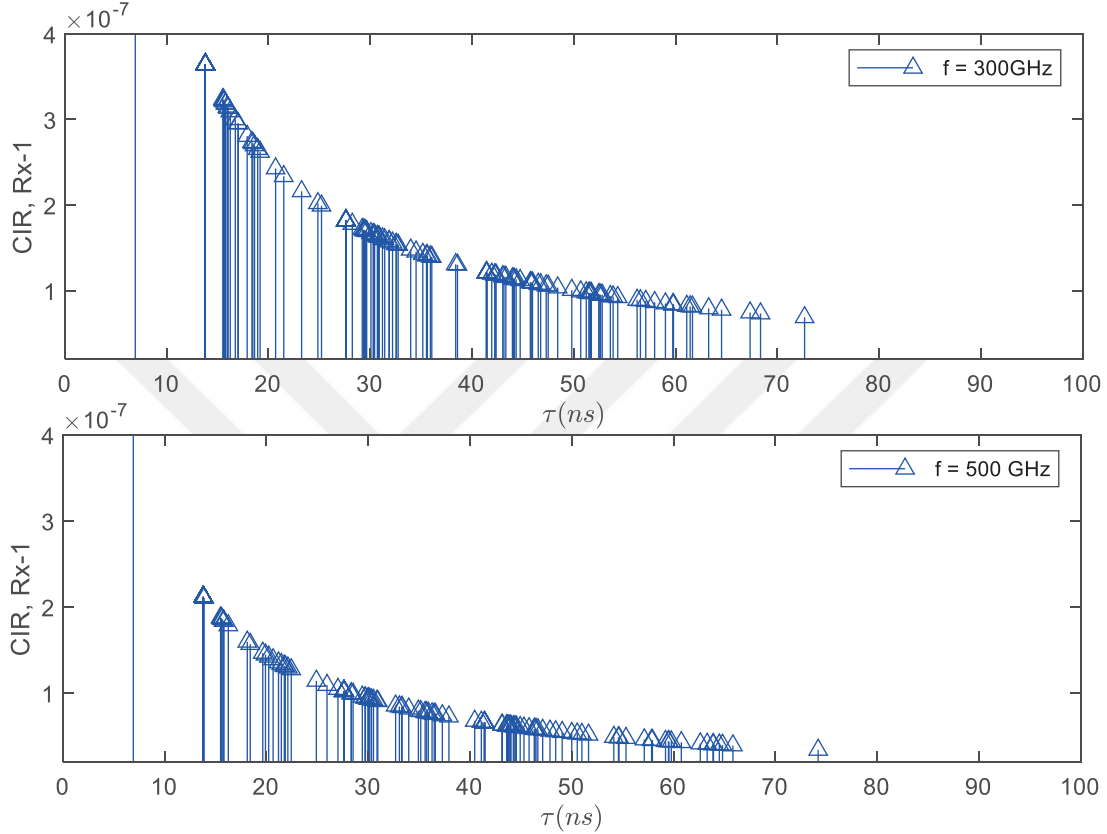


Şekil 3.14. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, Rx-1, 300 GHz, 3 ve 2 yansımaya sayısı



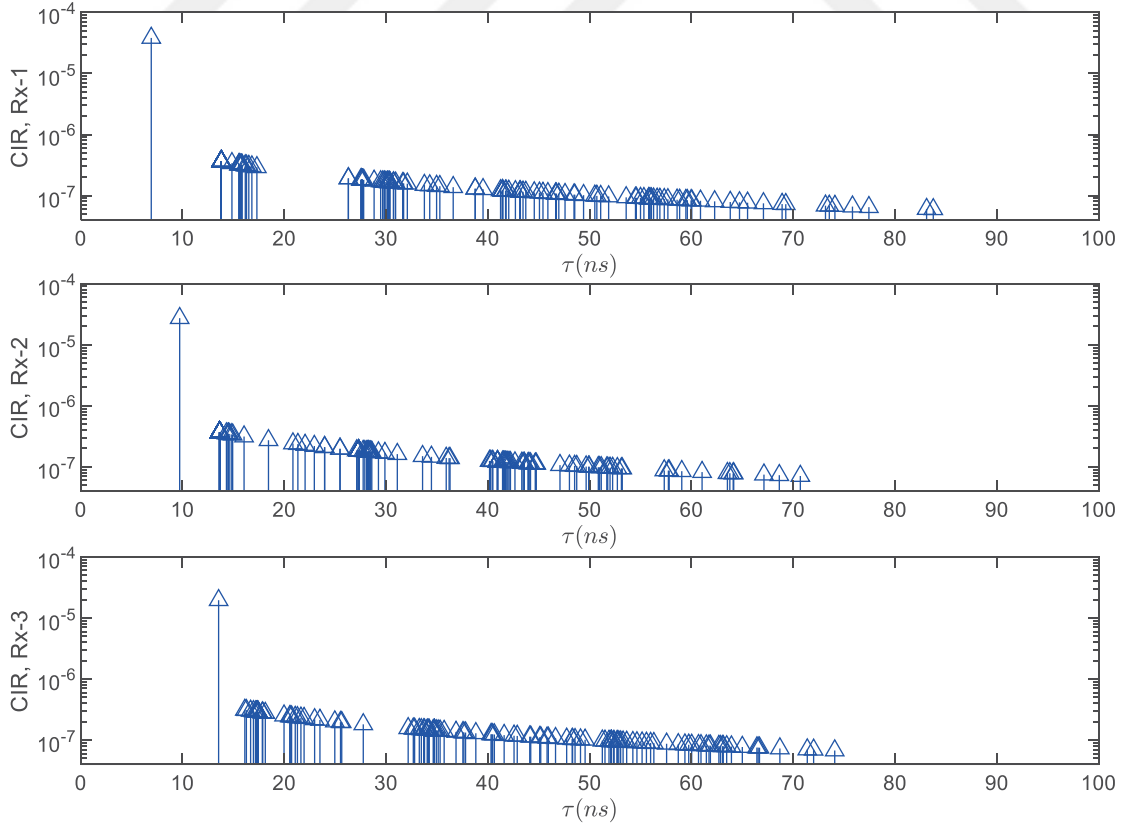
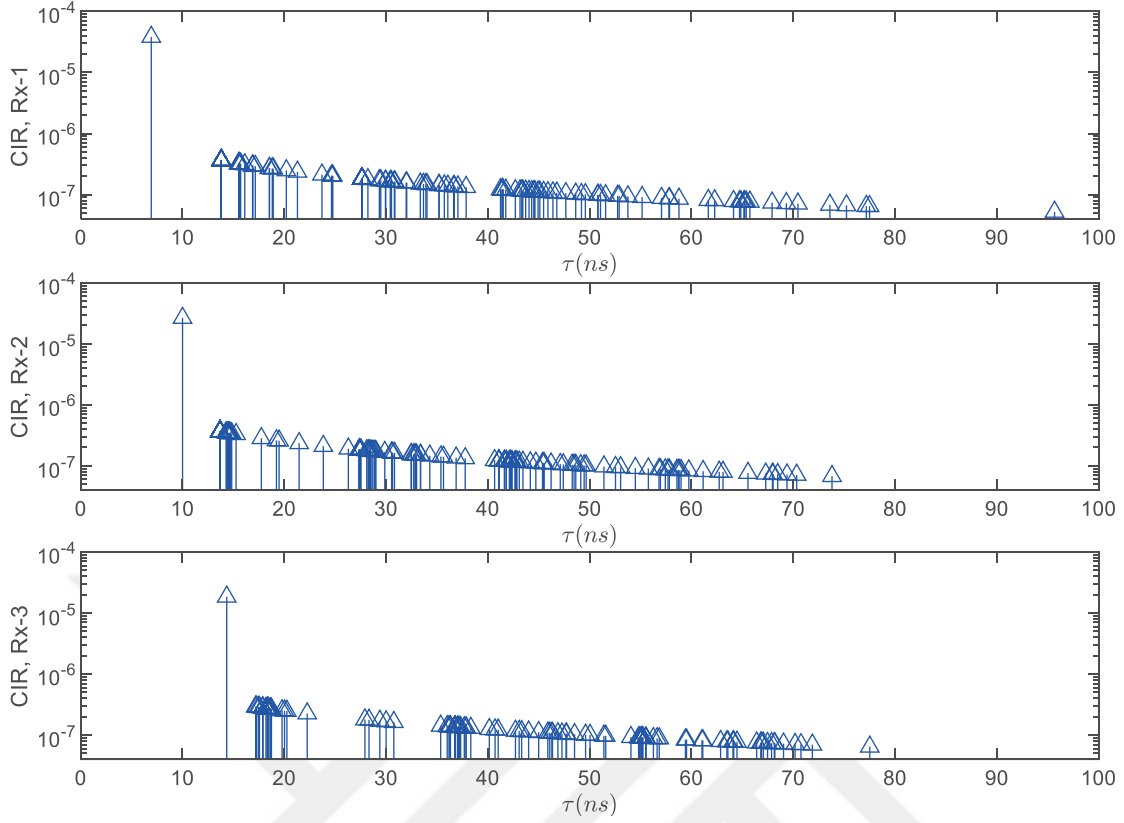
Şekil 3.15. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, Rx-1, 300 GHz, %95 ve %50 yansımaya gücü

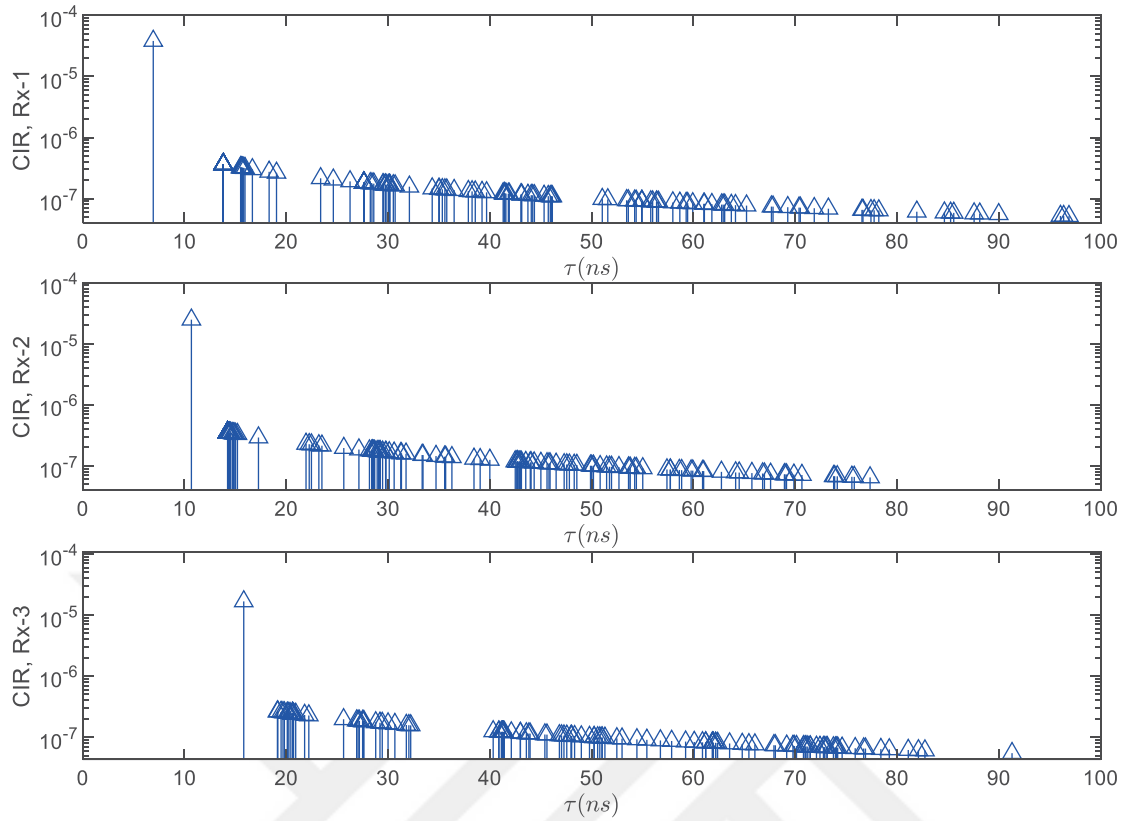
Aynı odada yine Rx-1 konumuna ait ama 500 GHz frekans için CIR grafikleri Şekil 3.16’da verilmiştir. Şekilde LoS genliği 300 GHz için $3,82 \cdot 10^{-5}$ iken 500 GHz için $2,25 \cdot 10^{-5}$ ’e düşmüştür. Yansımalarda da zayıflama görülmektedir. Beklendiği üzere THz haberleşmede frekansın artması sinyalleri zayıflatmıştır.



Şekil 3.16. Kanal dürtü tepkisi, Oda-1, Rx-1, 300 GHz ve 500 GHz

Oda-2, Oda-3 ve Oda-4 için Çizelge 3.1’de verilen alıcı konumlarına göre 300 GHz’de CIR grafikleri sırasıyla Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da verilmiştir. Her üç şekilde de alıcı uzaklaştıkça LoS ve yansımaların gecikmesi artmaktadır. Yine yansımaların LoS’a göre çok daha zayıf oldukları görülmektedir. Bazı konumlarda yansımaların kümelenmesi de dikkati çekmektedir.





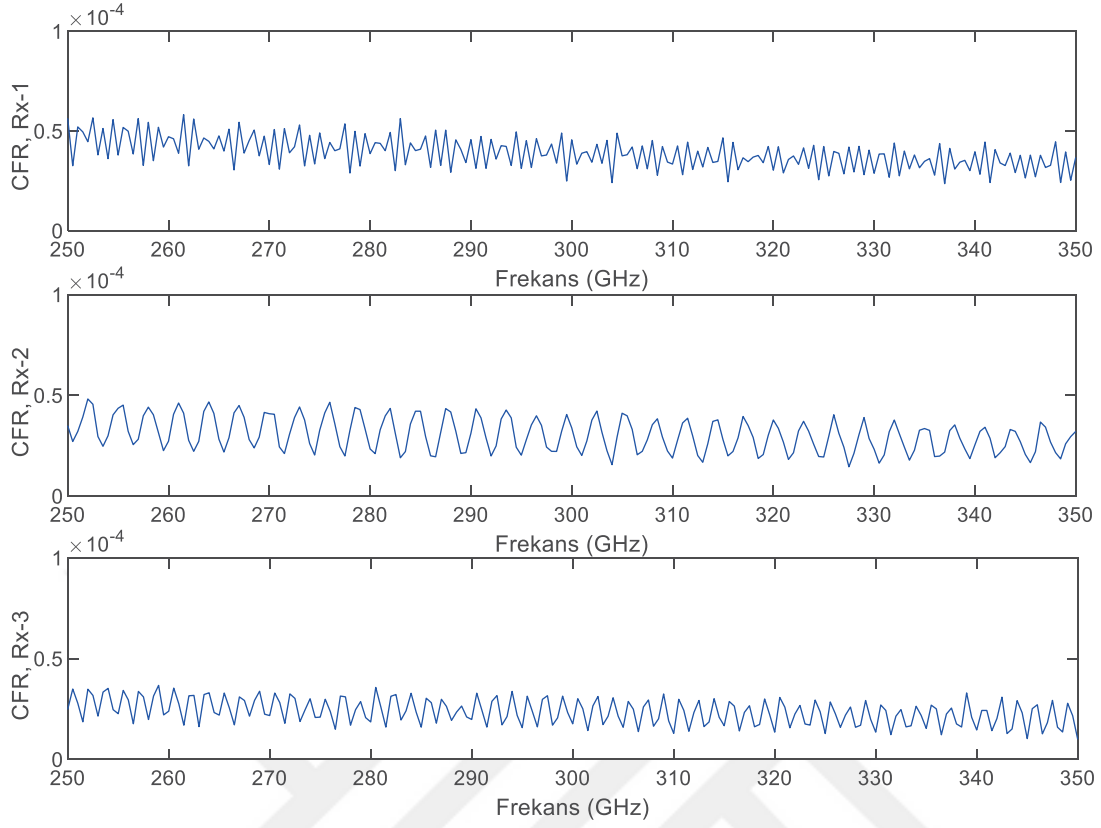
Şekil 3.19. Kanal dürtü tepkisi, Oda-4, 300 GHz, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği

Kanalın karakteristiğini analiz etmek amacıyla, dört odada bütün alıcı konumları için rms gecikme yayılımı, uyumluluk bant genişliği ve Rician faktör değerleri hesaplanmış, bulunan değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Beklendiği üzere alıcı ile verici arasındaki mesafenin artması rms gecikme yayılımının artmasına neden olmuştur. Rms gecikme yayılımında oda boyutu veya şekli ile ilgili bir değişim gözlemlenmemiştir. Rms gecikme yayılımı ile ters orantılı olan uyumluluk bant genişliği ise mesafeyle beraber azalmaktadır, ancak bu azalma ciddi boyutta değildir. Rician faktörler incelendiğinde güçlü LoS’den dolayı oldukça yüksek değerler görülmektedir. Rician faktör açısından da odalar arasında önemli bir fark görülmemektedir, bütün oda ve konumlarda LoS sinyali, CIR grafiklerinde de görüldüğü gibi, oldukça baskındır. Alıcı/verici mesafesi ile K_{rf} ters orantılıdır, mesafe arttıkça değer düşmektedir.

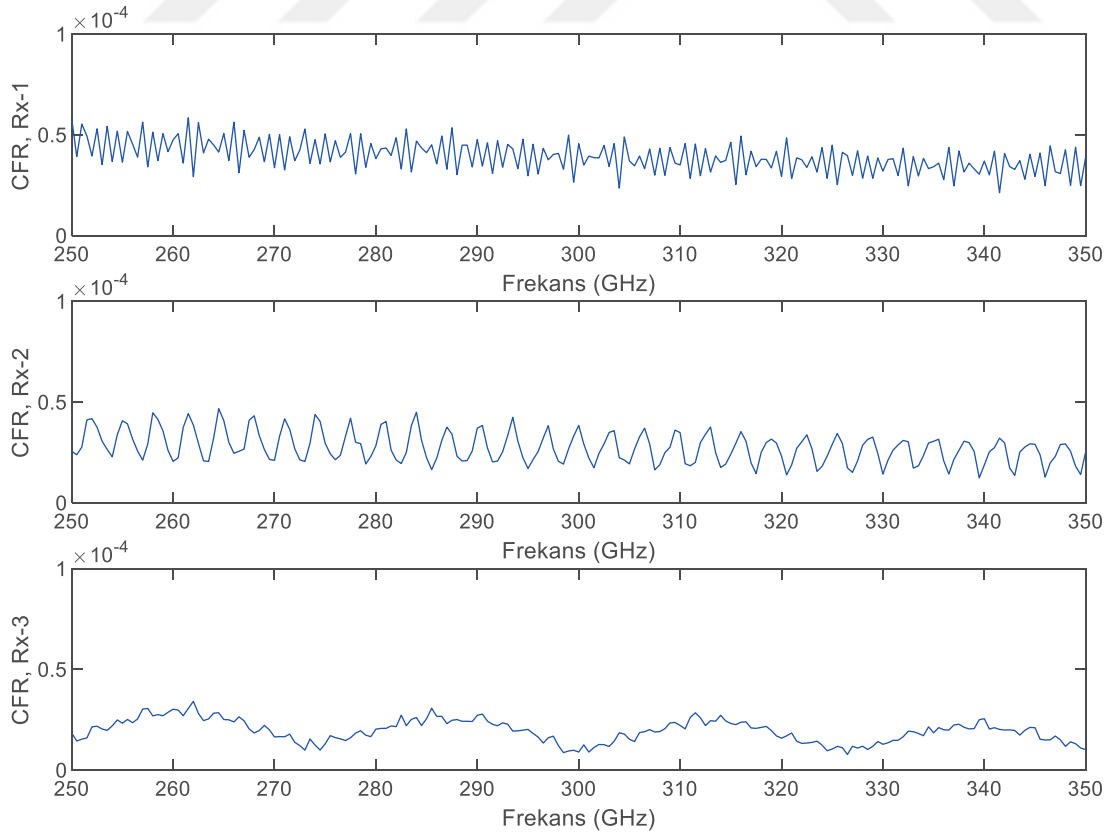
Çizelge 3.2. Işın izleme tekniği τ_{rms} , B_c , K_{rf} değerleri

		τ_{rms}	B_c	K_{rf}
Oda-1	Rx-1	1,542 ns	129,68 MHz	231,93
	Rx-2	1,910 ns	104,66 MHz	121,84
	Rx-3	2,406 ns	83,10 MHz	80,59
Oda-2	Rx-1	1,540 ns	129,82 MHz	228,25
	Rx-2	2,069 ns	96,66 MHz	101,99
	Rx-3	2,864 ns	69,82 MHz	76,48
Oda-3	Rx-1	1,538 ns	129,97 MHz	230,91
	Rx-2	2,038 ns	98,10 MHz	100,61
	Rx-3	2,700 ns	74,05 MHz	77,39
Oda-4	Rx-1	1,533 ns	130,40 MHz	231,43
	Rx-2	2,242 ns	89,17 MHz	95,08
	Rx-3	3,195 ns	62,59 MHz	78,83

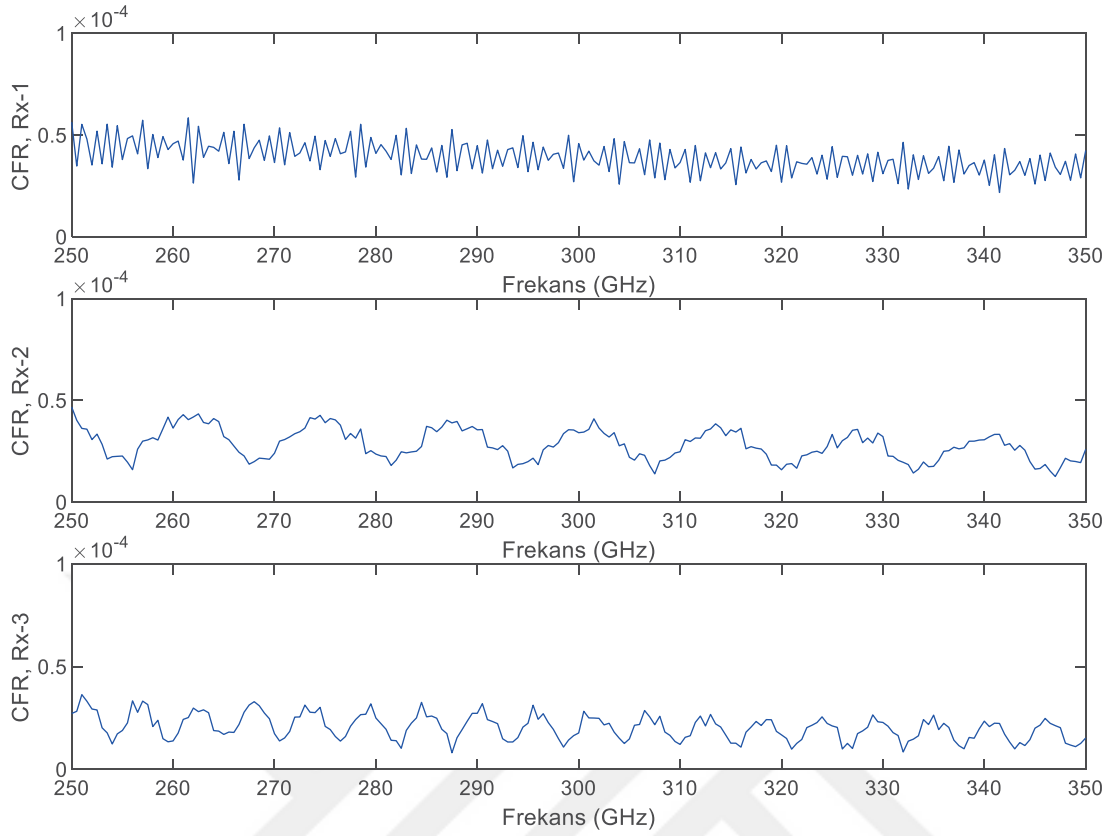
Verilen odalara ait çalışma frekansı etrafındaki bandı incelemek amacıyla bu bantlardaki kanal frekans tepkisi incelenmiştir. Dört oda için üç farklı konumun CFR grafikleri sırasıyla Şekil 3.20 – 3.23 de verilmiştir. Bütün oda ve konumlarda frekans seçicilik görülmektedir. Ancak Oda-2 Rx-3 konumunda frekans seçicilik periyodik bir salınım şeklindedir. Benzer durum Oda-3 Rx-2 için de olmaktadır. CIR grafikleri incelendiğinde bu özel durumlarda yansımalarda kümelenme olduğu görülmektedir. Bu salınımın olası nedeninin bu kümelenme olabileceği sonucuna varılmıştır.



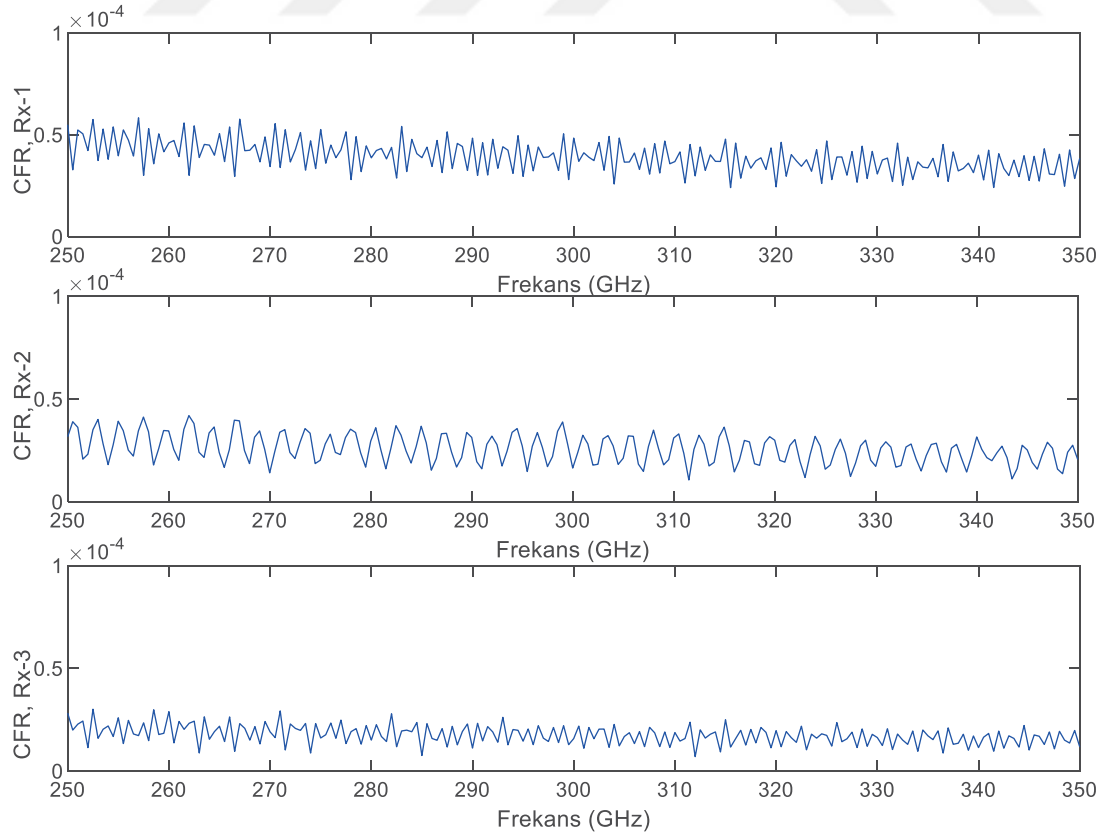
Şekil 3.20. Kanal frekans tepkisi, Oda-1, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği



Şekil 3.21. Kanal frekans tepkisi, Oda-2, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği



Şekil 3.22. Kanal frekans tepkisi, Oda-3, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği



Şekil 3.23. Kanal frekans tepkisi, Oda-4, Rx-1, Rx-2, Rx-3, ışın izleme tekniği

3.2.2. Çokyollu kanalın stokastik modellenmesi

Saleh-Valenzuela modeline dayanan iç mekân kanallarının modellenmesinde alıcıya ulaşan yansımaların ışınlardan oluşan kümeler halinde geldiği varsayılmıştır [58]. Bu modele göre iç mekânın temel yapısı kümeleri oluştururken, verici ve alıcının çevresindeki nesnelere ışınları oluşturur. İç mekân kanal ölçümleriyle uyumlu olan bu modelde ışınların fazları düzgün dağılımlı, genlikleri ise Rayleigh dağılımlıdır. Küme ve ışın varış zamanları, bir önceki kümenin küme ve ışın varış zamanına göre koşullu üstel dağıtılmış rastgele değişkenlerdir [58]. Kümeler ve küme içindeki ışınların sayısı, varış oranlarının iki bağımsız Poisson süreci ile belirlenir [58].

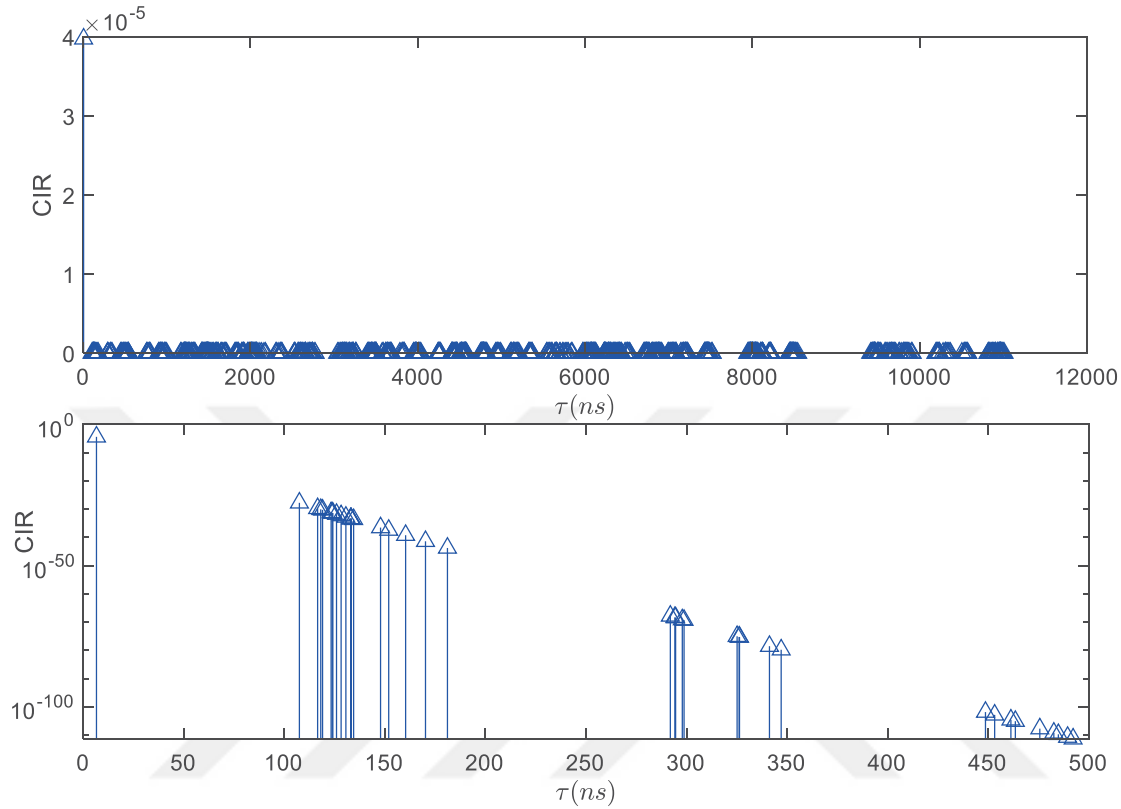
Literatürde önerilen bu stokastik modelin THz kanalları için doğruluğu 550 GHz'e kadar onaylanmıştır [58]. Bu modelde küme varış oranı LoS gecikmesinin tersinden küçük olmalıdır. Alıcı verici arasındaki mesafenin 2 m olduğu düzenek için LoS gecikmesi 6,67 ns olacaktır. Bu durumda CAR $0,15 \text{ ns}^{-1}$ 'den küçük olmalıdır. Bu kriterlere bağlı olarak Saleh-Valenzuela modelinin parametrelerinin etkisini gözlemlemek amacıyla farklı parametre setleri tanımlanmış ve kullanılan parametre setleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Saleh-Valenzuela modeli parametre tablosu

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5
Küme zayıflama faktörü (Cluster Decay Factor, CDF)	1 ns	1 ns	1 ns	10 ns	10 ns
Işın zayıflama faktörü (Ray Decay Factor, RDF)	1 ns	1 ns	1 ns	1 ns	10 ns
Küme varış oranı (Cluster Arrival Rate, CAR)	$0,01 \text{ ns}^{-1}$	$0,15 \text{ ns}^{-1}$	$0,15 \text{ ns}^{-1}$	$0,15 \text{ ns}^{-1}$	$0,15 \text{ ns}^{-1}$
Işın varış oranı (Ray Arrival Rate, RAR)	$0,15 \text{ ns}^{-1}$	$0,15 \text{ ns}^{-1}$	$0,05 \text{ ns}^{-1}$	$0,15 \text{ ns}^{-1}$	$0,15 \text{ ns}^{-1}$

Çizelge 3.3'te verilen parametre setlerine ait CIR'lar 300 GHz merkez frekans ve 2 m alıcı verici mesafesi için takip eden şekillerde verilmiştir. Bu merkez frekans moleküler soğurmanın sabit kaldığı banttan seçilmiştir. 1 atm basınç, 25°C sıcaklık ile %50 nemli ortamlar ele alınmıştır. İlk parametre seti küme ve ışınların açıkça görülebilmesi amacıyla ayarlanmıştır. Şekil 3.24'de verilen simülasyonda 10'ar ışından oluşan 103 küme oluşmuştur. Maksimum gecikme 12000 ns civarındadır. Şekilde yansıma kümelerinin ve ışınların açıkça görülmesi amacıyla logaritmik skala kullanılmış, 500 ns'lik zamanda gelen

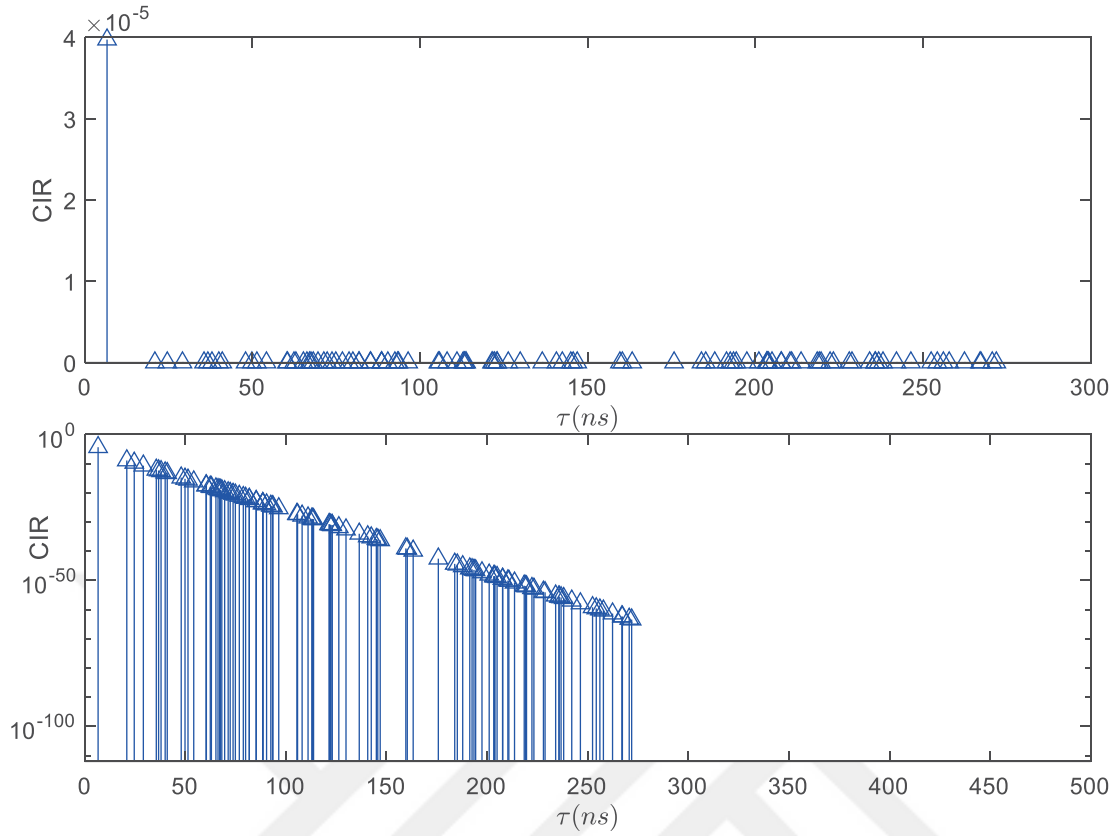
ilk 3 küme gösterilmiştir. Üstel azalma açıkça görülmektedir. Ancak yansımaların LoS'a göre çok daha zayıf olduğu da görülmektedir.



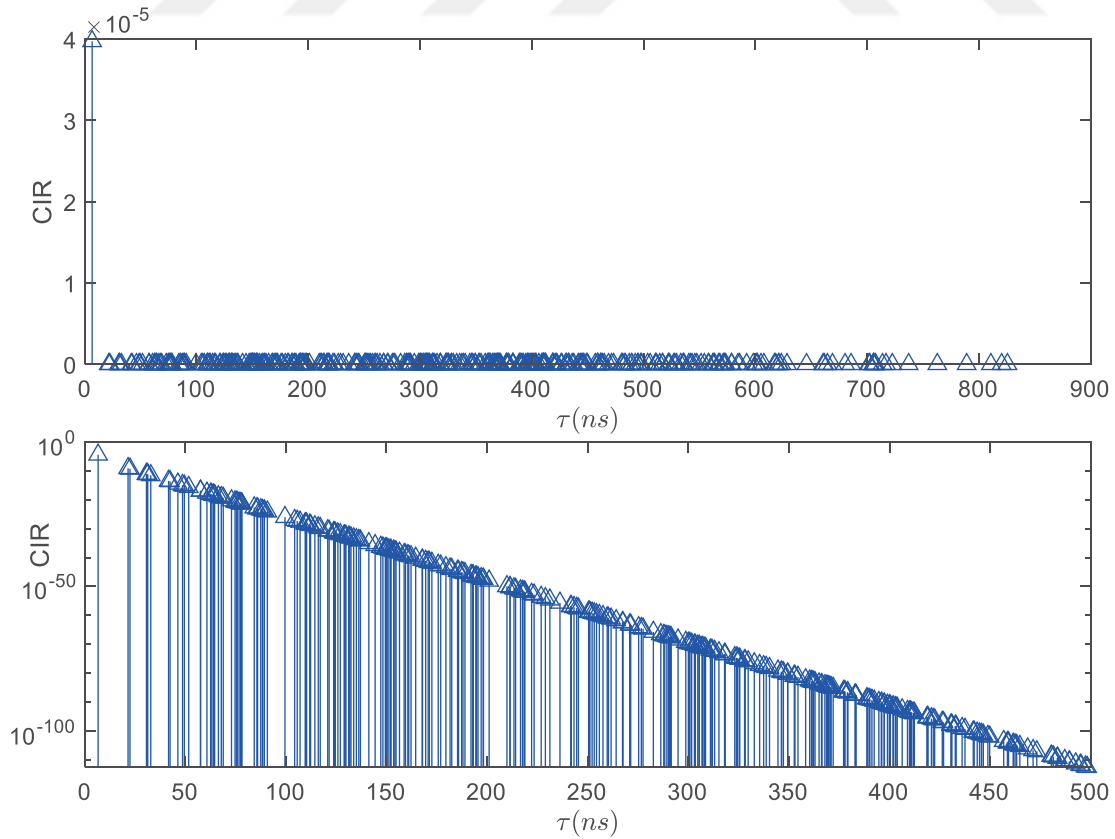
Şekil 3.24. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 1

Şekil 3.25 Set 2 parametreleri kullanılarak elde edilen örnek CIR grafiğini vermektedir. Simülasyonda 6'lı ışıktan oluşan 18 küme oluşmuştur. Şekil 3.24 ile kıyaslandığında, CAR'ın artması küme sayısını azaltmış ve kümeler birbirine yaklaşmıştır. Şekil incelendiğinde maksimum gecikmenin 300 ns'ye yakın olduğu görülmektedir. Burada dikkat çeken bir diğer nokta yansımalarındaki sönmülmenin azalmasıdır.

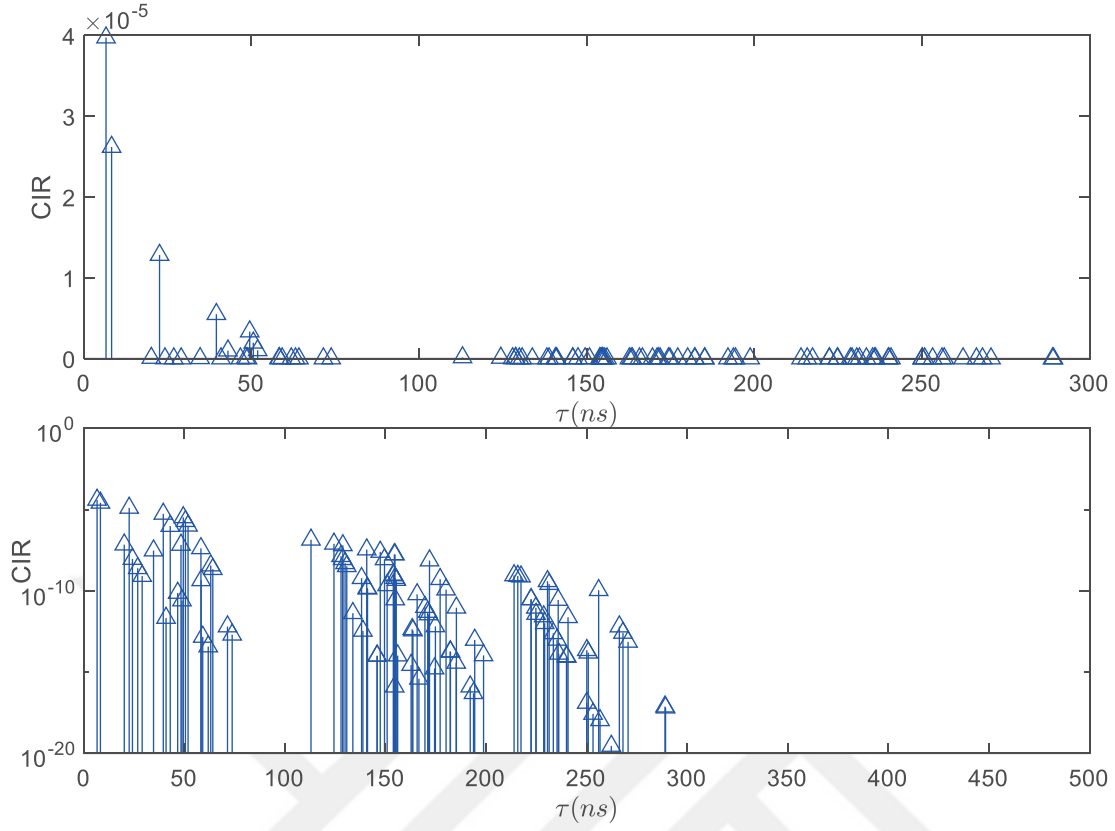
Set 3 parametrelerin kullanılmasıyla elde edilen örnek CIR Şekil 3.26'da verilmiştir. Simülasyon sonucunda 27 ışıktan oluşan 15 küme oluşmuştur, görüldüğü üzere RAR'ın azalması ışın sayısını artırmaktadır. Şekil incelendiğinde maksimum gecikmenin 900 ns'ye yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 sırasıyla Set 4 ve Set 5'in kullanılmasıyla elde edilen CIR örneklerini vermektedir. Görüldüğü üzere CDF artığında NLoS yansımalar belirginleşmekte, sönmülme zayıflamaktadır. RDF de artarsa bu etki çok daha belirgindir, NLoS yansımaların kuvvetlendiği açıkça görülmektedir. CDF ve RDF farklı olduğunda küme ve ışınların zayıflaması arasındaki fark da açıkça gözlemlenmektedir.



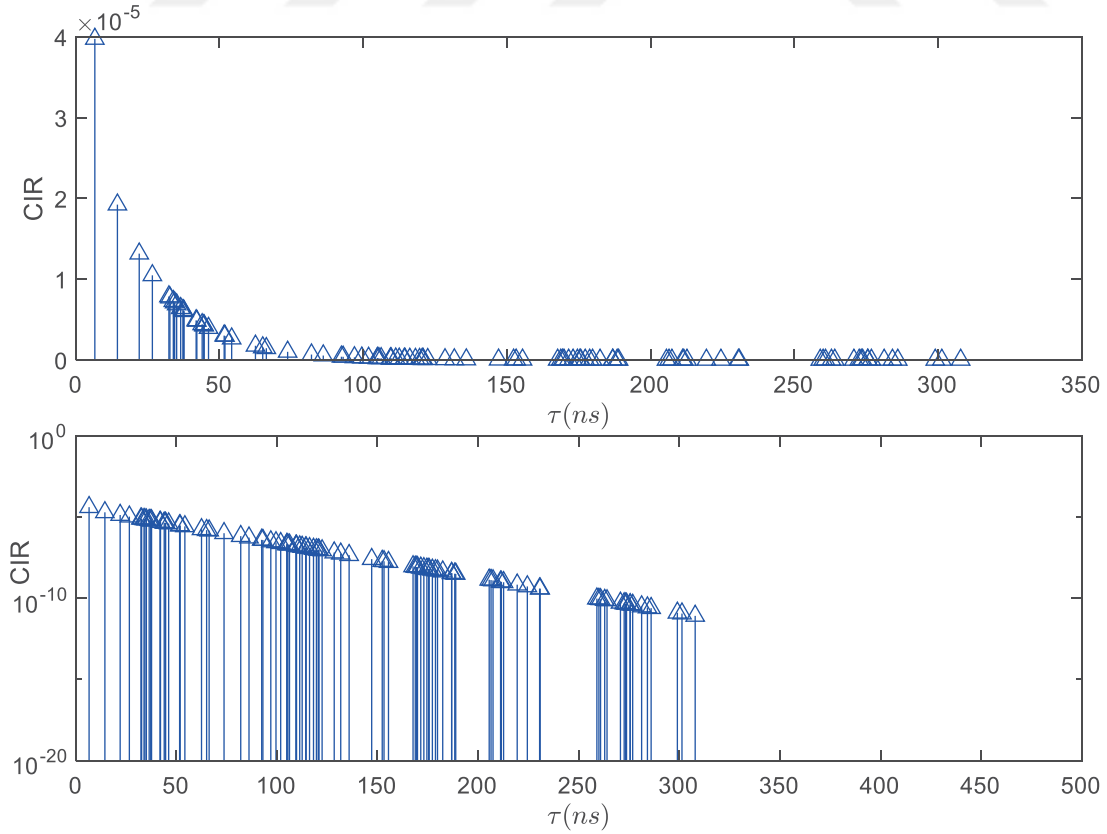
Şekil 3.25. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 2



Şekil 3.26. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 3

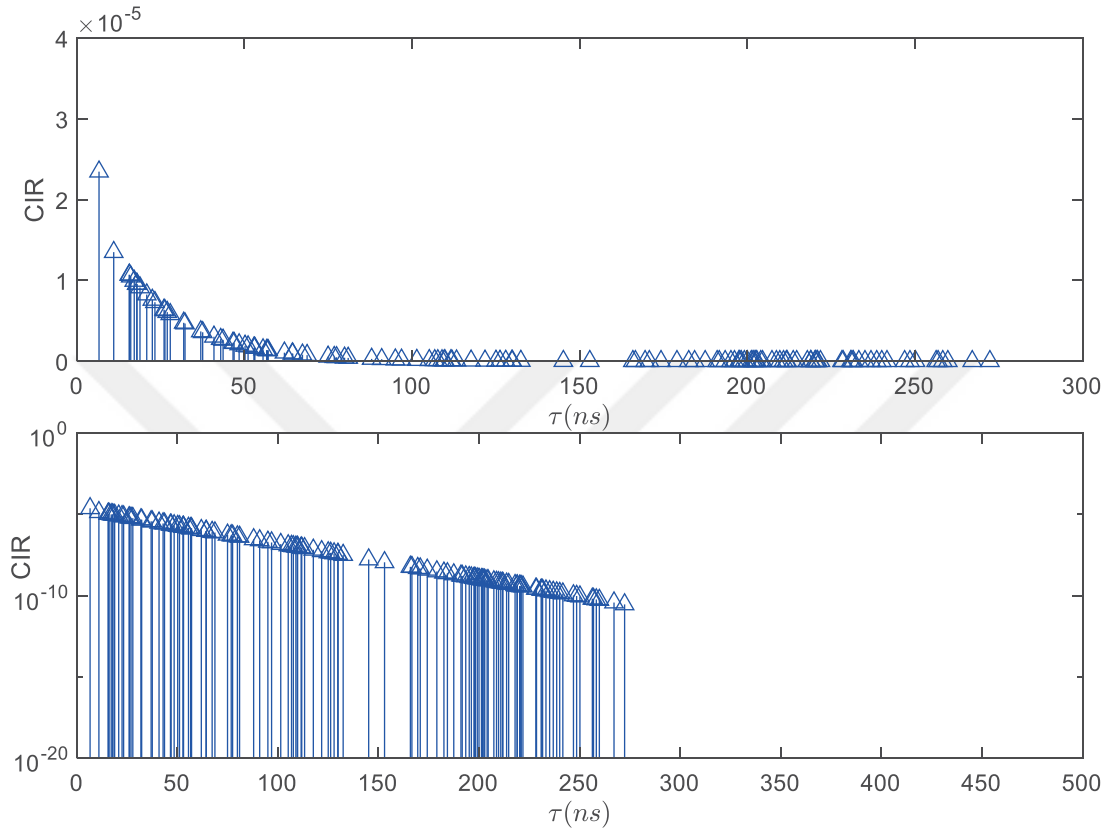


Şekil 3.27. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 4



Şekil 3.28. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 5

500 GHz merkez frekans için set 5 parametreleri ile simülasyonlar tekrar edilmiş, sonuçlar Şekil 3.29’da verilmiştir. Şekil 3.28 ile kıyaslandığında, frekansın yükselmesiyle kayıplar artmaktadır, bu da özellikle NLoS hatların etkisini daha da azaltmaktadır.



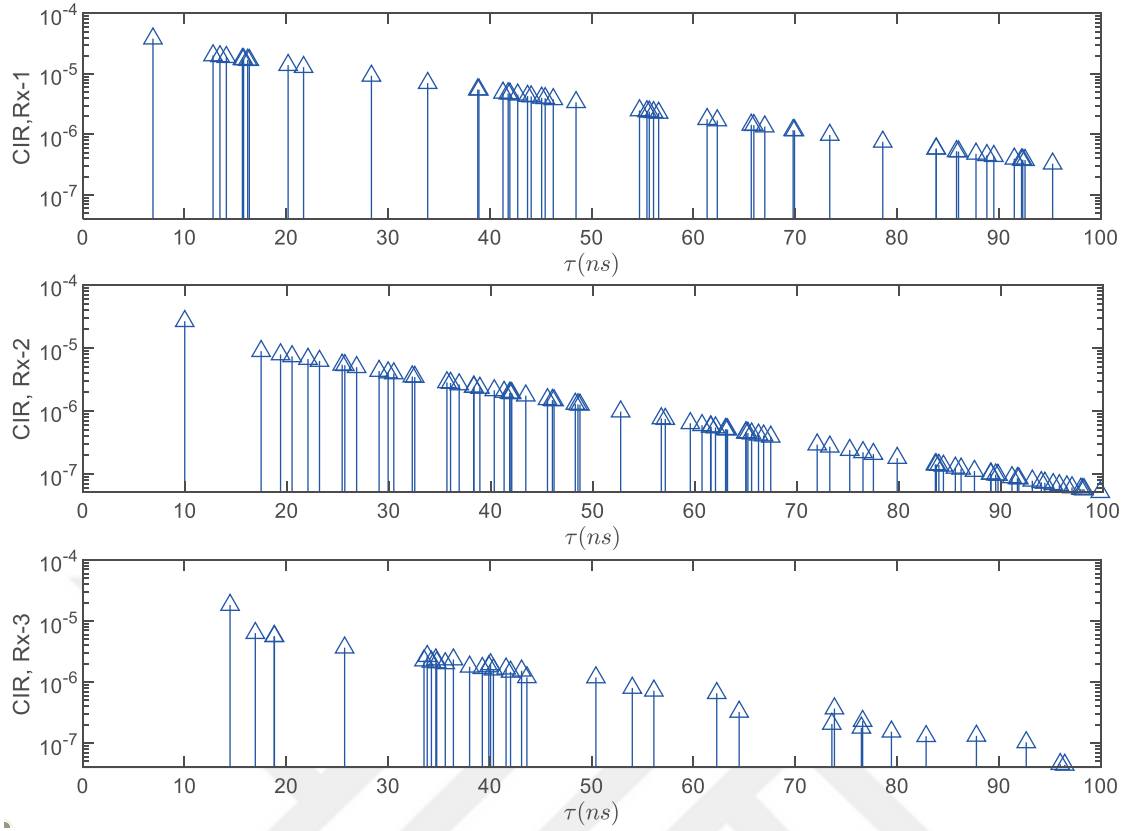
Şekil 3.29. Kanal dürtü yanıtı, 500 GHz, Saleh-Valenzuela modeli, set 5

Sonuç olarak, bu parametreler ayarlanarak pek çok ortam için kanal modellenebileceği açıktır. Bu amaçla çalışmada daha önce özellikleri verilen Oda-2 için stokastik kanal modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Oda-2'nin seçilme amacı Işın İzleme tekniği ile yapılan simülasyon sonuçlarında CIR grafiklerinde kümelenme görülmesidir. Stokastik olarak bu kümelenmenin modellenmesinin yapıp yapılmayacağı araştırılmalıdır. Ancak Şekil 3.17 incelendiğinde üç konum için de CIR grafiklerinde zayıflama eğiminin benzer olduğu görülmektedir. Bu da modelleme yapıldığında Saleh-Valenzuela model parametrelerinin birbirine yakın olacağını göstermektedir. Her üç konum için denemeler sonucunda elde edilen parametre değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

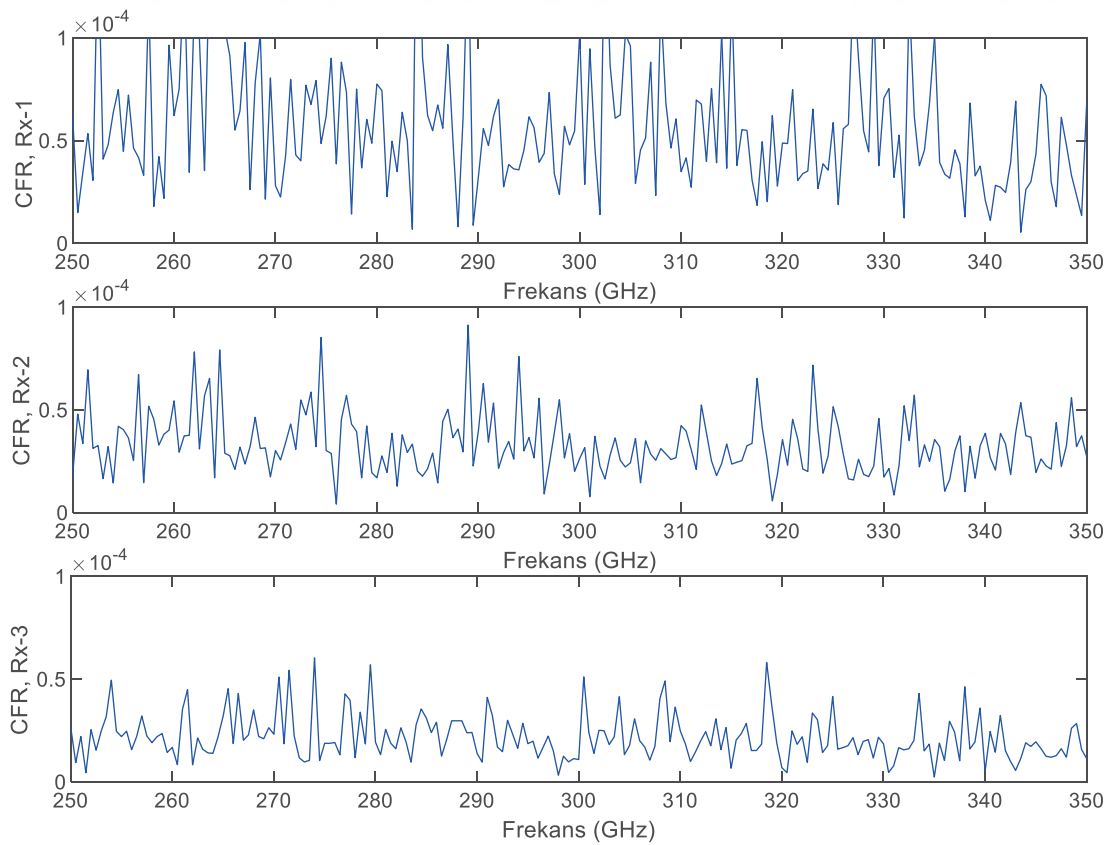
Çizelge 3.4. Oda-2 için Saleh-Valenzuela modeli parametre tablosu

	Oda-2 Rx-1	Oda-2 Rx-2	Oda-2 Rx-3
Küme zayıflama faktörü (CDF)	10 ns	8 ns	8 ns
Işın zayıflama faktörü (RDF)	10 ns	8 ns	10 ns
Küme varış oranı (CAR)	0,14 ns ⁻¹	0,08 ns ⁻¹	0,06 ns ⁻¹
Işın varış oranı (RAR)	0,10 ns ⁻¹	0,10 ns ⁻¹	0,10 ns ⁻¹

Çizelgede verilen parametrelerle elde edilen CIR ve CFR grafikleri Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de verilmiştir. LoS ile ilk yansıma arasındaki genlik farkı Rx-1 konumunda 1,89 kat, Rx-2 konumunda 2,98 kat ve Rx-3 konumunda 2,88 kat olarak görülmüştür. Rician faktör değerleri incelendiğinde genellikle Rx-1 konumunda 0,50 – 1,25 aralığında, Rx-2 konumunda 2,00 – 3,00 aralığında ve Rx-3 konumunda 2,00 – 3,00 aralığında oldukları, ilk yansıma gecikmesi artıkça değerlerin arttığı gözlenmiştir. Ama bu artış belirgin değildir, her üç konumda da benzer grafikler elde edilmiştir. Işın İzleme tekniğinin aksine bu modellemede baskın LoS sinyali oluşmamıştır. Bu sonuçlar Işın İzleme tekniği sonuçları ile kıyaslandığında Saleh-Valenzuela modelinin yetersiz kaldığı aşıkardır. Bunun temel nedeni üstel parametrelerin LoS ile ilişkili başlamasıdır. Ama Işın İzleme tekniğinde LoS ile yansımalar arasında radikal bir güç farkı vardır. Bu da Saleh-Valenzuela modelinin bu yönde modifiye edilmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 3.30. Kanal dürtü yanıtı, 300 GHz, Oda-2, Rx-1, Rx-2, Rx-3, Saleh-Valenzuela modeli



Şekil 3.31. Kanal frekans tepkisi, Oda-2, Rx-1, Rx-2, Rx-3, Saleh-Valenzuela modeli

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz kablosuz haberleşme sistemleri beklenen veri artışı talebini karşılamakta zorlandığı için yeni çözümler araştırılmaktadır. Artan talebi karşılamak ve veri hızını artırmak için önerilen yöntemlerden bir tanesi THz bandı olarak adlandırılan 0,1 – 10 THz aralığının kullanılmasıdır. Ancak THz dalgalarıyla haberleşmede yüksek frekans ve atmosfer koşullarının etkisinden dolayı iletim mesafesi kısalmaktadır. İç mekân uygulamalarında çokyolluluk da iletişimi etkileyecek faktörler arasındadır. Bu nedenle bu tezde iç mekân THz kanalları ile ilgilenilmiştir. Çalışmada öncelikle kanal ile ilgili literatürden derlenen teorik bilgi verilmiş, ardından 0,1 – 10 THz bandı MATLAB simülasyonları ile analiz edilmiştir.

THz bandında gönderilen sinyaldeki zayıflamanın en önemli faktörleri boş alan yol kaybı ve moleküler soğurmadır. Boş alan yol kaybı alıcı verici arasındaki mesafeye ve iletişim frekansına bağlı iken moleküler soğurma kaybı bunlara ek olarak basınç, sıcaklık ve neme de bağlı olarak değişir. Moleküler soğurmanın ciddi boyutta frekans seçiciliğe neden olduğu açıkça görülmektedir. Verimli bir iletişimin sağlanması için moleküler soğurma piklerinin olmadığı durağan alt bantların tercih edilmesi gerekmektedir.

Moleküler soğurma kaybı farklı sıcaklık, nem ve basınç değerleri için incelenmiştir. Moleküler soğurma katsayısının hesaplanmasında HITRAN modeli ile literatürde bulunan 275 – 400 GHz ve 100 - 450 GHz bantlarında tanımlı olan iki farklı basitleştirilmiş soğurma modelleri karşılaştırılmış ve söz konusu bantlarda üç metodun da tanımlı oldukları bantta uyduğu görülmüştür. Ardından farklı sıcaklık ve nem değerleri için simülasyonlar yapılmış, bu değerlerdeki artışın moleküler soğurma katsayısını ve bağlantılı olarak moleküler soğurma kaybını artırdığı görülmüştür. Ortam basıncı 1 atm basınçtan küçük bir düşüş moleküler soğurma katsayısının artmasına sebep olmaktadır. Ancak bu düşüşün devam etmesi durumunda moleküler soğurma katsayısında artış olmasına rağmen bu fark önemsiz hale gelmektedir.

İç mekân uygulamaları için çokluyol sönümlenmesinin etkisini gözlemlemek amacıyla farklı senaryolarda kanal dürtü ve frekans tepkileri incelenmiştir. Çokluyol sönümlenmesi için kanal öncelikle Modifiye Monte Carlo Işın İzleme tekniği ve Saleh-Valenzuela modeline dayanan üstel dağılım ile modellenmiştir. Işın İzleme tekniğinde sabit bir verici konumu için farklı

oda boyutları ve alıcı konumlarında CIR incelenmiştir. Beklendiği üzere, merkez frekansın artmasıyla LoS ve NLoS hatların genliklerinde azalma görülmüştür. Yüzeylerin yansımaya katsayısı yani yüzeyin pürüzsüzlüğü arttıkça yansımalar daha kuvvetli gözükmektedir. LoS iletim ile yansımalar arasındaki güç farkı her durumda belirgin bir şekilde görülmüştür. Alıcı/verici mesafesini artırdıkça LoS ve yansımaların gecikme süreleri artmış ve bazı durumlarda yansımalarda kümelenmelerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Kanalı daha iyi tanımak amacıyla odalarda oluşan kanalların frekans tepkileri incelendiğinde ise oda ve konumlara bağlı olarak değişen frekans seçicilik görülmüştür. Belirli oda ve konumlarında görülen CIR grafiklerinde yansımalarda görülen kümelenmenin frekans tepkisinde periyodik bir salınım ortaya çıkardığı düşünülmektedir. Ardından odalardaki tüm konumlar için rms gecikme yayılımı, uyumluluk bant genişliği ve Rician faktör değerleri incelenmiştir. Oda boyut ve şekillerinden bağımsız olarak alıcı/verici arasında mesafe arttıkça rms gecikme yayılımının arttığı ve buna bağlı olarak uyumluluk bant genişliğinin azaldığı görülmüştür. Mesafenin artmasıyla Rician faktör de azalmaktadır, ancak güçlü LoS sinyali nedeniyle her oda ve konumda yüksek değerler elde edilmektedir.

Son olarak Saleh-Valenzuela kanal modellemesinin sınırları araştırılmıştır. Bu amaçla farklı parametre setleriyle CIR grafikleri incelenmiştir. Bu incelemenin sonucuna göre küme varış oranı arttıkça küme sayısı azalmaktadır. Işın varış oranının azalması ise ışın sayısında artış yaratmaktadır. Küme ve ışın zayıflama faktöründeki artışın yansımaları kuvvetlendirdiği gösterilmiştir. Bu incelemenin ardından, Işın İzleme tekniği ile deterministik olarak modellenen bir odada farklı alıcı konumları için stokastik kanal modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Ancak LoS sinyali ile ilk yansıma arasındaki farkın Işın İzleme metodunun aksine Saleh-Valenzuela ile modellenemediği sonucuna varılmıştır. Işın İzleme tekniğinde hesaplanan yüksek Rician faktör yerine burada çok daha küçük değerler elde edilmektedir. Saleh-Valenzuela kanal modellemesinin bu eksikliği modelleyebilecek şekilde modifiye edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bu sonuçtan yola çıkılarak, THz kanallarının stokastik Saleh-Valenzuela modellemesinin modifiye edilmesi olası çalışma konuları arasındadır. Ayrıca geniş menzilli haberleşme sistemlerinde yansıtıcı yüzeyler kullanılarak sinyalleri güçlendirildiği uygulamalar için kanal modellemesi de önerilen çalışma konularından biridir.

KAYNAKLAR

1. Han C., and Chen Y. (2018). Propagation Modeling for Wireless Communications in The Terahertz Band. *IEEE Communication Magazine*, 56(6), 96-101.
2. Tekbıyık K., Ekti A. R., Kurt G., and Görçin A. (2019). Terahertz Band Communication Systems: Challenges, Novelty and Standardization Efforts. *Physical Communication*, 35, 100700.
3. Piesiewicz R., Kleine-Ostman T., Krumbholz N., Mittleman D., Koch M., Schoebel J., and Kürner T. (2007). Short-Range Ultra-Broadband Terahertz Communications: Concepts and Perspectives. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 49(6), 24-39.
4. Peng B., Guan K., Küter A., Rey S., Patzold M., and Kürner T. (2020). Channel Modelling and System Concepts for Future Terahertz Communications: Getting Ready for Advances Beyond 5G. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(2), 136-143.
5. Khalid N., and Akan O. B. (2016). Wideband THz Communication Channel Measurements for 5G Indoor Wireless Networks. *IEEE International Conference on Communications*, 1-6.
6. Chen Z., Han C., Wu Y., Li L., Huang C., Zhang Z., Wang G., and Tong, W. (2021). Terahertz Wireless Communications for 2030 and Beyond: A Cutting-Edge Frontier. *IEEE Communications Magazine*, 59(11), 66-72.
7. Chen Y., and Han C. (2019). Channel Modeling and Characterization for Wireless Networks-on-Chip Communications in the Millimeter Wave and Terahertz Bands. *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, 5(1), 30-43.
8. Busari S. A., Huq K. M., Mumtaz S., and Rodriguez J. (2019). Terahertz Massive MIMO for Beyond-5G Wireless Communication. *IEEE International Conference on Communications*, 1-6.
9. Wang C.X., Huang J., Wang H., Gao X., You X., and Hao Y. (2020). 6G Wireless Channel Measurements and Models Trends and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(4), 22-32.
10. He D., Guan K., Fricke A., Ai B., He R., Zhong Z., Kasamatsu A., Hosako I., and Kürner T. (2017). Stochastic Channel Modeling for Kiosk Applications in the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7(5), 502-513.
11. Peng B., and Kürner T. (2015). A Stochastic Channel Model for Future Wireless THz Data Centers. *International Symposium on Wireless Communication Systems*, 741-745.
12. Sheikh F., Zarifeh N., and Kaiser T. (2016). Terahertz Band: Channel Modelling for Short-Range Wireless Communications in The Spectral Windows. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 10(13), 1435-1444.
13. Yazgan A., Tuğcu E., Albayrak C., ve Türk K. (2021). Yüksek Hızlı Terahertz Kablosuz Haberleşme için İletim Pencereleri ve Link Hesabı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 48-53.

14. Akyıldız I. F., and Jornet J. M. (2016). Realizing Ultra-Massive MIMO (1024x1024) Communication in the (0.06–10) Terahertz Band. *Nano Communication Networks*, 8, 46-54.
15. Hossain Z., Mollica C., and Jornet J. M. (2017). Stochastic Multipath Channel Modeling and Power Delay Profile Analysis for Terahertz-band Communication. *4th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communications*, 32, 1-7.
16. Elayan H., Amin O., Shubair R. M., and Alouini M.S. (2018). Terahertz Communication: The Opportunities of Wireless Technology Beyond 5G. *International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking*, 1-5.
17. Liu S., Yu X., Guo R., Tang Y., and Zhao Z. (2021). THz Channel Modeling: Consolidating the Road to THz Communications. *China Communications*, 18(5), 33-49.
18. Hemadeh İ. A., Satyanarayana K., El-Hajjar M., and Hanzo L. (2018). Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2), 870-913.
19. O’Hara J. F., Ekin S., Choi W., and Song I. (2019). A Perspective on Terahertz Next-Generation Wireless Communications. *Technologies*, 7(2), 43.
20. Huq K. M. S., Busari S. A., Rodriguez J., Frascolla V., Bazzi W., and Sicker D. C. (2019). Terahertz-Enabled Wireless System for Beyond-5G Ultra-Fast Networks: A Brief Survey. *IEEE Network*, 33(4), 89-95.
21. Rappaport T. S., Xing Y., Kanhere O., Ju S., Madanayake A., Mandal S., Alkhateeb A., and Trichopoulos G. C. (2019). Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond. *IEEE Access*, 7, 78729-78757.
22. Zhang J. H., Tang P., Yu L., Jiang T., and Tian L. (2020). Channel Measurements and Models for 6G: Current Status and Future Outlook. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 21(1), 39-61.
23. Cheng X., Huang Z., and Chen S. (2020). Vehicular Communication Channel Measurement, Modelling, and Application for Beyond 5G and 6G. *IET Communications*, 14(19), 3303-3311.
24. Akyildiz I. F., Kawanishi T., Gerstacker W., Dong X., and Babakhani A. (2021). Guest Editorial Special Issue on “THz Communications and Networking”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(6), 1499-1505.
25. Chen Z., Ning B., Han C., Tian Z., and Li S. (2021). Intelligent Reflecting Surface Assisted Terahertz Communications Toward 6G. *IEEE Wireless Communications*, 28(6), 110-117.
26. Wang C. X., Wang J., Hu S., Jiang Z. H., Tao J., and Yan F. (2021). Key Technologies in 6G Terahertz Wireless Communication Systems: A Survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 16(4), 27-37.

27. Akyildiz I. F., Han C., Hu Z., Nie S., and Jornet J. M. (2022). Terahertz Band Communication: An Old Problem Revisited and Research Directions for The Next Decade. *IEEE Transactions on Communications*, 70(6), 4250-4285.
28. Bicaïš S., Doré J. B., Saad M., Alawieh M., Bader F., Palicot J., Corre Y., Gougeon G., and Faussurier E. (2022). Wireless Connectivity in The Sub-THz Spectrum: A Path to 6G. *Cornell University arXiv: 2201.06271*, 1-30.
29. Chen H., Sameddeen H., Ballal T., Wymeersch H., Alouini M. S., and Al-Naffouri T. Y. (2022). A Tutorial on Terahertz-Band Localization for 6G Communication Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(3), 1780 – 1815.
30. Wu Y., Kokkonen J., Han C., and Juntti M. (2020). Interference and Coverage Analysis for Terahertz Networks with Indoor Blockage Effects and Line-of-Sight Access Point Association. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(3), 1472-1486.
31. Jeyakumar P., Ramesh A., Srinitha S., Vishnu V., and Muthuchidambaranathan P. (2022). Wideband Hybrid Precoding Techniques for THz Massive MIMO in 6G Indoor Network Deployment. *Telecommunication Systems*, 79(1), 71-82.
32. Aghoutane B., El Ghzaoui M., and El Faylali H. (2021). Spatial Characterization of Propagation Channels for Terahertz Band. *SN Applied Sciences*, 3(2), 1-8.
33. Ju S., Xing Y., Kanhere O., and Rappaport T. S. (2021). Millimeter Wave and Sub-Terahertz Spatial Statistical Channel Model for an Indoor Office Building. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(6), 1561-1575.
34. Xing Y., Rappaport T. S., and Ghosh A. (2021). Millimeter Wave and Sub-THz Indoor Radio Propagation Channel Measurements, Models, and Comparisons in an Office Environment. *IEEE Communications Letters*, 25(10), 3151-3155.
35. Cheng C. L., Sangodoyin S., and Zajić A. (2020). THz Cluster-Based Modeling and Propagation Characterization in a Data Center Environment. *IEEE Access*, 8, 56544-56558.
36. Kouzayha N., Kishk M. A., Sameddeen H., Al-Naffouri T. Y., and Alouini M. S. (2021). Coverage and Rate Analysis in Coexisting Terahertz and RF Finite Wireless Networks. *Cornell University arXiv: 2109.00646*, 1-30.
37. Yuanbo L., Yiqin W., Yi C., Ziming Y., and Chong H. (2022). Channel Measurement and Characterization with Modified SAGE Algorithm in an Indoor Corridor at 300 GHz. *Cornell University arXiv: 2203.16745*, 1-12.
38. Salhi M. A., Kleine-Ostmann T., and Schrader T. (2021). Propagation Channel Measurements in the MM-and Sub-MM Wave Range for Different Indoor Communication Scenarios. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 42(4), 357-370.
39. Schulz R., Gtinlu O., Elschner R., Schaefer R. F., Schmidt-Langhorr C., Schubert C., and Fischer R. F. (2021). Semantic Security for Indoor THz-Wireless Communication. *IEEE 17th International Symposium on Wireless Communication Systems*, 1-6.

40. Papatiriu E. N., Boulogeorgos A. A. A., Haneda K., de Guzman M. F., and Alexiou A. (2021). An Experimentally Validated Fading Model for THz Wireless Systems. *Scientific Reports*, 11(1), 1-14.
41. Yacoub M. D. (2007). The α - μ Distribution: A Physical Fading Model for the Stacy Distribution. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(1), 27-34.
42. Papatiriu E. N., Boulogeorgos A. A. A., and Alexiou A. (2021). Fading Modeling in Indoor THz Wireless Systems. *IEEE International Balkan Conference on Communications and Networking*, 161-165.
43. Boulogeorgos A. A. A., Papatiriu E. N., and Alexiou A. (2019). Analytical Performance Evaluation of THz Wireless Fiber Extenders. *IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-6.
44. Chapala V. K., and Zafaruddin S. M. (2021). Exact Analysis of RIS-Aided THz Wireless Systems Over α - μ Fading With Pointing Errors. *IEEE Communications Letters*, 25(11), 3508-3512.
45. Chen Y., Li Y., Han C., Yu Z., and Wang G. (2021). Channel Measurement and Ray-Tracing-Statistical Hybrid Modeling for Low-Terahertz Indoor Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(12), 8163-8176.
46. Chen Y., Han C., Yu Z., and Wang G. (2022). Channel Measurement, Characterization and Modeling for Terahertz Indoor Communications Above 200 GHz. *Cornell University arXiv: 2205.00220*, 1-30.
47. Sheikh F., Alissa M., Zahid A., Abbasi Q. H., and Kaiser T. (2019). Atmospheric Attenuation Analysis in Indoor THz Communication Channels. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2137-2138.
48. Xing Y., Kanhere O., Ju S., and Rappaport T. S. (2019). Indoor Wireless Channel Properties at Millimeter Wave and Sub-Terahertz Frequencies. *IEEE Global Communications Conference*, 1-6.
49. Shah S., Ashraf M., Saeed N., Jan T., Khalil R., Babar M. I., Ahmad G., and Shah S. W. (2019). Path Loss Model for Future Terahertz (THz) Wireless Communication Systems. *Proceedings of the Pakistan Academy of Science: A Physical and Computational. Sciences*, 56(2), 55-65.
50. Sheikh F., Lessy D., and Kaiser T. (2018). A Novel Ray-Tracing Algorithm for Non-Specular Diffuse Scattered Rays at Terahertz Frequencies. *First International Workshop on Mobile Terahertz Systems*, 1-6.
51. Gougeon G., Corre Y., and Aslam M. Z. (2019). Ray-Based Deterministic Channel Modelling for Sub-THz Band. *IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-6.
52. Sheikh F., Zantah Y., Mabrouk I. B., Alissa M., Barowski J., Rolfes I., and Kaiser T. (2021). Scattering and Roughness Analysis of Indoor Materials at Frequencies From

- 750 GHz to 1.1 THz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(11), 7820-7829.
53. Faisal A., Sardeddeen H., Dahrouj H., Al-Naffouri T. Y., and Alouini M. S. (2020). Ultramassive MIMO Systems at Terahertz Bands: Prospects and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(4), 33-42.
 54. Chen Y., Yan L., and Han C. (2021). Hybrid Spherical-and Planar-Wave Modeling and DCNN-Powered Estimation of Terahertz Ultra-Massive MIMO Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 69(10), 7063-7076.
 55. Schram V., Wu Y., Kolleshi M., and Gerstacker W. (2020). Comparison of Transmission Concepts for Indoor THz Communication Systems. *IEEE 3rd International Workshop on Mobile Terahertz Systems*, 1-5.
 56. Ogawa Y., Utsuno T., Nishimura T., Ohgane T., and Sato T. (2022). Sub-Terahertz MIMO Spatial Multiplexing in Indoor Propagation Environments. *IEICE Transactions on Communications*, E105-B, 1130-1138.
 57. Selek Y. K., İlhan E., ve Yayla F., (2010). Esnek Spektrum Yönetimi: Spektrum İhaleleri ve Spektrum Ticareti. *Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu*, 1-101.
 58. Tarboush S., Sardeddeen H., Chen H., Loukil M. H., Jemaa H., Alouini M. S., and Al-Naffouri T. Y. (2021). TeraMIMO: A Channel Simulator for Wideband Ultra-Massive MIMO Terahertz Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(12), 12325-12341.
 59. Proakis J., and Salehi M. (2002). *Communication Systems Engineering*. (2nd ed). Prentice Hall.
 60. Ghasempour Y., Amarasinghe Y., Yeh C. Y., Knightly E., and Mittleman D. M. (2021). Line-of-Sight and Non-Line-of-Sight Links For Dispersive Terahertz Wireless Networks. *APL Photonics*, 6(4), 041304.
 61. Tekbıyık K., Ulusoy E., Ekti A., Yarkan S., Baykas T., Görçin A., and Karabulut G. K., (2019). Statistical Channel Modeling for Short Range Line-of-Sight Terahertz Communication. *IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-5.
 62. Abadal S., Han C., and Jornet J. (2016). Wave Propagation and Channel Modelling in Chip Scale Wireless Communications: A Survey from Millimeter Wave to Terahertz and Optics. *IEEE Access*, 8, 278-293.
 63. Petrov V., Moltchanov D., Komar M., Antonov A., Kustarev P., Rakheja S., and Koucheryavy Y. (2017). Terahertz Band Intra-Chip Communications: Can Wireless Links Scale Modern x86 CPUs?. *IEEE Access*, 5, 6095– 6109.
 64. Koenig S., Lopez-Diaz D., Antes J., Boes F., Henneberger R., Leuther A., Tessmann A., Schmogrow R., Hillerkuss D., Palmer R., Zwick T., Koos C., Freude W., Ambacher O., Leuthold J., and Kallfass I. (2013). Wireless Sub-THz Communication System with High Data Rate. *Nature Photonics*, 7, 977-981.

65. Tsujimura K., Umebayashi K., Kokkonniemi J., Lehtomaki J., and Suzuki Y. (2017). A Causal Channel Model for the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 8(1), 52-62.
66. Boulogeorgos A. A. A., Papatirou E. N., and Alexiou A. (2019). Analytical Performance Assessment of THz Wireless Systems. *IEEE Access*, 7, 11436-11453.
67. Jamshed M. A., Nauman A., Abbasi M. A. B., and Kim S. W. (2020). Antenna Selection and Designing for THz Applications: Suitability and Performance Evaluation: A Survey. *IEEE Access*, 8, 113246-113261.
68. Kokkonniemi J., Boulogeorgos A. A. A., Aminu M., Lehtomäki J., Alexiou A., and Juntti M. (2020). Impact of Beam Misalignment on THz Wireless Systems. *Nano Communication Networks*, 24, 100302.
69. Tekbıyık K., Ekti A. R., Kurt G. K., Görçin A., and Yanikomeroglu H. (2020). A Holistic Investigation of Terahertz Propagation and Channel Modeling Toward Vertical Heterogeneous Networks. *IEEE Communications Magazine*, 58(11), 14-20.
70. Tang P., Zhang J., Tian H., Chang Z., Men J., Zhang Y., Tian L., Xia L., Wang Q., and He J. (2021). Channel Measurement and Path Loss Modeling From 220 GHz to 330 GHz for 6G Wireless Communications. *China Communications*, 18(5), 19-32.
71. Guan K., Yi H., He D., Ai B., and Zhong Z. (2011). Towards 6G: Paradigm of Realistic Terahertz Channel Modeling. *China Communications*, 18(5), 1-18.
72. Jornet J. M., and Akyıldız I. F. (2021). Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, (10), 3211-3221.
73. Kokkonniemi J., Lehtomäki J., and Juntti M. (2021). A Line-of-sight Channel Model for the 100–450 Gigahertz Frequency Band. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1, 1-15.
74. Kokkonniemi J., Lehtomäki J., and Juntti M. (2018). Simplified Molecular Absorption Loss Model for 275–400 Gigahertz Frequency Band. *12th European Conference on Antennas and Propagation*, 1-5.
75. Papatirou E. N., Kokkonniemi J., Boulogeorgos A. A. A., Lehtomäki J., Alexiou A., and Juntti M. (2018). A New Look to 275 to 400 GHz Band: Channel Model and Performance Evaluation. *IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-5.
76. MacCartney G. R., Zhang J., Nie S., and Rappaport T. S. (2013). Path Loss Models for 5G Millimeter Wave Propagation Channels in Urban Microcells. *IEEE Global Communications Conference*, 3948-3953.
77. Rappaport T. S., Xing Y., MacCartney G. R., Molisch A. F., Mellios E., and 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.

78. Maccartney G. R., Rappaport T. S., Sun S., and Deng S. (2015). Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks. *IEEE Access*, 3, 2388-2424.
79. Huang F., Tian L., Zheng Y., and Zhang J. (2016). Propagation Characteristics of Indoor Radio Channel from 3.5 GHz to 28 GHz. *IEEE 84th Vehicular Technology Conference*, 1-5.
80. Sun S., Thomas T. A., Rappaport T. S., Nguyen H., Kovacs I. Z., and Rodriguez I. (2015). Path Loss, Shadow Fading, and Line-of-Sight Probability Models for 5G Urban Macro-Cellular Scenarios. *IEEE Globecom Workshops*, 1-7.
81. Sun S., Rappaport T. S., Rangan S., Thomas T. A., Ghosh A., Kovacs I. Z., Rodriguez I., Koymen O., Partyka A., and Jarvelainen J. (2016). Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro-and Macro-Cellular Scenarios. *IEEE 83rd Vehicular Technology Conference*, 1-6.
82. Sen P., Hall J., Polese M., Petrov V., Bodet D., Restuccia F., Melodia T., and Jornet J. M. (2022). Terahertz Communications Can Work in Rain and Snow: Impact of Adverse Weather Conditions on Channels at 140 GHz. *6th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems*, 13-18.
83. Kimyacı M. (2019). Bina İçi Görünür Işık Haberleşmesinde Konfigürasyonun Kanal Karakteristiği Üzerine Etkisi. *İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, 21-22.
84. Lopez-Hernandez F.J., Perez-Jimenez R. and Santamaria A. (1998). Modified Monte Carlo Scheme for High-Efficiency Simulation of The Impulse Response on Diffuse IR Wireless Indoor Channels. *Electronics Letters*, 34(19), 1819–1820.
85. Chowdhury M.I.S., Zhang W., and Kavehrad M. (2014). Combined Deterministic and Modified Monte Carlo Method for Calculating Impulse Responses of Indoor Optical Wireless Channels. *Journal of Lightwave Technology*, 32(18), 3132-3148.
86. Chvojka P., Zvanovec S., Haigh P.A., and Ghassemlooy Z. (2015). Channel Characteristics of Visible Light Communications Within Dynamic Indoor Environment. *Journal of Lightwave Technology*, 33(9), 1719-1725.
87. He Y., Mao Y., Huang D., Liao Q., and Guo Y. (2020). Indoor Channel Modeling for Continuous Variable Quantum Key Distribution in The Terahertz Band. *Optics Express*, 28(22), 32386-32402.

DİZİN

B

Boş alan yol kaybı · 5, 11, 12, 20,
24, 27, 46
Büyük ölçekli sönümleme 3, 8

Ç

Çokluyol sönümlemesi · 3, 10,
16, 19, 30, 46
Çokyollu kanal · iv, 4, 5, 6, 9, 16,
17, 29, 30

D

Deterministik model · 3, 5, 6, 16,
29, 47

I

Işın izleme tekniği · iv, 4, 5, 29,
36, 46

K

Kanal · iv, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 20,
19, 20, 24, 29, 35, 36, 39, 43,
46, 47

Kanal modelleme · 3, 4, 5, 47
Küçük ölçekli sönümleme · 3, 8,
10, 16,

M

Moleküler soğurma · 2, 5, 6, 9,
11, 12, 13, 14, 20, 21, 22, 24,
25, 27, 39, 46

R

Rician faktör · 17, 35, 44, 47
Rms gecikme yayılımı · 17, 18,
35, 47

S

Saleh-Valenzuela modeli · iv, 4,
6, 29, 39, 43, 44, 46, 47
Stokastik modelleme · 3, 4, 5, 29,
39, 43, 47

T

THz kanal · iv, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10,
11, 15, 19, 20, 29, 39, 46, 47

U

Uyumluluk bant genişliği · 5, 17,
18, 35, 47

Y

Yol kaybı · iv, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9,
10, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 24,
27, 29, 30, 46



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

