

Merve KİMYACI



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**BİNA İÇİ GÖRÜNÜR IŞIK
HABERLEŞMESİNDE
KONFIGÜRASYONUN
KANAL KARAKTERİSTİĞİ
ÜZERİNE ETKİSİ**

Merve KİMYACI

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2019

HAZİRAN 2019



**BİNA İÇİ GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE KONFIGÜRASYONUN
KANAL KARAKTERİSTİĞİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Merve KİMYACI

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

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Merve KİMYACI tarafından hazırlanan “BİNA İÇİ GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE KONFIGÜRASYONUN KANAL KARAKTERİSTİĞİ ÜZERİNE ETKİSİ” 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: Dr. Öğr. Üyesi Selva ÇÜRÜK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı / İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.



.....
.....

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Ersin ÖZDEMİR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı / İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.



.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet SÖNMEZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı / Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.



.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 10 / 06 / 2019

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

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde 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,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Merve KİMYACI
10/06/2019

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında çalışmalarımı yönlendirip, bilgi birikimini ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Selva ÇÜRÜK'e teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teőekkürler ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. VLC SİSTEMLERİ	6
2.1. VLC Sistemlerinin Temel Özellikleri.....	7
2.1.1. VLC alıcı verici yapısı	7
2.1.2. VLC’de kullanılan modülasyon teknikleri.....	9
2.1.3. VLC kanalları.....	10
2.2. Bina içi VLC Kanal Modelleri.....	11
2.3. VLC Kanal Karakteristiği	14
2.3.1. Kanal dürtü tepkisi.....	14
2.3.2. Kanal frekans tepkisi.....	20
2.3.3. Rician faktörü.....	20
2.3.4. DC kazanç	21
2.3.5. RMS gecikme yayılımı	21
2.3.6. Uyumluluk band genişliği	22
3. SİMÜLASYON BULGULARI	24
3.1. Simülasyonda kullanılan oda bilgileri	24

	Sayfa
3.2. Simülasyon Bulguları	26
3.2.1. Tek vericili sistemler	26
3.2.2. İki vericili sistemler	36
3.2.3. Dört vericili sistemler	39
3.2.4. Sekiz vericili sistemler	48
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Oda boyutu ve verici yerleşimi	25
Çizelge 3.2. Oda 4 τ_{rms} değerleri	39
Çizelge 3.3. Oda 5, Oda 6 ve Oda 7 τ_{rms} değerleri	47
Çizelge 3.4. Oda 8, Oda 9 ve Oda 10 τ_{rms} değerleri	56



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. VLC spektrumu	6
Şekil 2.2. Tipik bir VLC sistemi	7
Şekil 2.3. IM / DD optik bağlantının eşdeğer taban bant modeli	10
Şekil 2.4. Tipik bir bina içi görünür ışık sistemi yerleşimi.....	11
Şekil 2.5. Bina içi VLC LOS hattı geometrisi	15
Şekil 2.6. Yoğunlaştırıcı optik detektör yapısı	17
Şekil 2.7. Bina içi VLC NLOS hatlarının geometrisi	18
Şekil 2.8. Farklı yansıma çeşitleri	19
Şekil 3.1. Aydınlatma grafiği, Oda 1, $m = 1$	27
Şekil 3.2. Aydınlatma grafiği, Oda 1, $m = 10$	27
Şekil 3.3. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,1$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	29
Şekil 3.4. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,9$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	29
Şekil 3.5. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$, $n = 1$	30
Şekil 3.6. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$, $n = 2,5$	31
Şekil 3.7. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 20^\circ$	32
Şekil 3.8. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 90^\circ$	32
Şekil 3.9. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$	33
Şekil 3.10. Aydınlatma grafiği, Oda 2, $m = 1$	34
Şekil 3.11. CIR ve CFR grafikleri, Oda 2, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	34
Şekil 3.12. Aydınlatma grafiği, Oda 3, $m = 1$	35
Şekil 3.13. CIR ve CFR grafikleri, Oda 3, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	35
Şekil 3.14. Aydınlatma grafiği, Oda 4, $m = 1$	36
Şekil 3.15. Aydınlatma grafiği, Oda 4, $m = 10$	37

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	38
Şekil 3.17. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$	38
Şekil 3.18. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$	39
Şekil 3.19. Aydınlatma grafiği, Oda 5, $m = 1$	40
Şekil 3.20. Aydınlatma grafiği, Oda 5, $m = 10$	40
Şekil 3.21. CIR ve CFR grafikleri, Oda 5, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	41
Şekil 3.22. CIR ve CFR grafikleri, Oda 5, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$	41
Şekil 3.23. CIR ve CFR grafikleri, Oda 5, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$	42
Şekil 3.24. Aydınlatma grafiği, Oda 6, $m = 1$	42
Şekil 3.25. Aydınlatma grafiği, Oda 6, $m = 10$	43
Şekil 3.26. CIR ve CFR grafikleri, Oda 6, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	43
Şekil 3.27. CIR ve CFR grafikleri, Oda 6, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$	44
Şekil 3.28. CIR ve CFR grafikleri, Oda 6, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$	44
Şekil 3.29. Aydınlatma grafiği, Oda 7, $m = 1$	45
Şekil 3.30. Aydınlatma grafiği, Oda 7, $m = 10$	45
Şekil 3.31. CIR ve CFR grafikleri, Oda 7, $\gamma=0,5$, $m= 1$, $FOV = 60^\circ$	46
Şekil 3.32. CIR ve CFR grafikleri, Oda 7, $\gamma=0,5$, $m= 10$, $FOV = 60^\circ$	46
Şekil 3.33. CIR ve CFR grafikleri, Oda 7, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$	47
Şekil 3.34. Aydınlatma grafiği, Oda 8, $m = 1$	48
Şekil 3.35. Aydınlatma grafiği, Oda 8, $m = 10$	49
Şekil 3.36. CIR ve CFR grafikleri, Oda 8 $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	49
Şekil 3.37. CIR ve CFR grafikleri, Oda 8 $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$	50
Şekil 3.38. CIR ve CFR grafikleri, Oda 8, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 40^\circ$	50
Şekil 3.39. Aydınlatma grafiği, Oda 9, $m = 1$	51

Şekil	Sayfa
Şekil 3.40. Aydınlatma grafiği, Oda 9, $m = 10$	51
Şekil 3.41. CIR ve CFR grafikleri, Oda 9, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	52
Şekil 3.42. CIR ve CFR grafikleri, Oda 9, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$	52
Şekil 3.43. CIR ve CFR grafikleri, Oda 9, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$	53
Şekil 3.44. Aydınlatma grafiği, Oda 10, $m = 1$	53
Şekil 3.45. Aydınlatma grafiği, Oda 10, $m = 10$	54
Şekil 3.46. CIR ve CFR grafikleri, Oda 10, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$	54
Şekil 3.47. CIR ve CFR grafikleri, Oda 10, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$	55
Şekil 3.48. CIR ve CFR grafikleri, Oda 10, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

bps	Bit/s
cm ²	Santimetrekare
db	Desibel
Gbps	Saniye başına gigabit
Hz	Hertz
Lux	Lümen/metrekaire
m ²	Metrekare
Mbps	Saniye başına megabit
Nm	Nanometre
THz	Terahertz

Kısaltmalar

Açıklamalar

ACO-OFDM	Asimetrik Kırpılmış Optik Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
APD	Çığ Foto Diyot
CAP	Taşıyıcısız Genlik ve Faz Modülasyonu
CFR	Kanal Frekans Yanıtı
CIR	Kanal Dürtü Yanıtı
CSK	Renk Kaydırmalı Anahtarlama
Dark VLC	Karanlıkta VLC
DC	Doğru Akım
DCO-OFDM	DC Yanlı Optik OFDM
DMT	Ayrık Çok Tonlu
FOV	Görüş Alanı
GPS	Evrensel Konumlandırma Sistemi

ID	Kimlik
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IM/DD	Yoğunluk Modülasyonu / Doğrudan Algılama
IoT	Nesnelerin İnterneti
ISI	Semboller Arası Girişim
JEITA	Japon Elektronik ve Enformasyon Teknolojisi Endüstrisi Birliği
LED	Işık Yayan Diyot
LOS	Görüş Hattı
MC	Monte Carlo
MMC	Modifiye Monte Carlo
NLOS	Görüş Hattı Olmayan
N-SC	Nyquist Tek Taşıyıcı
OFDM	Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
OOK	Başla Dur Anahtarlama
PPM	Darbe Konum Modülasyonu
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
RGB	Kırmızı-yeşil-mavi
RMS	Kök Ortalama Kare
RYGB	Kırmızı-Sarı-Yeşil-Mavi
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
Unipolar OFDM	Tek Kutuplu OFDM
VLC	Görünür Işık Haberleşmesi
VLCC	Görünür Işık Haberleşmeleri Konsorsiyumu

1. GİRİŞ

Günümüz kablosuz haberleşmesinde yaygın ve etkin şekilde kullanılan radyo frekansı sistemlerinin performansları memnun edicidir. Ancak özellikle kişisel mobil cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte hızla artan kullanıcı sayısı etkin kullanım için ayrılan spektrumun dolmasına sebep olmuş, radyo frekansı sistemleri talepleri karşılayamaz hale gelmeye başlamıştır [1]. Haberleşme sektörü, bu darboğazı aşmak için yeni teknolojiler geliştirmek için arayışa girmiştir.

Spektrumdaki bu sıkışıklığa ek olarak, küresel enerji tüketimi konusu da günümüzde mercek altına alınmış ve çözüm bekleyen ciddi bir sorundur [2]. Kaliteli servis hizmeti sunmak isteyen kablosuz ağlar iletim için aşırı derecede enerji tüketmektedir. İşletme giderlerinin düşürülmesi amacıyla enerji tüketiminin azaltılma isteğinin yanı sıra, özellikle karbon yayılımı azaltılmış, çevreye duyarlı haberleşme sistemleri geliştirmek araştırmacılar için önemli bir hedef haline gelmiştir. Bu bağlamda enerji tüketimi açısından verimli sistemler geliştirmek amacıyla haberleşme alanında önemli çalışmalar yapılmaktadır.

Akademik dünya ve servis sağlayıcıları, belirtilen nedenlerden dolayı, mevcut haberleşme sistemlerinin yerini alacak veya destek olacak sistemler üzerine çalışmaktadırlar. Optik kablosuz haberleşmenin alt dallarından biri olan Görünür Işık Haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC); radyo frekans teknolojisine alternatif olduğu gibi, bazı uygulama alanlarında tamamlayıcı bir rol üstlenerek haberleşmedeki bu açığı karşılamaya aday bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [3, 4]. VLC teknolojisi, ışık şiddetini veya rengini insan gözünün fark edemeyeceği hızda değiştirerek ortam aydınlatması ve kablosuz bilgi iletimini birlikte yapmayı amaçlamaktadır. Günümüz VLC sistemlerinde veri iletimi için görünür ışık dalga boylarında çalışan ve asıl amacı aydınlatma olan Işık Yayan Diyotlar (Light Emitting Diodes, LEDs) kullanılmaktadır.

LED tabanlı VLC teknolojileri yeni olmasına rağmen görünür ışıkla iletişim uzun bir geçmişe sahiptir. Kablosuz optik haberleşme (WOC) ile ilk veri iletimi 1880'de Alexander Graham Bell'in ses sinyallerini taşıma amacıyla modüle edilmiş güneş ışığı kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. Ancak VLC'de yüksek veri hızlarına ulaşmak LED teknolojisinin gelişimi ile mümkün olmuştur. LED'lerin veri iletimi için kullanılmasında öncü çalışmalardan biri

2001 yılında yapılmıştır. Projede kırmızı LED kullanarak 10 Mbps veri hızına ulaşılmıştır. Ardından 2003 yılında Japonya'da kurulan konsorsiyum ile LED tabanlı VLC'nin gelişiminde ilk ciddi adım atılmıştır.

LED teknolojisinin icat tarihi eskidir ama maliyet ve performans açısından diğer aydınlatma teknolojileriyle yarışa geçmesi zaman almıştır. Ancak son yıllarda özellikle enerji verimliliği endişesi ile LED tabanlı aydınlatma elemanları hızla yaygınlaşmış, bu gelişme VLC konusundaki çalışmalara büyük ivme kazandırmıştır. Günümüzde LED'li VLC sistemleri ev, ofis, trafik, alışveriş merkezleri, tren istasyonları, süpermarketler, kampüsler ve bunun gibi birçok kamusal alanlardaki kablosuz yerel ağlara hızlı bir şekilde adapte edilebilir hale gelmişlerdir. Bu nedenle standartlaşma çalışmaları da önem kazanmıştır. VLC sistemlerinin standartlaşmasının tarihsel gelişiminin dönüm noktaları aşağıda verilmiştir [1, 2, 5-13].

- 2004: Yüksek hızlı veri iletimi için LED ışık sistemlerinin tanıtımı yapılmıştır.
- 2007: Görünür Işık Haberleşmeleri Konsorsiyumu (Visible Light Communications Consortium, VLCC) "Görünür Işık Haberleşmesi Sistem Standartı" ve "Görünür Işık ID Sistem Standartı" adında iki standart önermiştir.
- 2007: Japon Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Endüstrisi Birliği (Japan Electronics and Information Technology Industries Association, JEITA) bu standartları kabul etmiştir.
- 2008: Avrupa'da ev ağları için VLC sistemlerini tanımlayan "Ev Gigabit Erişim Projesi" (OMEGA) isimli bir proje geliştirilmiştir.
- 2011: IEEE Kablosuz Kişisel Alan Ağları çalışma grubu tarafından VLC için ilk standart taslağı "IEEE 802.15.7: Görünür Işık Kullanarak Kısa Menzilli Kablosuz Optik Haberleşme" ismiyle yayınlanmıştır.

VLC üstün özelliklere sahiptir [7]: Öncelikle VLC sistemleri radyo frekansı spektrumuna kıyasla çok daha büyük bir spektrum kullanmaktadır. Bu bant genişliği ile yüksek veri hızı sunulabilmektedir. Ayrıca, elektromanyetik ışımaya ve girişime neden olmadığı gibi radyo frekans girişiminden de etkilenmemektedir. VLC düşük maliyetli, kompakt yapısı ile veri iletiminde daha az güç harcayarak karbondioksit emisyonunu azaltan, sağlığa zararı olmayan yeşil bir haberleşme teknolojidir. VLC sistemlerinde görünür ışık bandındaki

dalgaların duvarlar ve yüzeylerden geçememesi, geniş menzilli bir bağlantı ağının oluşturulamamasına neden olmaktadır. Kısa menzilli ağlar haberleşmeyi sınırlar görünse de bu özellik veri güvenliği açısından güçlü bir üstünlük sağlamaktadır.

Avantajlarıyla öne çıkan ve hızla yaygınlaşan VLC'nin geleceğin kablosuz iletişim teknolojileri arasında yer alacağı düşünülmektedir. VLC sistemlerinin dış ve iç ortamlarda farklı kullanım alanları bulunmaktadır. Özellikle enerji verimliliğini hedefleyen dünyada VLC ile akıllı ulaşım ve akıllı binalarda aydınlatma, iletişim ve cihaz kontrol altyapısı sağlanmaktadır.

VLC'nin bina içi uygulamalarına örnek olarak radyo frekans girişiminin riskli olduğu uçak kabinleri, hastaneler, kimyasal tesisler verilebilir [1, 14]. Örneğin hastanelerde, özellikle elektromanyetik girişimden etkilenen tarayıcıların olduğu yerlerde, cihazları girişime maruz bırakmamak nedeniyle cep telefonları ve kablosuz internet uygulamaları kullanılamamaktadır. Bu gibi ortamlarda VLC teknolojisi elektromanyetik girişim oluşturmayacağından, hızlı, kesintisiz ve güvenli kablosuz iletişim sağlamaktadır.

2020 yılına kadar internete bağlanacak cihaz sayısının 50 milyarı bulması ile ilgili beklenti Nesnelerin İnterneti'nin (Internet of Things, IoT) tasarımını gerektirmektedir [15]. Bütün nesnelerin IoT ağına kablolu bağlanabilmesi gerçekçi bir yaklaşım değildir. Kablosuz radyo frekansına dayanan bağlantılarının da kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu nedenle özellikle mobil cihazlar için VLC tabanlı IoT bağlantıları iyi bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

Bina içi uygulamalarına bir diğer örnek VLC'nin konum belirleme ve kimlik saptama için kullanılmasıdır [16, 17]. Dış mekanlarda kullanılan Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS), kapalı ortamlarda konum belirleme ve navigasyon için kullanılamamaktadır. İç mekanlarda konum belirleme, kimlik tanıma, yönlendirme IoT için de önemli bir uygulama alanıdır ve çözüm bekleyen sorunlardan biridir. Özellikle büyük alana sahip alışveriş merkezleri, fuar alanları, konferans, sergi salonları, müzeler, havaalanları, tren istasyonları, hastaneler, ofisler ve fabrikalarda insanların birbirlerini veya başka bir nesneyi bulmaları için VLC teknolojisi kullanılmaktadır [16, 17].

VLC'nin kullanılabileceği bir diğer alan askeri haberleşme sistemleridir [18]. Bilindiği üzere askeri haberleşmede hızlı ve güvenli veri iletimi önemlidir. Işık kapalı bir ortamdan

dışarı çıkamadığı için VLC ile yapılan kapalı ortam iletişiminin dinlenmesi imkânsız hale gelmektedir. Bu da VLC'yi güvenli teknoloji yapmaktadır.

Dış mekân uygulamaları incelendiğinde VLC sistemlerinin trafikte, araçlar arasında ve/veya trafik işaretçileri ile sürücüler arasında sayısal verinin iletiminde etkin olarak kullanılabilceği görülmektedir [5]. Bu sistemlerde haberleşmek için araçların farları ve arka lambaları ile trafik ışıkları veya sokak lambaları bilgi transferini gerçekleştirmektedir. Bu sistemler ile araçlar arasındaki takip mesafesinin korunması gibi konularda sürücülere bilgi desteği verilebileceği gibi, trafik işaretçileri trafik yoğunluğu, kaza durumu ve yol ile ilgili bilgileri sürücüye aktarılabilir.

Bir diğer dış mekân kullanım örneği sualtı uygulamalarıdır [5]. Bilindiği üzere radyo dalgaları yoğun elektrik iletkenliği olan su ortamında kullanılmadığı için sualtı haberleşmesi çoğunlukla ses dalgaları ile yapılmaktadır. VLC bu duruma alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

Artan ilgi, işlevsel ve yüksek performanslı VLC sistemleri geliştirmek için çalışmalarını hızlandırmıştır. Bilindiği üzere bir haberleşme sisteminin başarısı ancak çalışılan kanalın etkisinin belirlenip bertaraf edilmesiyle artırılabilir. VLC kanalları konusunda literatür diğer haberleşme kanallarına kıyasla zayıftır, bu nedenle VLC için kanal çözülmesi gereken öncelikli araştırma konusu olarak ortaya çıkmaktadır.

Bina dışı VLC sistemlerinde alıcı verici arasında görüş hattına dayalı bir iletim olduğundan kanal daha basit modellenmektedir. Ancak bina içi VLC uygulamalarında, işaret yansımaları ve birden çok kaynak gibi nedenlerden dolayı kanallar çokyollu karakteristik gösterirler. Ayrıca bu kanalların parametreleri ortamlara bağlı olarak farklılık gösterecektir. Bu çokyollu yapı iletişimi sınırlandıracağı için bu kanallarının özelliklerinin bilinmesi haberleşmenin sağlıklı şekilde yapılabilmesi için gereklidir.

Bu çalışmanın amacı bina içi VLC sistemleri için olası farklı kanal karakteristiklerini belirlemek, ardından iyi bir aydınlatma ve hızlı, sağlıklı bir iletim için ortam önerileri sunmaktır. Böylece hızla yaygınlaşacağı öngörülen VLC sistemleri için uygun bina içi düzeneklerinin kurulmasına yardımcı olacaktır.

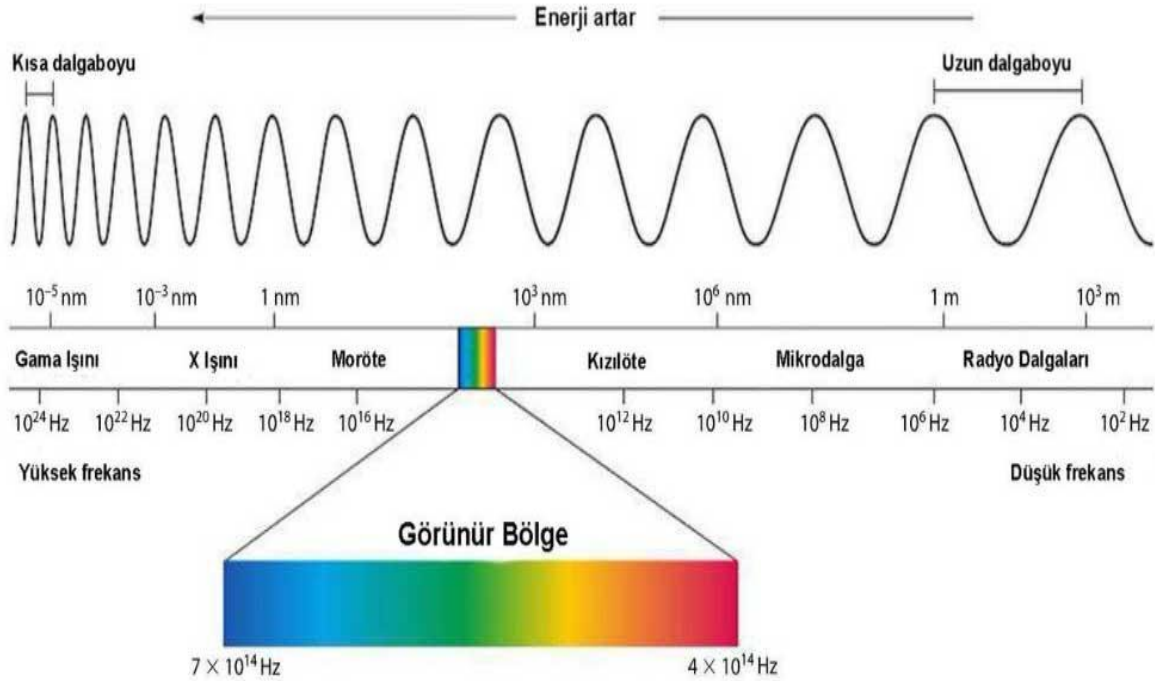
Bu amaçla Bölüm 2’de öncelikle bina içi VLC sistemleri ve kanal modelleri ile ilgili bilgi verilmiştir. VLC kanallarının Kanal Dürtü Tepkisi (Channel Impulse Response, CIR) ve Kanal Frekans Tepkisi (Channel Frequency Response, CFR) belirli bir oda konfigürasyonu ile vericilerin ve alıcıların belirli konumları için kanalı tamamen karakterize ederler. Bu nedenle yine bu bölümde bina içi VLC kanallarının CIR ve CFR'leri tanımlandıktan sonra kanal karakteristiğini özetleyen Kök Ortalama Kare (Root Mean Square, RMS) gecikme yayılması, bant genişliği, dc kazanç, Rician katsayısı parametreleri de ele alınmıştır.

Literatürde aydınlatma amaçlı yapılan bina içi konfigürasyonlarından yola çıkılarak belli tip ortamlar için kanal karakteristikleri incelenmiştir. Bu ortamlar için ortam değişkenlerinin kanal karakteristiği üzerine etkileri ayrı çalışmalarda gözlemlenmiş, ancak ortamdaki bütün etkenler bir arada ele alınmamıştır. Literatürde zayıf bulunan bir diğer konu, çok elemanlı aydınlatma düzeneklerinin kanal üzerine etkisi de bu çalışmada detaylı olarak ele alınmıştır. Bölüm 3’te verilen simülasyon sonuçları ile kanal üstünde etkisi olabilecek bütün etkenler bir arada incelenerek bir bilgi birikimi oluşturulmuştur. Simülasyon bulguları yorumlanarak bölümde özetlenmiştir. Böylece VLC amaçlı kullanılacak olan aydınlatma sistemlerinin planlaması için alt yapı oluşturulmuştur.

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

2. VLC SİSTEMLERİ

İnsan gözünün duyarlı olduğu, morötesi ve kızılötesi arasındaki 430 THz ve 790 THz (750 nm - 380 nm) ile sınırlı bant Şekil 2.1’de görünür ışık spektrumu olarak adlandırılmaktadır [14]. VLC için kullanılan bu bant radyo frekanslarının kullandığı banttan yaklaşık 10000 kat daha geniştir. Bu nedenle VLC, mevcut tüm radyo frekans teknolojilerini aşarak 1 Gbps'den daha yüksek hızda veri aktarabilmektedir. Bu hızın 10 Gbps'e ulaşacağı tahmin edilmektedir [20].



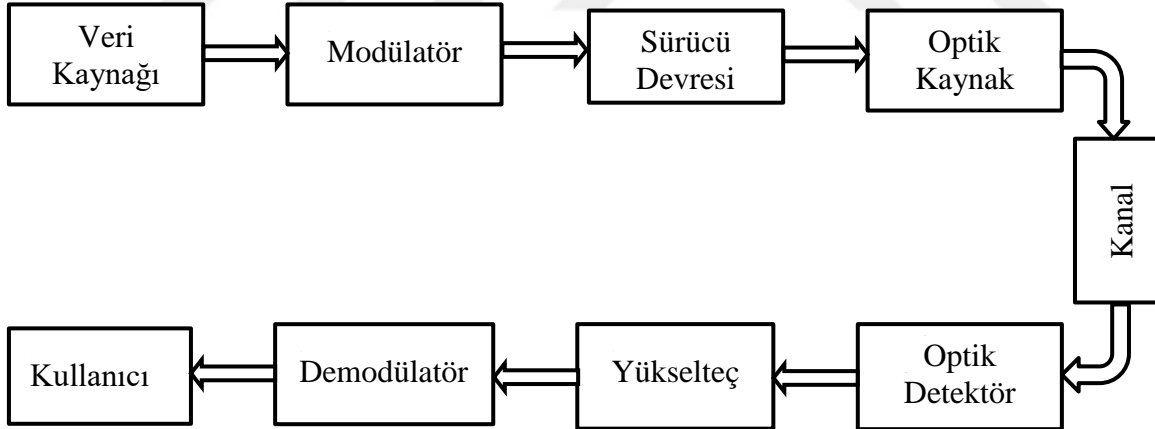
Şekil 2.1. VLC spektrumu [55]

VLC'de temel fikir, iletilmek istenen verinin vericide ışık yoğunluğu değişimine dönüştürülmesi ve alıcıda bu değişikliklerin tespit edilip verinin ışıktan geri alınmasıdır. Buna Doğrudan Algılama ile Yoğunluk Modülasyonu (Intensity Modulation / Direct Detection, IM/DD) yöntemi [21] adı verilmektedir. Ancak veri iletimi esnasında aydınlatmanın sekteye uğramaması önemlidir. IEEE 802.15.7 standardına göre ışık yoğunluğundaki titremenin etkilerden kaçmak için 200 Hz'den daha hızlı olunmalıdır [10]. Bu nedenle, kullanılan sinyalin frekansı insan gözünün tespit edebileceğinden daha yüksek seçilerek iletim esnasında aydınlatmada gözle görülür titreme oluşması engellenmektedir.

Ayrıca aydınlatma için ışık yoğunluğunun yeterli olması ama göz güvenliği için ışık ortalamasının belli seviyeyi aşmaması sağlanmalıdır. Karanlığın kırılması için minimum 30-100 Lux, ofis ve konut uygulamaları için 300 - 1000 Lux [22] aydınlatma uygun görülmektedir. Ancak günümüzde enerji tüketimini düşüren yeni bir VLC uygulaması olan Karanlıkta VLC (Dark VLC) gündeme gelmektedir. Aydınlatma yapılmadığı zamanlarda, LED kapalı durumda iken, VLC bağlantılarını düşük güçte açık tutarak sürekli bir iletişim sağlanmaktadır. Böylece uygulanabilir VLC senaryolarının artması mümkün olacaktır.

2.1. VLC Sistemlerinin Temel Özellikleri

Tipik bir VLC sisteminde, Şekil 2.2’de gösterildiği üzere, verici modülör, optik kaynak (LED veya LED dizisi) ve sürücü devresi, alıcı ise optik detektör, yükselteç ve demodülatörden oluşur [19, 23]. VLC sisteminin çalışma prensibi incelendiğinde sürücü devresinin LED'lerden geçen akımı iletilecek işarete göre kontrol ederek yayılan ışığın parlaklığını modüle ettiği görülmektedir. Alıcıda ise optik detektöre ulaşan modüleli ışığın gücüyle ilişkili akım üreterek demodülasyonu gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.2. Tipik bir VLC sistemi

2.1.1 VLC alıcı verici yapısı

VLC sisteminin vericisinin ana bileşeni, aydınlatma ve kablosuz iletişimi birleştiren çift işlevli LED’lerdir. LED ışığın belli dalga boylarını yayan yarı iletken malzemeden yapılmış bir diyot türüdür. Yayılan ışığın rengi kullanılan malzemelere ve LED’in yapısına bağlıdır

ama aydınlatma amacıyla kullanıldığında LED'lerin beyaz ışık yayması gerekmektedir. Beyaz ışık iki yolla üretilebilir. Yaygın ve ucuz yöntem fosfor kaplı mavi LED kullanmaktır. Fosfor kaplama üretilen mavi ışığın spektrumunu diğer renklere yayar ve gözlenen ışık beyaz olur. Ancak fosfor kaplamanın uzun gevşeme süresi VLC'de veri hızını sınırlamaktadır. Beyaz ışık üretmek için diğer yol, ana renkleri birleştiren çok renkli LED'ler kullanmaktır. Kırmızı-yeşil-mavi (RGB) veya kırmızı-sarı-yeşil-mavi (RYGB) LED'lerin yaydıkları ışık bu renklerin karışımı olan beyaz olarak algılanır. Bu tür LED'lerin bant genişliği çok daha yüksektir, ama yapıları karmaşıktır.

LED'in öncesinde bulunan sürücü devresi, LED'lerden geçen akımı kontrol ederek yayılan ışığın parlaklığını ayarlamaktadır. LED'in lineer voltaj- optik güç bölgesinde çalışması, yükselme ve düşme sürelerini hızlandırarak VLC sisteminin hızının artırılması, güç tüketimi ve veri sinyal zayıflamasının en aza indirilmesi de bu donanım ile yapılmaktadır.

VLC sisteminde bilgi taban bant veya geçiş bandı modülasyon şemaları kullanılarak iletebilir. Modülasyon tekniğinin seçimi ihtiyaç duyulan veri hızı, sinyal gücü ve maliyet dikkate alınarak yapılmaktadır. VLC'de kullanılan modülasyon tekniklerinin kısa bir tekrarı bir sonraki bölümde verilmektedir.

Alıcıda optik detektör üzerine düşen ışığın yoğunluk değişikliklerini elektrığe dönüştürmektedir. VLC sistemlerinde yaygın olarak kullanılan detektör tipi p-i-n veya çıkış fotodiyottur (avalanche photodiode, APD), ancak güneş paneli veya kamera kullanıldığı da rapor edilmiştir [5]. Alıcıda büyük alanlı detektör kullanmak daha fazla güç toplamak için avantajlıdır, ama bu durumda maliyet ve gürültü artarken alıcının bant genişliği azalacaktır. Bu nedenle detektör alanını büyütmek yerine sezme alanının yüzeyinde ışığı yoğunlaştırıp efektif toplama alanını artıran yoğunlaştırıcı mercekler kablosuz optik haberleşmede sıklıkla tercih edilmektedir.

VLC performansını artırmak amacıyla zorunlu işlevsel blokların yanı sıra sisteme farklı işlevli bloklarda eklenebilir. Örneğin optik detektörden önce ortam ışığı ve girişim sinyallerinin neden olduğu gürültüyü filtrelemek için optik filtreler kullanılabilir. Modülasyon bant genişliğini artırmak amacıyla vericide ön denkleştirme kullanılabileceği gibi alıcıda sezilen sinyal demodüle edilmeden önce de denkleştirici kullanılabilir. Ayrıca

diğer haberleşme sistemlerinde olduğu gibi elektriksel filtreleme teknikleri ve yükseltec kullanılarak daha iyi başarımlar sağlanabilir.

2.1.2 VLC 'de kullanılan modülasyon teknikleri

IM/DD 'ye dayalı VLC sistemlerinde radyo frekans teknolojilerinde olduğu gibi taban bant veya geçiş bandı modülasyon teknikleri kullanılabilir. Kullanılan modülasyon tekniği istenilen veri hızı, sinyal gücü ve maliyet dikkate alınarak seçilmektedir [5, 22, 27-40]. Ancak IM/DD 'den dolayı modüleli işaret reel ve pozitif olmalıdır.

VLC sistemlerinde ilk kullanılan modülasyon tekniği Aç Kapa Anahtarlama (On Off Keying, OOK)'dır. OOK'de 1 ve 0 veri bitleri LED'in açık ve kapalı olmasıyla yapılmaktadır. Ancak kapalı durumda, tamamen kapatmak yerine ışığın yoğunluğu azaltılır. Bu tekniğin basit ve kolay uygulanabilir olması en önemli özelliğidir ama veri hızı düşüktür. Veriye göre darbenin genişliğini değiştiren Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM) ve darbenin yerini değiştiren Darbe Yeri Modülasyonu (Pulse Position Modulation, PPM) VLC'de kullanılan diğer taban bant teknikleridir.

Günümüzde VLC'de yüksek veri hızlarına ulaşmak için gelişmiş modülasyonlar teknikleri kullanılmaktadır. VLC kanallarının doğrusal olmayan frekans bandı tek taşıyıcı tekniplerde yüksek Semboller Arası Girişim (Inter Symbol Interference, ISI) yaşanmasına sebep olur. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) çokyollu sönmülemekten kaynaklanan ISI problemini çözmedeki başarısıyla öne çıkmış bir tekniktir. Ancak IM/DD için OFDM 'in ürettiği karmaşık değerli bipolar işaretlerin gerçek değerli pozitif işaretlere dönüştürülmeleri gerekmektedir. Bu işlemin yapılış şekline bağlı olarak temelde üç çeşit optik OFDM tekniği bulunur: Asimetrik Kırpılmış Optik OFDM (Asymmetrically-Clipped Optic OFDM, ACO-OFDM), DC Yanlı Optik OFDM (DC-biased OOFDM) ve Tek Kutuplu OFDM (Unipolar OFDM).

IEEE 802.15.7 standardında özel olarak VLC için tasarlanmış modülasyon tekniği de bulunmaktadır. Renk Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying, CSK) isimli bu teknikte beyaz ışık üretmek amacıyla kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere üç ayrı LED kullanılmaktadır. CSK bu üç rengin yoğunluğunu kullanarak sinyali modüle etmektedir.

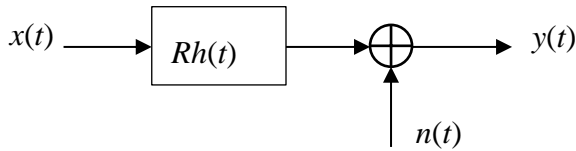
Ayrıca VLC sistemlerinde Taşıyıcısız Genlik ve Faz Modülasyonu (Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation, CAP), Ayırık Çok Tonlu (Discrete Multi-Tone, DMT) ve Nyquist Tek Taşıyıcı (Nyquist Single Carrier, N-SC) modülasyon teknikleri de kullanılmaktadır. [20, 21]

2.1.3 VLC kanalları

VLC sistemlerinde kanal LED ile optik detektör arasında kalan boşluktur. Diğer elektrik veya radyo sistemlerinde olduğu gibi VLC sistemlerindeki optik kanal toplamır gürültülü doğrusal bir filtre olarak modellenmektedir. IM/DD optik bağlantının eşdeğer taban bant modeli Şekil 2.3’de verilmiştir ve aşağıdaki eşitlik ile özetlenmektedir [27]:

$$y(t) = Rx(t) * h(t) + n(t) \quad (2.1)$$

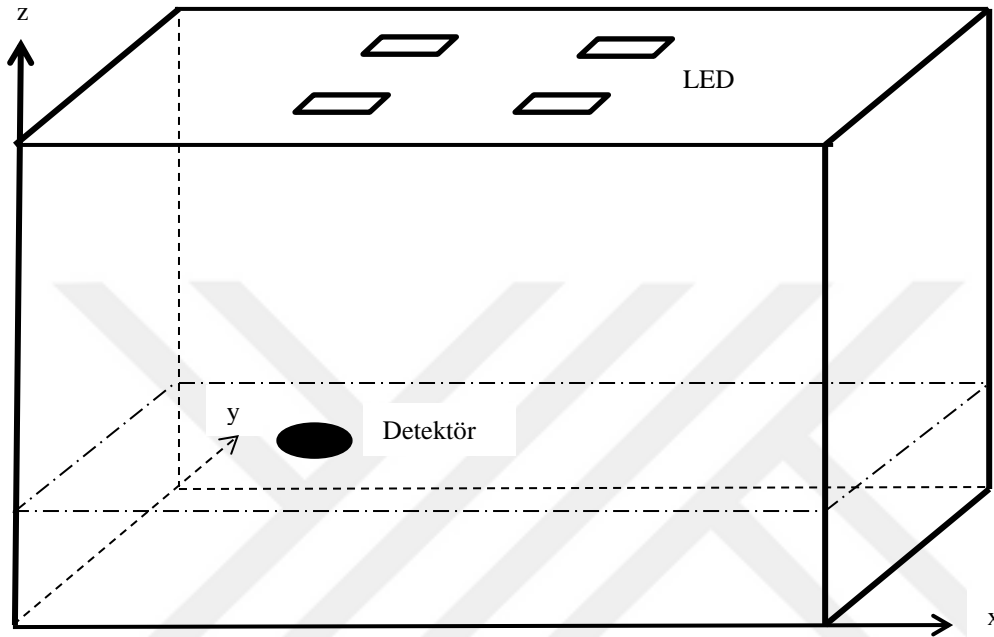
Burada R tepkiselliği ve * evrişimi temsil eder. $x(t)$ iletilen optik yoğunluk, $h(t)$ kanal dürtü yanıtı ve $n(t)$ sinyalden bağımsız gürültüdür. VLC sistemlerinde üretilen elektrik akımı genlikle değil, anlık optik güçle orantılıdır. Bu nedenle, $x(t)$ gücü ifade eder ve negatif olmayan bir işaretir.



Şekil 2.3. IM / DD optik bağlantının eşdeğer taban bant modeli

İç mekân VLC sistemlerinde, vericiler genellikle sabit bir yere, tavana veya odanın döşemesinden daha yüksek bir yüksekliğe yerleştirilir. Tipik bir bina içi görünür ışık sistemi yerleşimi Şekil 2.4’de verilmiştir. Bu yapıdaki VLC kanalları, görüş hattı (Line of Sight, LOS) bağlantılarının yanı sıra görüş hattı olmayan (Non-Line of Sight, NLOS) bağlantıları da içerirler. LOS bağlantısı, verici ile alıcı arasında doğrudan bir yoldur ve gölgeleme nedeniyle nadir durumlar dışında her zaman bulunur. Yüksek hızlı bir VLC sistemi, yüksek Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio, SNR) değeri gerektirdiğinden, uygulamaların çoğu için LOS yolları gereklidir. NLOS bağlantılarında, vericiden yayılan fotonlar herhangi

bir yönde hareket eder ve çoklu yansımaların ardından alıcıya ulaşır. LOS yolu, iletim dalga boyu, konum ve mesafe gibi verici ve alıcı özelliklerine, NLOS yolları ise vericiye ve alıcıya ve ayrıca odanın fiziksel özelliklerine, yani boyutuna, yüzey malzemelerine bağlıdır.



Şekil 2.4. Tipik bir bina içi görünür ışık sistemi yerleşimi

Tipik bina içi ortamlarda çalışan alıcı vericiler, hem doğal hem de yapay kaynaklardan (güneş ışığı, akkor lambalar, floresan lambalar vs.) yayılan yoğun ortam ışığına maruz kalırlar. Ortam ışık kaynaklarının ürettiği ışık akımı, VLC alıcısında performansı düşüren gürültü $n(t)$ olarak algılanırlar. Gürültü kaynaklarını ve etkilerini belirlemek VLC alıcısının tasarımında önemlidir, ancak ortam ışığı durağan olduğu için kolayca filtrelenebilir [5].

2.2. Bina İçi VLC Kanal Modelleri

Kapalı ortamda çalışan bir VLC sisteminde, vericinin yaydığı optik sinyal doğrudan alıcıya ulaşabildiği gibi, duvarlardan ve diğer nesnelere kaynaklanan yansımalar nedeniyle çoklanarak ve zamanda dağılırarak da alıcıya ulaşır. Bu da bina içi VLC sistemlerinin iletişim kanallarının çokyollu yapıda olmasına neden olur. Literatürde, bina içi VLC kanallarını modellemek için çeşitli algoritmalar sunulmuştur [3-24, 27-37, 38-54].

Gfeller ve Bapst tarafından 1979 tarihine sunulan ilk algoritma görüş hattı ve ilk yansımaların alıcıdaki toplam gücünü hesaplamaya dayanmaktadır [22]. Ancak bu çalışmada yapılan simülasyonlar ilk yansımalar ile sınırlı olduğundan güç hesaplaması için uygun olmasına rağmen CIR, RMS gecikme yayılımı ve band genişliği bulunması için yetersiz kalmaktadır.

Barry'nin 1993 tarihinde CIR bulunması için önerdiği teknik çoklu yansımaları ele almaktadır [29]. Bu algoritmada odanın yüzeyleri küçük yansıtıcı parçalara bölünür. İlk yansımalar için her yansıtıcı parçanın ana vericiden LOS ışını alan ve yine LOS ışını olarak ana alıcıya ileten alıcı verici olduğu kabul edilir. Ana alıcıya bu şekilde ulaşan toplam optik güç hesaplanarak ilk yansımaların CIR içindeki katkısı bulunur. İkinci yansımalar için her yansıtıcı parça diğer parçalardan gelen ışını ana alıcıya ileten alıcı verici görevini üstlenir. Bütün parçalardan gelen bu yansımaların ana alıcıda oluşturduğu optik güç hesaplanarak ikinci yansımaların CIR'e katkısını bulunur. Diğer yansımalar da aynı şekilde hesaplanabilir. Bu teknik ile gerçekçi sonuç elde etmek için yansıtıcı parçalarının yeterince küçük belirlenmesi ve yansıma sayısının artırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda algoritmanın sonuca ulaşması uzun zaman alacaktır.

Barry algoritmasının özyinelemeli yapısı hesaplama süresinin uzun olmasına neden olmaktadır. Bu süreyi kısaltmak amacıyla literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Örneğin Mavrakid, Saunders'in 2000'de yapılan çalışmada simülasyonları yansımalara göre değil, zaman adımlarına göre dilimlemek tercih edilmiştir [30]. Ayrıca ara sonuçlarının saklanması ve bu sonuçların daha sonraki hesaplamalar için tekrar kullanılması gibi teknikler ile hız artışı sağlanmaktadır. Barry metoduna dayalı ama küçük farklılıklar gösteren tekniklere örnekler verilmektedir [31-33].

Geometrik bir yaklaşımın yer aldığı bir yöntem verilmektedir [34]. Önerilen yöntemde oda yüzeylerini küçük yansıtıcı parçalara bölmek yerine, yüzeylerdeki yansıma noktaları bulunur. Ardından bu noktalar bir sonraki yansıma noktalarını hesaplamak için kullanılır. Ancak bu tekniğin gerektirdiği süre yine uzundur.

CIR bulunmasında istatistiksel yaklaşım verilmiştir [5]. Bu çalışmada oda parametreleri kullanılarak RMS gecikme yayılımı ve ortalama gecikme hesaplanmaktadır. Ardından bu

parametrelere dayanarak, Rayleigh veya Gamma dağılımlarına uygun CIR bulunmuştur. Ancak, bu yaklaşımla bulunan CIR ile gerçek değeri arasında fark olduğu gösterilmiştir. Başka bir çalışma ise önce CIR bulmak yerine, oda parametrelerinden CFR'yi doğrudan tahmin eder [30]. Bu yaklaşımla bulunan CFR doğruluk açısından düşük frekanslar için oldukça tatmin edicidir, ancak yüksek frekanslarda doğruluk azalmaktadır.

CIR bulmak için alternatif bir yöntem olan Monte Carlo (MC) ışın izleme tekniği verilmiştir [35]. Bu popüler teknik eşit optik güç taşıyan ışınların yönlerini Lambert paterni olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre belirleyerek yayıldığını varsayar. Işınlar yansıtan yüzeylere çarptığında, güçleri yüzeylerin yansıma katsayısıyla azalır ama yine yönleri aynı dağılımla belirlenen yeni ışınlar üretilir. Böylece rasgele yönlerde üretilen ışınlar oda boyunca izlenir ve alıcıya ulaşan bütün ışınlarla CIR elde edilir. Ancak bu algoritma ile alıcıya ulaşabilen ışınların sayısı düşüktür, bu nedenle CIR elde edilmesi uzun zaman almaktadır.

MC ışın izleme tekniğinde süreyi kısaltmak için, yöntemin geliştirilmiş bir versiyonu Modifiye Monte Carlo (MMC) algoritması verilmiştir [36]. Bu algoritmada ışınlar odada rasgele şekilde belirlenen yönlerle ilerlemeye devam ederken, her yansıma sonrası yansıma noktasından alıcıya LOS olduğu varsayılır, böylece her bir ışın bir defa yerine birden çok kez kullanılır. Bu teknikle kaynaktan çok daha az sayıda çıkan ışın CIR hesaplamak için yeterli olacaktır. Algoritma yansıtıcı yüzeye bağlı olarak yansıma yönlerini Lambertian dağılımı yerine deterministik olarak belirleyecek şekilde de değiştirilebilir. MMC algoritması hızlı olmasına rağmen, ışınların yönünün rasgele olması nedeniyle elde edilen CIR varyans içerir. Üretilen ışınların sayısının artırılması ile bu varyans azaltılabilir.

Tüm bu tartışmalardan anlaşıldığı üzere, deterministik Barry metodu yüksek doğruluğa sahip iken, rasgele MMC algoritması en yüksek hıza sahiptir. Bu iki metodun iyi yönlerinden faydalanmak adına iki yöntemi birleştiren teknik sunulmuştur [37]. Bu çalışmada ilk yansımaların katkısı Barry metoduyla bulunurken ikinci ve diğer yansımaların katkısı ise MMC tekniğiyle bulunmaktadır.

Bu tezde kanal modellemesi için verilen birleşik yöntem kullanılmıştır [37].

2.3. VLC Kanal Karakteristiği

Bina içi VLC sistemlerinde, vericiden gönderilen sinyal alıcıya olan seyahatinde farklı yayılma yollarını takip eder. Bu durumda alınan optik sinyal, farklı zaman gecikmelere sahip olan işaretlerin toplamından oluşacaktır ve iletilen sinyal çokyollu kanalın etkilerini yaşayacaktır. LOS ve NLOS yollarına göre şekillenen okyollu VLC kanalı kızılötesi haberleşmesindeki kanala benzerlik gösterir. Ancak görünür ışık yüzeylerden daha az yansıdığı için farklı yayılma gecikmeleri gözlemlenecektir.

okyollu kanal veri hızını sınırlayan bir faktördür. Bina içi VLC kanalları aynı Őartlar altında sabit olacaktır ve CIR kanalı tamamen karakterize edecektir. Ancak koŐullar deđiŐtiđinde (farklı oda konfigürasyonu, alıcının konum değişikliği gibi), VLC kanalı aynı kalmayacak farklı bir CIR gözlemlenecektir. Böyle bir kanal üzerinden sağlıklı bir iletişim yapabilmek için dc kazancı ve RMS gecikme yayılımı gibi özellikleri içeren CIR bilgisine ve bant karakteristiğini veren CFR bilgisine sahip olmak önemlidir.

2.3.1. Kanal dürtü tepkisi

Tipik bir bina içi VLC sisteminde alıcı verici arasındaki çokyollu kanalın her bir yolunun bir gücü ve bir gecikmesi olacaktır, bu durumda CIR [5]

$$h(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P_i \cdot \delta(t - \tau_i) \quad (2.2)$$

olarak ifade edilir. P_i i -inci yolun gücünü, τ_i i -inci yolun gecikme zamanını göstermektedir. $\delta(t)$ ise Dirac delta fonksiyonudur. Tek vericili bir sistemde alıcıya ulaşan gücü, matematiksel olarak, LOS yolu gücü ile çokyollu yayılımdan sonra alıcıya gelen tüm NLOS yollarının gcleri toplanarak hesaplanır [5]. Alıcıya ulaşan gücü:

$$P_r = H_{LOS} + \sum_{k=1}^{\infty} H_{NLOS,k} \quad (2.3)$$

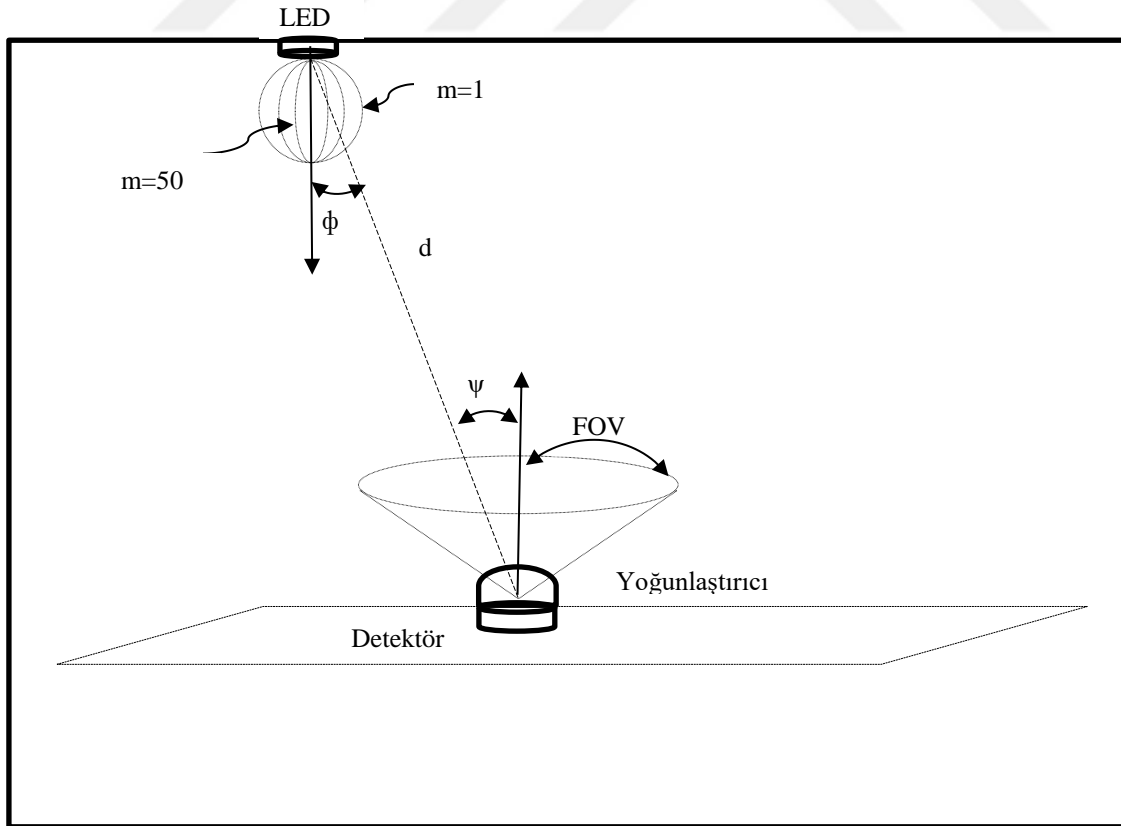
H_{LOS} ve H_{NLOS} sırasıyla LOS ve NLOS yol kazançlarını göstermektedir. Burada k yansıma numarasıdır. Teorik olarak sonsuz sayıda yansıma olacaktır, ancak her yansımada gücü

azalacağı için ilk birkaç yansımadan sonra güç ihmal edilecek seviyeye düşecektir. VLC kanalının dürtü yanıtında da LOS yolunun etkisi ve NLOS yollarının etkisi ayrı ayrı ele alınacak olursa CIR:

$$h(t) = h_{LOS}(t) + \sum_{k=1}^{\infty} h_{NLOS,k}(t). \quad (2.4)$$

Bu çalışmada, kaynağın tek renkli noktasal bir kaynak olduğu varsayılmaktadır. Aslında LED'ler noktasal kaynaklar değildir, ancak ev ve ofislerde kullanılan küçük alanlı LED'ler, alanları dikkate alınmayarak noktasal kaynak olarak kabul edilebilirler. Özellikle verici ile alıcı arasındaki mesafenin LED boyutundan çok daha büyük olduğu durumlar için LED'in noktasal kaynak olarak kabul edilmesi geçerli bir yaklaşımdır.

Tek Vericili VLC kanalında tek bir LOS yolu bulunmaktadır. Vericinin tavanda alıcının ise belli bir yükseklikte olduğu durum için LOS hattı geometrisi Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Bina içi VLC LOS hattı geometrisi

Işık görsel duyarlılığa neden olan radyasyon enerjisi olarak tanımlanır. LED'in Lambert radyasyon yapısına sahip olduğunu varsayıldığında, yaydığı ışık yüzey normalinin etrafında silindirik simetriye sahip olacaktır. Lambert emisyon numarası m ışın huzmesinin enini, dolayısıyla ışığın yönlülüğünü ifade eder. $m = 1$ durumu klasik Lambert kaynak olduğunu ifade ederken daha büyük m değeri daha yüksek yönlülük anlamına gelir. m LED'in yarım gücündeki yarı açısı $\phi_{1/2}$ ile ilgilidir [38]:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos(\phi_{1/2}))}. \quad (2.5)$$

Işık kaynağının birim zamanda yaydığı toplam ışık miktarı ışık akısı olarak tanımlanır. LED'in parlaklığı ışık yoğunluğuyla ifade edilir ve katı açı başına ışık akısı olarak tanımlanır. Bir LED aydınlatmasının ışık yoğunluğu aşağıda verilmiştir [37]:

$$I(\phi) = I(0) \cdot \cos^m(\phi). \quad (2.6)$$

ϕ verici yüzeyinin normal eksenine göre ışın açısıdır ($\phi < 90^\circ$, $\phi = 0$, maksimum güç ışın açısıdır), $I(0)$ ise merkez ışık yoğunluğudur. Radyasyon yoğunluğu paterninin açısal dağılımı, genelleştirilmiş bir Lambert radyant yoğunluğu kullanılarak modellenir [37],

$$R(\phi) = \frac{(m+1)}{2\pi} \cdot P_t \cdot \cos^m(\phi). \quad (2.7)$$

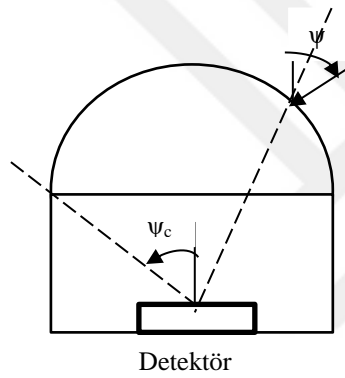
Optik güç P_t LED'den yayılan toplam enerjiyi gösterirken, ifadedeki $\frac{(m+1)}{2\pi}$ katsayısı yarıküre yüzeyi üzerindeki toplam radyasyon yoğunluğunun verici gücüne eşit olmasını sağlamaktadır.

Alıcıda optik detektör, detektörün Görüş Açısı (Field of View, FOV) ψ_c 'den ($\psi_c \leq \pi/2$) daha küçük olay açıları (ψ) gelen radyasyonu toplayan aktif alan A_r olarak modellenmektedir. Bu durumda detektörün etkin toplama alanı

$$A_{eff} = A_r \cdot \cos(\psi). \quad (2.8)$$

Geniş alana sahip bir optik detektör daha fazla radyasyon toplayacaktır ancak alanın artması ile alıcının bant genişliği azalırken maliyet ve gürültü artacaktır. Bunun yerine, detektörün etkili toplama alanını arttırmak için yoğunlaştırıcı kullanılması tercih edilen bir çözümdür. Görüntüleme gerektirmeyen optik yoğunlaştırıcı, optik kablosuz iletişim bağlantılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiziksel alanı arttırmak için kullanılan bu yoğunlaştırıcı, iç kırılma indisi n olan yarım küre şeklinde bir camdan yapılmıştır (Şekil 2.6) ve yoğunlaştırıcısının optik kazancı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$g(\psi) = \frac{n^2}{\sin^2(\psi_c)} \quad (2.9)$$



Şekil 2.6. Yoğunlaştırıcılı optik detektör yapısı

Bir yüzeyin aydınlık düzeyi birim alanına birim zamanda düşen ışık akısı miktarıdır. Işık kaynağının noktasal olduğu durumlarda, herhangi bir doğrultudaki düzlemlerde aydınlık şiddeti, düzlemlerin kaynağa olan uzaklıklarının karesiyle ters orantılıdır. Sonuç olarak LED vericili bir VLC sistemi ele alındığında, optik bant geçiren filtre $T_s(\psi)$ ve yoğunlaştırıcı kullanıldığı varsayımıyla, d mesafesindeki bir alıcı için LOS hattının kazancı,

$$H_{LOS} = \frac{(m+1)}{2\pi} \cdot P_t \cdot \cos^m(\phi) \cdot T_s(\psi) \cdot g(\psi) \cdot \frac{A_r \cdot \cos(\psi)}{d^2} \cdot \text{rect}\left(\frac{\psi}{\psi_c}\right) \quad (2.10)$$

olacaktır. İfadede $d \gg \sqrt{A_r}$ olduğu kabul edilmiştir. Optik LOS bağlantıları frekans seçici değildir. Alıcıda optik detektörün sadece FOV'dan daha küçük açılarla gelen radyasyonu topladığını ifade etmek için dikdörtgen darbe kullanılmıştır:

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

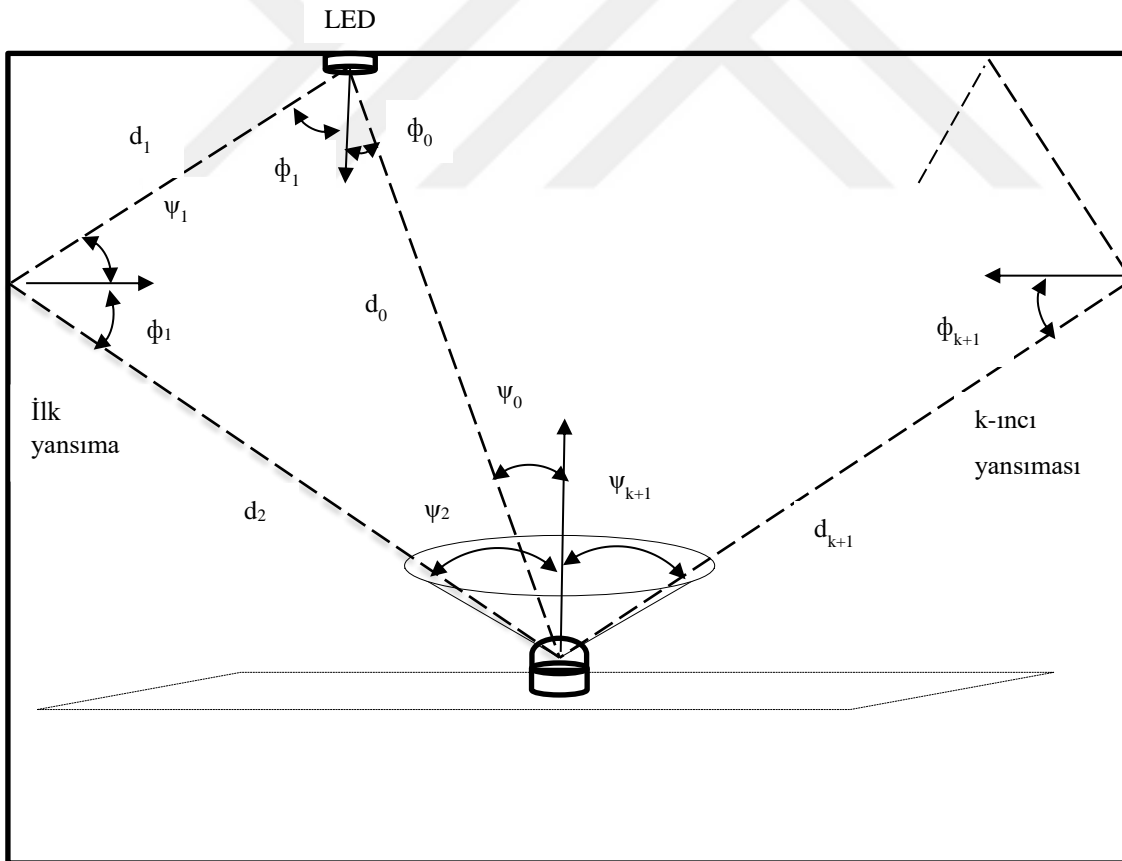
Bu durumda LOS bağlantısının dürtü yanıtı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$h_{LOS}(t) = \frac{A_r \cdot (m+1)}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot P_t \cdot \cos^m(\phi) \cdot \cos(\psi) \cdot g(\psi) \cdot T_s(\psi) \cdot \text{rect}\left(\frac{\psi}{\psi_c}\right) \cdot \delta\left(t - \frac{d}{c}\right) \quad (2.12)$$

Burada c boş alandaki ışığın hızıdır ve d/c yayılma gecikmesini temsil eder.

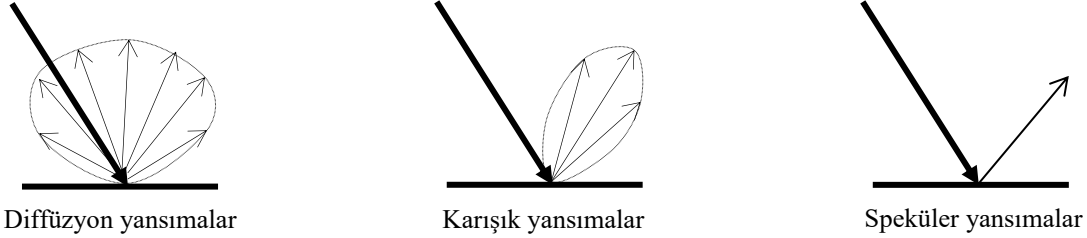
VLC kanallarında yansımalar sonucu sonsuz sayıda NLOS yolları mevcuttur (Eş. 2.4).

Bina içi VLC'de NLOS hatları ile ilgili geometri Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Bina içi VLC NLOS hatlarının geometrisi

Işın yansımaları difüzyon yansımalar, karışık yansımalar ve speküler yansımalar şeklinde gerçekleşebilir (Şekil 2.8). Ancak bina içi VLC uygulamalarının yapıldığı ortamlarda yaygın olarak kullanılan boya, ahşap, tekstil, sıva gibi yüzeylerde yansımalar çoğunlukla tamamen difüzyon yansımalarıdır.



Şekil 2.8. Farklı yansımaya çeşitleri

Bu durumda ışınlar yüzeylere çarptığında, çarpma noktasında yeni nokta kaynaklar oluşacaktır. Bu yeni nokta kaynaklar orijinal kaynağa benzer şekilde Lambert radyasyon paternlerine ($m = 1$) sahip olacaktırlar. Bu nokta kaynaklardan yayılan ışınların gücü, gelen ışınların güçlerinin yüzey yansımaya katsayısı ile çarpılarak zayıflamış hali olacaktır. Tek renkli kaynak varsayımı nedeniyle, yüzeylerin yansımaya katsayıları sabittir. Bu zayıflamış ışınlar, yansımaların ardından bir başka yansıtıcı yüzeye veya optik detektöre ulaşana kadar yollarına devam edeceklerdir.

MMC algoritmasında hızı artırmak amacıyla, her yansımaya sonrası, yansıyan noktadan alıcıya LOS hattı olduğu varsayılır. Bu durumda k -yıncı NLOS yolunun CIR'e katkısı [37]

$$h_{NLOS,k}(t) = \frac{A_r}{\pi \cdot d_k^2} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdots \gamma_k \cdot P_t \cdot \cos(\phi_k) \cdot \cos(\psi_k) \cdot \text{rect}\left(\frac{\psi_k}{\psi_c}\right) \cdot \delta\left(t - \frac{d_0 + \cdots + d_k}{c}\right) \quad (2.13)$$

kullanılarak bulunur. ϕ_k yansımının ışın açısı, ψ_k yansımının olay açısı, γ_k yansımaya katsayısı ve d_k alıcı ile yansımaya noktası arasındaki mesafedir.

Oda boyutu büyüdükçe, yeterli aydınlatmayı sağlamak ve olası gölgelemeyi önlemek gibi nedenlerle, tek bir aydınlatma yerine farklı konfigürasyonlarda çoklu LED sistemleri kullanmak avantajlıdır. N adet çoklu kaynak durumunda alıcıdaki güç, aşağıda belirtildiği gibi, her vericiden alınan LOS ve NLOS hatlarının güçlerinin toplamı olacaktır:

$$P_r = \sum_{i=1}^N \left(H_{LOS,i} + \sum_{k=1}^{\infty} H_{NLOS,i,k} \right). \quad (2.14)$$

CIR hesaplaması için, her bir verici için LOS ve NLOS yollarının katkıları, (2.12) ve (2.13) kullanılarak ayrı ayrı hesaplanır. Ardında tüm vericiler için LOS ve NLOS kazançları toplanarak sonuca ulaşılır. Çoklu kaynaklar, daha iyi aydınlatma sağlama açısından avantajlıdır ama haberleşme açısından bakıldığında özellikle yüksek veri hızlarında ISI'e neden olacaktırlar. Aydınlatma düzeneğini değiştirmek, FOV'u azaltmak, kodlama, denkleştirme ve çoğullama teknikleri bu sorunun üstesinden gelmek için kullanılabilir. [41]

2.3.2. Kanal Frekans Tepkisi

Çokyollu bir kanalda iletişimi optimize etmek için zaman karakteristiğinin (dürtü tepkisi) yanında bant karakteristiği de (frekans tepkisi) ele alınmalıdır. Özellikle çok sayıda yansıma kanalın bandını büyük ölçüde belirleyecektir. CFR kanal dürtü tepkisinin Fourier dönüşümü ile elde edilir (Δt zaman dilimi genişliği) [41] :

$$H(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n, \Delta t) e^{-j2\pi f n \Delta t} \quad (2.15)$$

2.3.3. Rician faktörü

LOS ve NLOS hatlarının güçleri arasındaki oran Rician faktörü olarak tanımlanmıştır [34, 41]:

$$K_{rf} = \frac{P_{LOS}}{P_{NLOS}} \quad (2.16)$$

Bağlantı kalitesinin bir ölçüsü olan Rician faktörü LOS bileşeninin oransal gücünü ölçer. K_{rf} değeri çokyolluluğun ciddiyetinin bir ölçüsüdür; sıfır LOS olmayan en şiddetli durumu, gösterirken, sonsuz değeri ise NLOS olmadığını gösterir.

2.3.4. DC kazanç

Kanalın DC kazancı VLC kanalının bir diğer kritik parametresidir. Sabit bir verici gücü için ulaşılabilir sinyal-gürültü oranını belirtir ve [35]

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t). dt \quad (2.17)$$

şeklinde bulunur. Ancak, baskın LOS yayılma bileşenlerinin varlığına bağlı olarak frekans tepkisinin salınım yapması nedeniyle, bu parametre kanalın frekans seçiciliği derecesini belirlemek için yetersiz kalacaktır.

2.3.5. RMS gecikme yayılımı

RMS gecikme yayılımı çokyollu kanalların zaman yayılım özelliklerini ölçmek için sıkça kullanılan anahtar bir parametredir [35]. Çokyollu bir kanalda, yansımalar nedeniyle CIR bir dizi darbelerden oluşacaktır. Bu durumda gecikme yayılımı alıcıya ulaşan ilk bileşen (tipik olarak LOS bileşeni) ile son bileşenin varış zamanları arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Bir haberleşme sisteminde sembol süresi gecikme yayılımına kıyasla yeterince uzunsa (genellikle gecikme yayılımından 10 kat daha büyük), ISI'siz bir iletişim olması beklenilir. RMS gecikme yayılımı ise enerjileriyle orantılı olarak yansımaların gecikme değerlerinin standart sapmasıdır. Matematiksel olarak, aşağıda formülize edildiği gibi, RMS gecikme yayılımı normalize edilmiş gecikme güç yoğunluğu spektrumunun ikinci merkezi momentinin kökü (kök-ortalama-kare) olarak ifade edilir:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \bar{\tau})^2 . h^2(t). dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t). dt}} \quad (2.18)$$

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

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t . h^2(t). dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t). dt} \quad (2.19)$$

olarak tanımlanmıştır. VLC kanalları için RMS gecikme yayılımı aşağıdaki şekilde olacaktır: [36, 37]

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2}, \quad (2.20)$$

$$\bar{\tau} = \left(P_{LOS} \cdot t_{LOS} + \sum_{k=1}^{\infty} P_{NLOS,k} \cdot t_{NLOS,k} \right) / P_{rT}, \quad (2.21)$$

$$\overline{\tau^2} = \left(P_{LOS} \cdot t_{LOS}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} P_{NLOS,k} \cdot t_{NLOS,k}^2 \right) / P_{rT}. \quad (2.22)$$

P_{LOS} LOS hattının gücü, t_{LOS} ise LOS hattının zaman gecikmesidir. $P_{NLOS,k}$ ve $t_{NLOS,k}$ ise sırasıyla yansımaların güçleri ve zaman gecikmeleridir. Alınan toplam güç

$$P_{rT} = P_{LOS} + \sum_{k=1}^{\infty} P_{NLOS,k}. \quad (2.23)$$

CIR ve τ_{rms} deterministik parametreler olarak kabul edilebilir ve verici ve alıcı pozisyonları değişmedikçe sabit olacaktır.

τ_{rms} parametresi veri aktarım hızının üst sınırı için de ipucu verir [39]:

$$R_b \leq \frac{1}{10 \cdot \tau_{rms}}. \quad (2.24)$$

2.3.6. Uyumluluk bant genişliği

Kanalın frekans seçici olmadığı, sinyal zayıflamasının sabit kabul edilebileceği frekans aralığı Uyumluluk Bant Genişliği (Coherence Bandwidth) kavramıyla ifade edilir ve B_c şeklinde gösterilir. Bu bantta tüm spektral bileşenler yaklaşık olarak eşit kazançla ve doğrusal faz ile geçer. Çokyollu kanalın uyumluluk band genişliği ile gecikme yayılımı arasında ters ilişki vardır. Gecikme yayılımını ne kadar kısa olursa, uyumluluk bant genişliği

de o kadar büyük olur. RMS gecikme yayılımının büyümesiyle uyumluluk bant genişliği düşer ve kanal frekans seçici yapıya dönüşür [38, 54].

Kanalın neredeyse düz olduğu bu frekans bandında iki frekans bileşeni güçlü bir korelasyona sahip olacaktır. Frekans korelasyonunun 0,9'un üzerinde olması durumunda τ_{rms} kullanılarak B_c yaklaşık olarak hesaplanabilir [38]:

$$B_c \approx \frac{1}{50 \cdot \tau_{rms}} \quad (2.25)$$

Korelasyon 0,5 olacak şekilde gevşetilirse, B_c de genişleyecektir:

$$B_c \approx \frac{1}{5 \cdot \tau_{rms}} \quad (2.26)$$

3. SİMÜLASYON BULGULARI

Bu çalışmada MMC ışın izleme tekniği ile modellenen bina içi VLC kanalları Matlab simülasyonları ile farklı ortamlar için incelenmiştir. Simülasyonlarda aydınlatma (vericiler) tavan yüzeyine sabit olarak, alıcı ise bir masanın üzerinde veya bir kişinin elinde olduğu varsayılarak zeminden 85 cm yükseklikte, alıcı ve verici birbirlerine bakacak şekilde konumlandırılmıştır. LED'lerden yayılan güç 1 watt olarak alınmış ve 10 000 adet ışın üretilmiştir. Alıcıdaki fotodetektörün 1 cm² alana sahip olduğu varsayılmıştır.

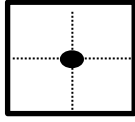
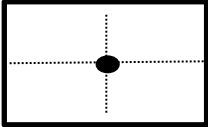
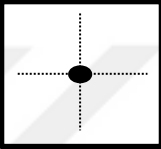
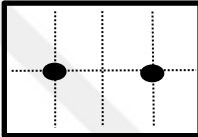
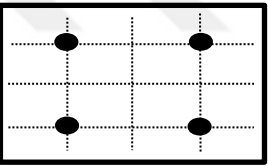
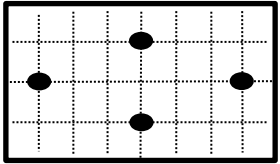
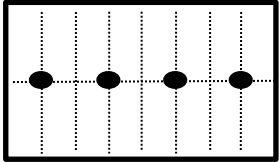
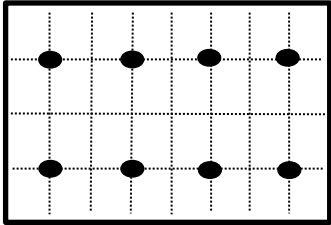
VLC kanalı vericiden çıkan ışınların bir engelle çarpmadan alıcıya ulaştığı LOS yolları ve vericiden gönderilen ışınların bir yüzeye çarpmasının ardından yansımalar yaparak farklı yollardan alıcıya ulaştığı NLOS yolları ile oluşan bir kanaldır. Simülasyonlarda boş bir oda varsayımıyla etkisinin az olduğu düşünülen eşyalara çarparak oluşabilecek yansımalar ihmal edilmiştir. Böylece yansımalar sadece duvarlardan, tavadan ve zeminden olacaktır.

Teorik olarak, kapalı bir ortamda her vericiden kaynaklanan doğrudan bir yol ve sonsuz sayıda yansıma oluşacaktır (Eş. 2.4). Ancak her yansımanın ardından zayıflayan ışınların gücü belirli sayıda yansımanın ardından alıcıya ulaşınca ihmal edilebilir seviyede olacaktır. CIR üzerinde önemli bir katkısı olan güçlü yansımaların sayısını belirlemek için, yansımaların gücü farklı oda koşullarında (boyut, yüzey katsayısı vb.) araştırılmıştır. İlk beş yansımadan sonra diğer yansımaların CIR üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu ve çalışmanın geri kalanında azami yansıma sayısının 5 olarak seçilebileceği sonucuna varılmıştır.

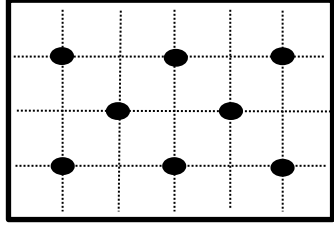
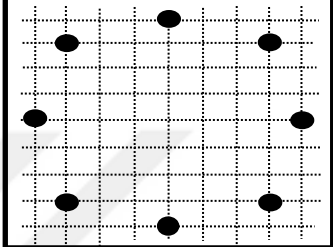
3.1. Simülasyonlarda Kullanılan Oda Bilgileri

Oda konfigürasyonunun CIR ve CFR üzerindeki etkisini gözlemlemek için, yükseklikleri 3m olan farklı (L, W) boyutlarında ve farklı verici yerleşimine sahip 10 adet oda ele alınmıştır. Tek verici durumunda verici tavanın ortasına (L/2; W/2) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çok vericili durumlarda ise farklı düzenekler ele alınmıştır. Oda boyutu ve verici yerleşimi Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Oda boyutu ve verici yerleşimi

Oda no	Boyut (L, W)	Verici konumu	Verici yerleşimi görseli
Oda 1	(3m x 3m)	$V_1 = (1,5 \text{ m}; 1,5 \text{ m})$	
Oda 2	(5m x 3m)	$V_1 = (2,5 \text{ m}; 1,5 \text{ m})$	
Oda 3	(4m x 4m)	$V_1 = (2,0 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$	
Oda 4	(5m x 4m)	$V_1 = (1,25 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_2 = (3,75 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$	
Oda 5	(8m x 5m)	$V_1 = (2,0 \text{ m}; 1,25 \text{ m})$ $V_2 = (2,0 \text{ m}; 3,75 \text{ m})$ $V_3 = (6,0 \text{ m}; 1,25 \text{ m})$ $V_4 = (6,0 \text{ m}; 3,75 \text{ m})$	
Oda 6	(8m x 5m)	$V_1 = (1,0 \text{ m}; 2,5 \text{ m})$ $V_2 = (4,0 \text{ m}; 1,25 \text{ m})$ $V_3 = (4,0 \text{ m}; 3,75 \text{ m})$ $V_4 = (7,0 \text{ m}; 2,5 \text{ m})$	
Oda 7	(8m x 5m)	$V_1 = (1,0 \text{ m}; 2,5 \text{ m})$ $V_2 = (3,0 \text{ m}; 2,5 \text{ m})$ $V_3 = (5,0 \text{ m}; 2,5 \text{ m})$ $V_4 = (7,0 \text{ m}; 2,5 \text{ m})$	
Oda 8	(10m x 8m)	$V_1 = (1,25 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_2 = (1,25 \text{ m}; 6,0 \text{ m})$ $V_3 = (3,75 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_4 = (3,75 \text{ m}; 6,0 \text{ m})$ $V_5 = (6,25 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_6 = (6,25 \text{ m}; 6,0 \text{ m})$ $V_7 = (8,75 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_8 = (8,75 \text{ m}; 6,0 \text{ m})$	

Çizelge 3.1. (Devam) Oda boyutu ve verici yerleşimi

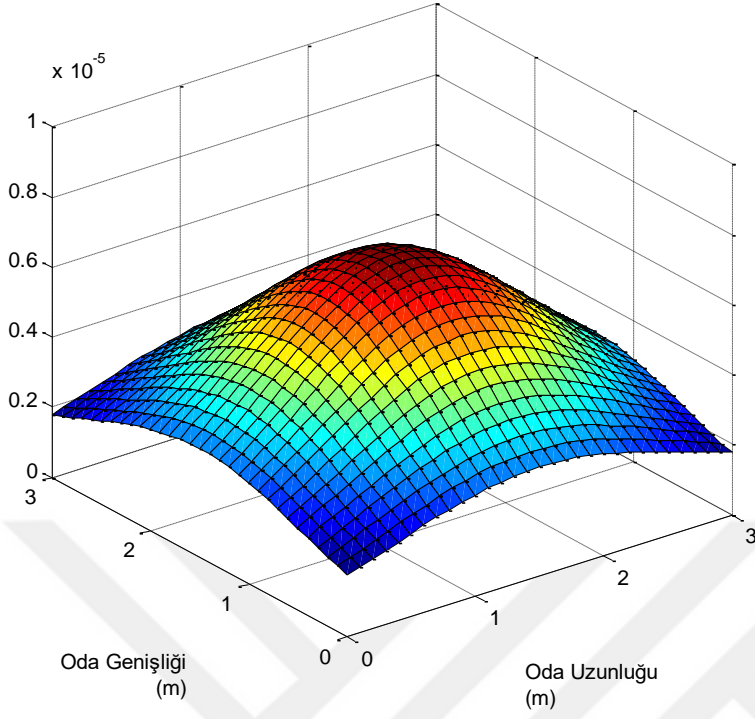
Oda no	Boyut (L, W)	Verici konumu	Verici yerleşimi görseli
Oda 9	(10m x 8m)	$V_1 = (1,66 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_2 = (1,66 \text{ m}; 6,0 \text{ m})$ $V_3 = (3,33 \text{ m}; 4,0 \text{ m})$ $V_4 = (5,0 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_5 = (5,0 \text{ m}; 6,0 \text{ m})$ $V_6 = (6,66 \text{ m}; 4,0 \text{ m})$ $V_7 = (8,33 \text{ m}; 2,0 \text{ m})$ $V_8 = (8,33 \text{ m}; 6,0 \text{ m})$	
Oda 10	(10m x 8m)	$V_1 = (1,0 \text{ m}; 4,0 \text{ m})$ $V_2 = (2,0 \text{ m}; 1,6 \text{ m})$ $V_3 = (2,0 \text{ m}; 6,4 \text{ m})$ $V_4 = (5,0 \text{ m}; 0,8 \text{ m})$ $V_5 = (5,0 \text{ m}; 7,2 \text{ m})$ $V_6 = (8,0 \text{ m}; 1,6 \text{ m})$ $V_7 = (8,0 \text{ m}; 6,4 \text{ m})$ $V_8 = (9,0 \text{ m}; 4,0 \text{ m})$	

3.2. Simülasyon Bulguları

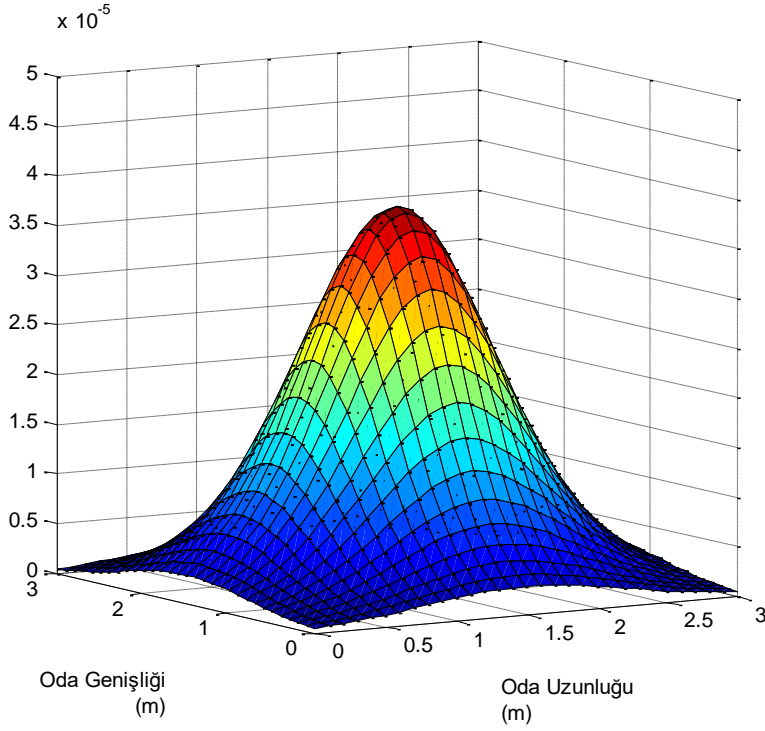
3.2.1. Tek vericili sistemler

Simülasyonlarda belirlenen 10 adet oda için aydınlatma, CIR ve CFR grafikleri farklı alıcı konumu, Lambert mod numarası, yansıtma katsayısı, FOV açısı için incelenmiştir.

İlk olarak Oda 1 için alıcı yüksekliğindeki her noktaya ulaşan gücü gösteren aydınlatma grafikleri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.1’de vericinin Lambert mod numarası önce $m = 1$ seçilmiş, ardından Şekil 3.2’de yönlü aydınlatmanın etkisini incelemek amacıyla $m = 10$ olacak şekilde ikinci değer belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ışık gücü LED’in tam altında (en kısa mesafede) en yüksek seviyede olacaktır. Oda merkezinden ve ışıktan uzaklaştıkça ışık gücü azalacaktır. Yönlü bir aydınlatmada minimum mesafede iletilen maksimum güç beklendiği üzere çok daha yüksektir.



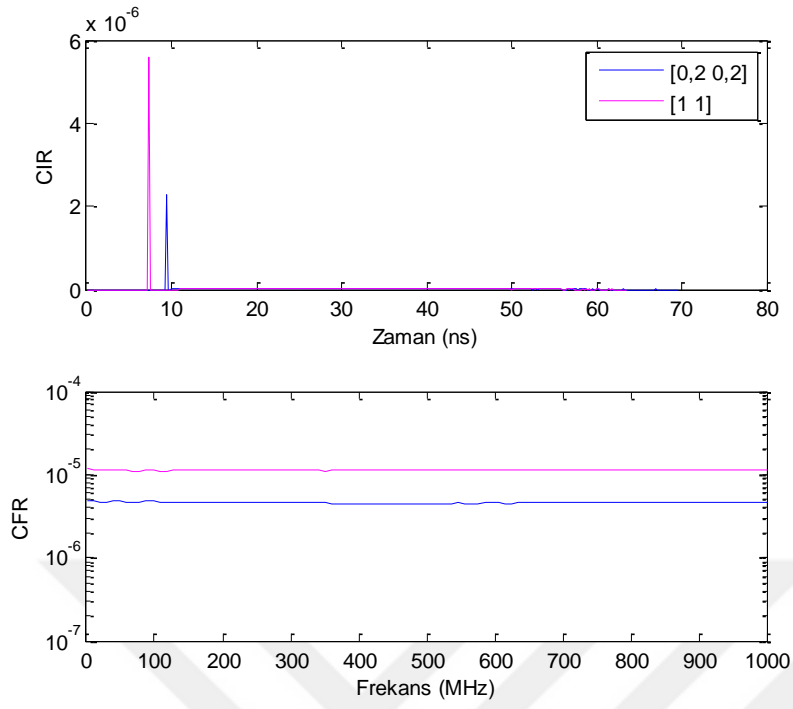
Şekil 3.1. Aydınlatma grafiği, Oda 1, $m = 1$



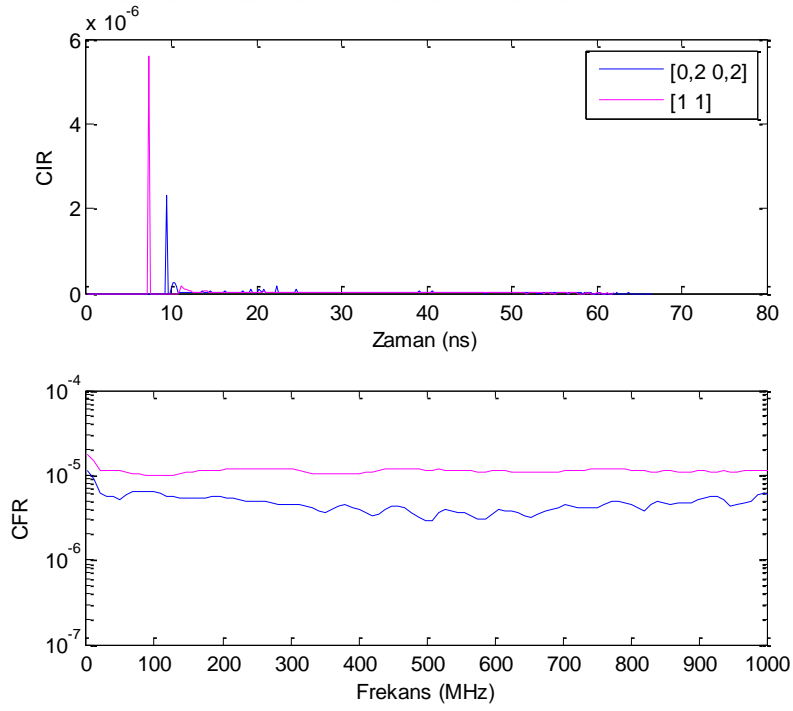
Şekil 3.2. Aydınlatma grafiği, Oda 1, $m = 10$

Aydınlatma grafiklerinin ardından aynı oda ve $m = 1$ için farklı yansımaya katsayısı ve alıcı konumu ile oluşan kanalların CIR ve CFR grafikleri, sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu şekillerde FOV açısının $\psi_c = 60^0$ olduğu varsayılmıştır. Yansımaya katsayısı değerleri yaygın kullanımlara göre belirlenmiştir. Yüzeylerin malzeme ve renk bakımından farklı olduğu ve yansımaya katsayısının 0,1 ile 0,9 arasında değer aldığı bilinmektedir [50]. Açık renkli sıva, taş veya parke olduğu durumlar için yansımaya katsayısı 0,5 olurken, 0,1 değeri kırmızı kiremit gibi koyu renkler için, 0,9 değeri ise cam gibi yüksek yansıtıcılı yüzeyler için kullanılmaktadır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de uç koşulları değerlendirmek için iki durum, 0,1 ve 0,9 olarak düşük ve yüksek yansıtıcı yüzeyli odalar varsayımıyla ele alınmıştır. Takip eden simülasyonlarda ise yansımaya katsayısı 0,5 orta değer olduğu varsayılmıştır.

Alıcı yerinin etkisi araştırmak için, az ve çok yansımali ortamlarda alıcı köşede (0,2; 0,2) konumunda ve merkeze yakın (1; 1) konumunda iken kanal karakteristikleri incelenmiştir. Yansımaya katsayısı 0,1 için alıcı konumu (0,2; 0,2) ve (1; 1) için sırasıyla τ_{rms} 3,299 ns ve 2,968 ns olarak hesaplanmıştır. Yansımaya katsayısı 0,9 için ise aynı alıcı konumları için sırasıyla τ_{rms} 10,606 ns ve 10,833 ns olarak hesaplanmıştır. Alıcı vericiye yaklaştıkça, LOS'un kuvvetlendiği ve daha erken ortaya çıktığı her iki şekilde de açıktır. Yansımaya az olduğunda verici alıcıya yaklaştığında τ_{rms} değerinde azalma görülürken yansımaya çok olduğu durumda ise artış gözlemlenmiştir. Yansımaya az olduğu durumda alıcının konum değişikliği kanalın frekans seçiciliğinde önemli bir fark yaratmamaktadır, ancak zayıflama daha azdır. Ancak, yansımaya katsayısı büyük olduğunda, duvarlara yakın konumda frekans düzleminde bir hareketlenme gözlenmiştir. Yüzeylerin yansıtıcılığı arttıkça NLOS bileşenlerinin etkisinin artmasıyla τ_{rms} 'de ciddi bir artış görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde alıcının hareketliliğinin bir sorun olmayacağı sonucuna varılmıştır. Vericiden uzaklaştıkça artan zayıflama yükseltici kullanılarak çözülebilir.

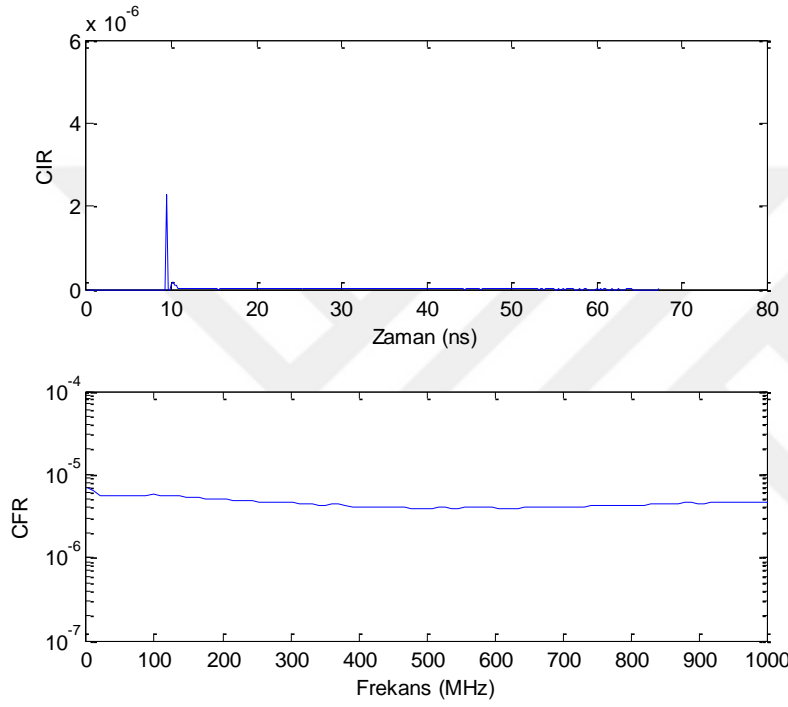


Şekil 3.3. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,1$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$,

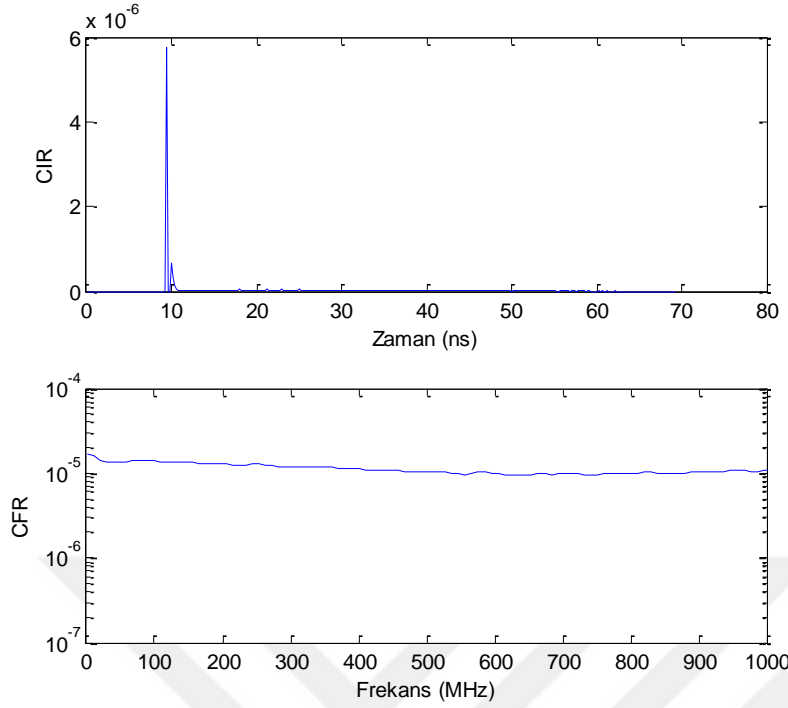


Şekil 3.4. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,9$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$

Yoğunlaştırıcının etkisi Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekil 3.5 Şekil 3.6 ile kıyaslandığında, beklendiği üzere, yoğunlaştırıcı alınan işareti kuvvetlendirmiş, LOS ve yansımaların büyümesiyle kanal kazancı artmıştır. Yoğunlaştırıcı etkisi güç kazancı şeklinde olmaktadır. Alıcı konumu = (0,2 0,2) için yoğunlaştırıcı kullanılmadığı durumda $\tau_{rms} = 7,297$ ns, yoğunlaştırıcı indisi $n = 2,5$ iken $\tau_{rms} = 7,073$ ns olarak hesaplanmıştır. Yoğunlaştırıcının etkisini daha iyi görmek için Rician faktör incelenmiştir.

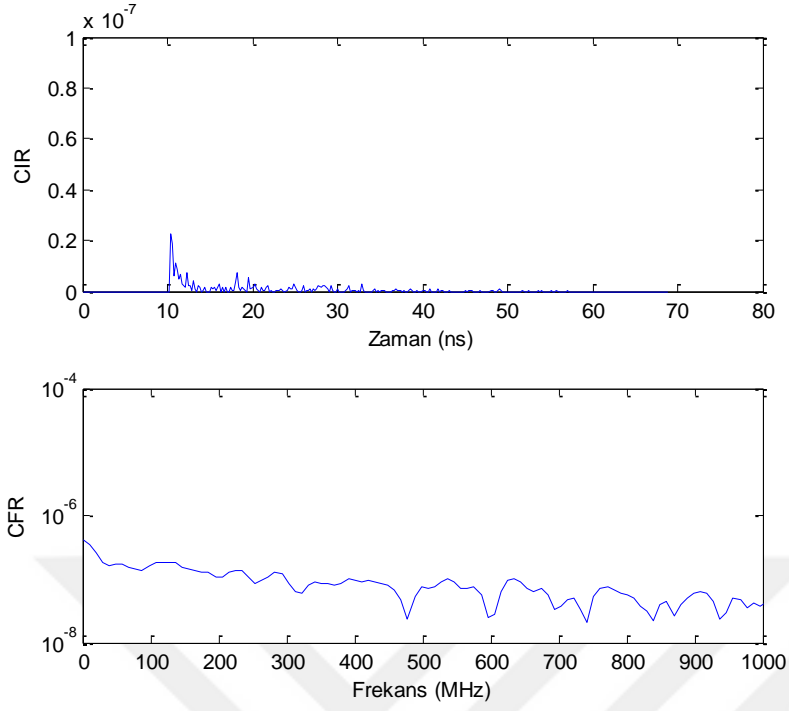


Şekil 3.5. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$, $n = 1$;

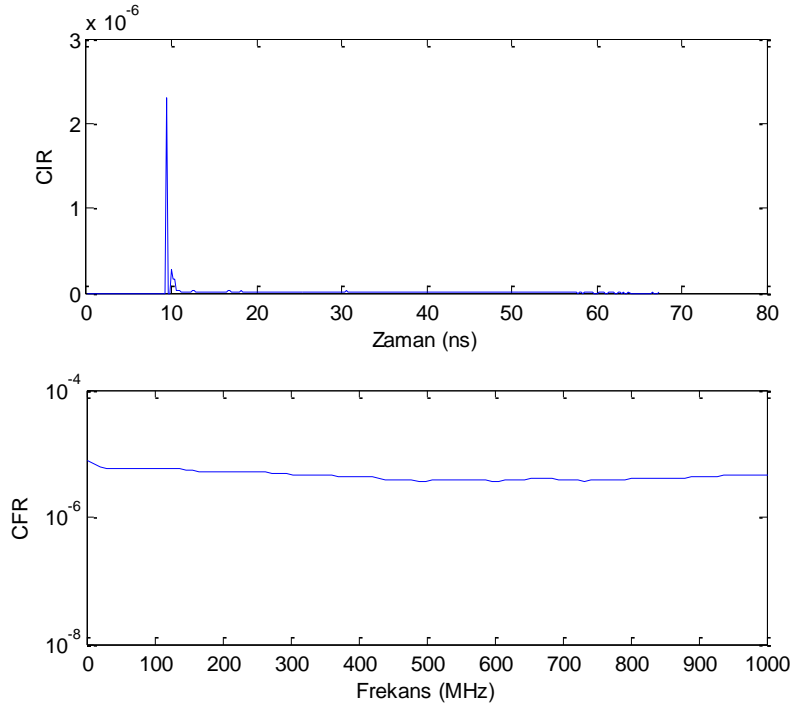


Şekil 3.6. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$, $n = 2,5$

Ardından alıcının görüş açısının kanal üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görüldüğü gibi FOV açısı küçük seçildiğinde alıcının vericiyi uzak olduğu durumlarda, alıcı LOS hattını görmemekte, kanal sadece NLOS hatlarından oluşmaktadır. Bu da kanal kaybının çok yüksek olmasıyla ve frekans seçici bir kanal ile sonuçlanmaktadır. Alıcı köşede (0,2; 0,2) noktasında konumlanmış iken, $FOV = 20^\circ$ ise, $\tau_{rms} = 8,939$ ns, $FOV = 90^\circ$ ise $\tau_{rms} = 7,614$ ns olarak hesaplanmıştır.

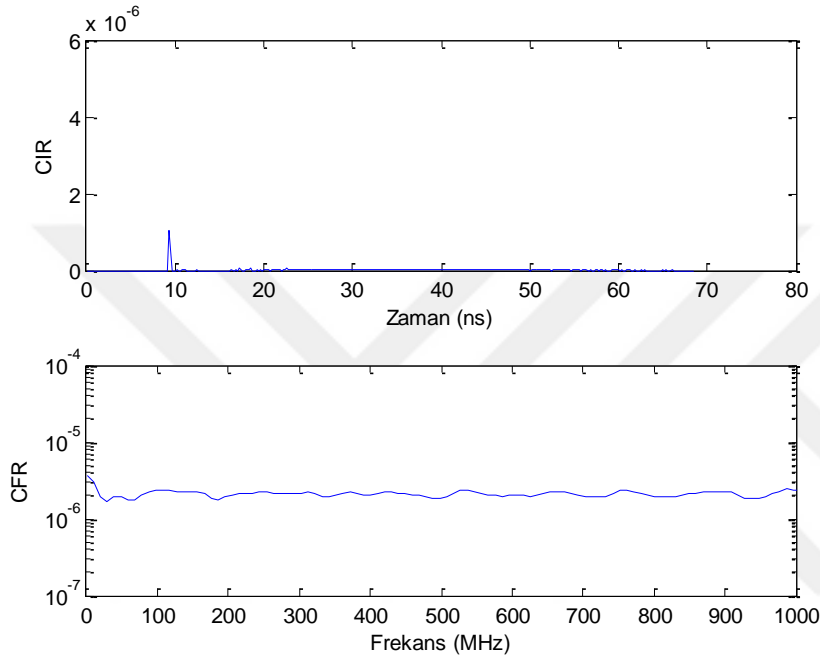


Şekil 3.7. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 20^\circ$



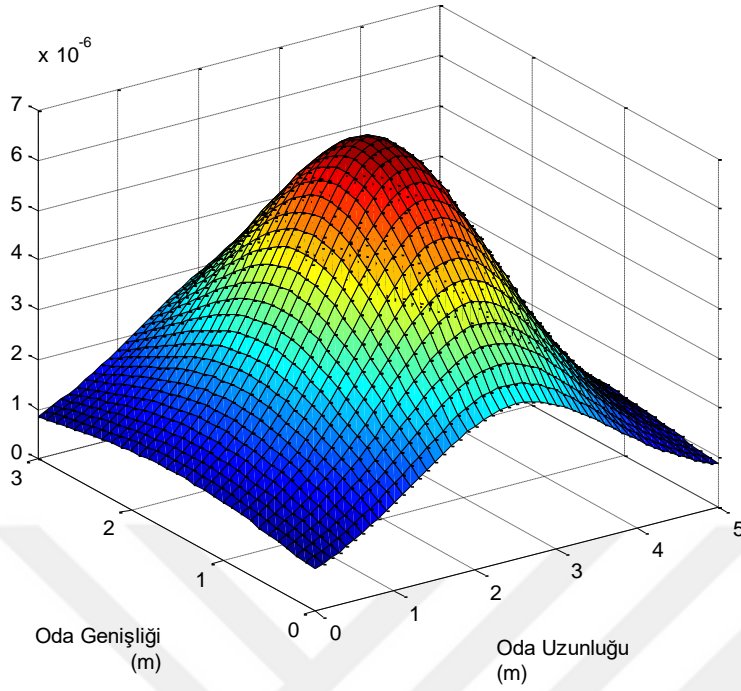
Şekil 3.8. CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 90^\circ$

Şekil 3.9’da $m = 10$ (yönlü ışık) için CIR ve CFR grafikler incelenmiştir. Alıcı Konumu $(0,2; 0,2)$ için $\tau_{rms} = 10,175$ ns olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.5 ile kıyaslandığında, FOV açısı LOS hattını alacak genişlikteyse, yönlü ışık kullanmanın kanal karakteristiğinde zayıflama dışında ciddi bir etki yaratmadığı görülmektedir. Ancak daha büyük oda veya daha küçük FOV açılı alıcı kullanıldığında şekil 3.7’de gözlemlenen durum yaşanacaktır.

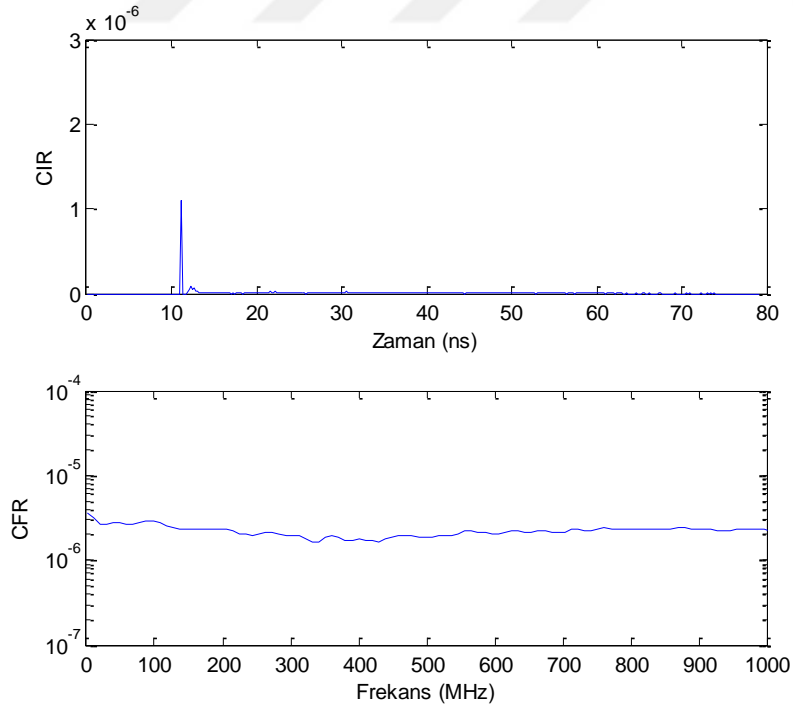


Şekil 3.9 CIR ve CFR grafikleri, Oda 1, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, FOV = 60°

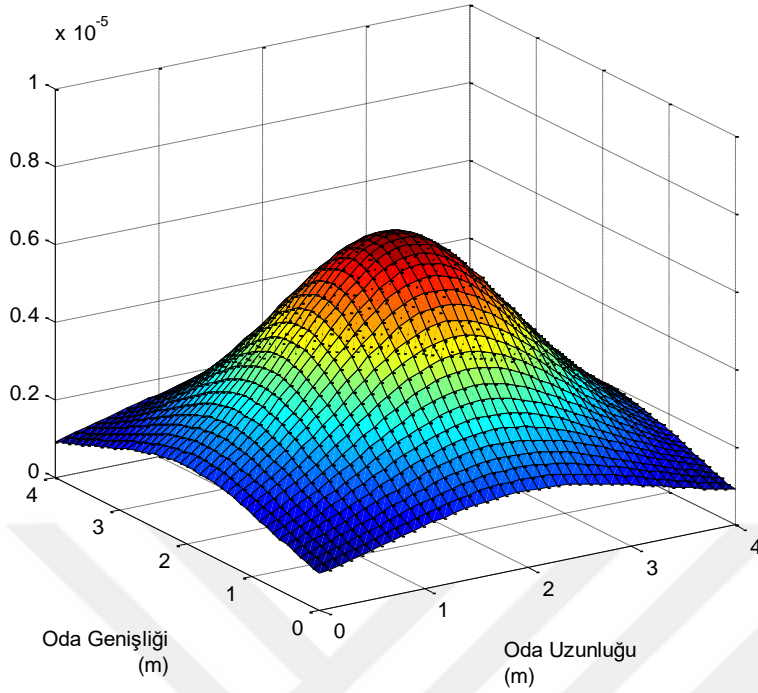
İncelenen Oda 1 küçük kare bir oda (9 m²) olarak belirlenmiştir. Büyük odalardaki tek vericili kanal yapılarını incelemek amacıyla dikdörtgen olan Oda 2 (15 m²) ve kare olan Oda 3 (16 m²) ele alınmıştır. İki odaya ait aydınlatma, CIR ve CFR grafikleri Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de verilmiştir. Alıcı konumu $(0,2; 0,2)$ için Oda 2 $\tau_{rms} = 8,693$ ns, Oda 3 için ise $\tau_{rms} = 9,078$ ns olarak hesaplanmıştır. Oda büyüklüğü arttıkça, τ_{rms} gecikme yayılımının arttığı görülmektedir ama CFR grafikleri arasındaki fark önemli değildir. Oda şeklinin dikdörtgen veya kare olması arasında da belirgin fark oluşmamıştır.



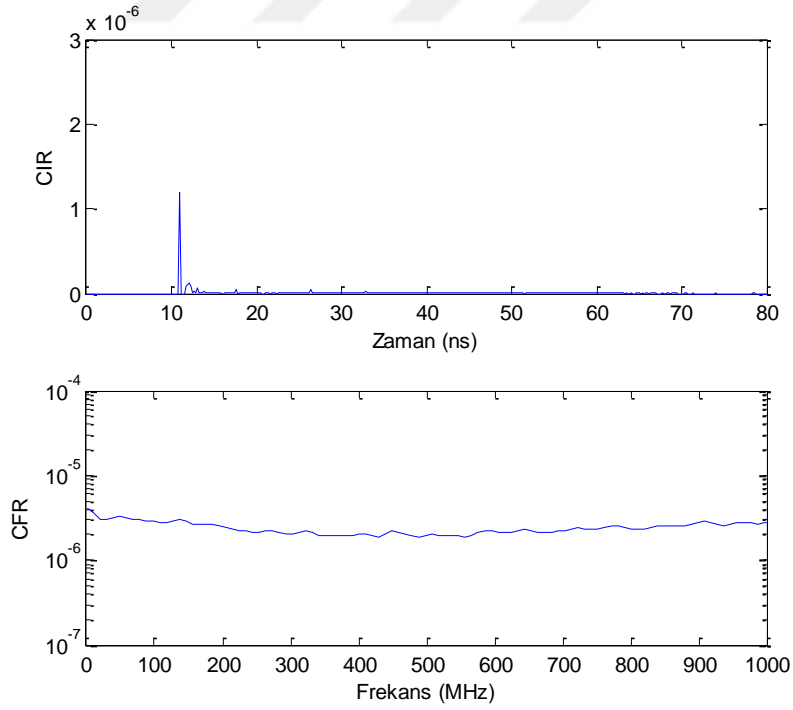
Şekil 3.10. Aydınlatma grafiği, Oda 2, $m = 1$



Şekil 3.11. CIR ve CFR grafikleri, Oda 2, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 3.12. Aydınlatma grafiği, Oda 3, $m = 1$



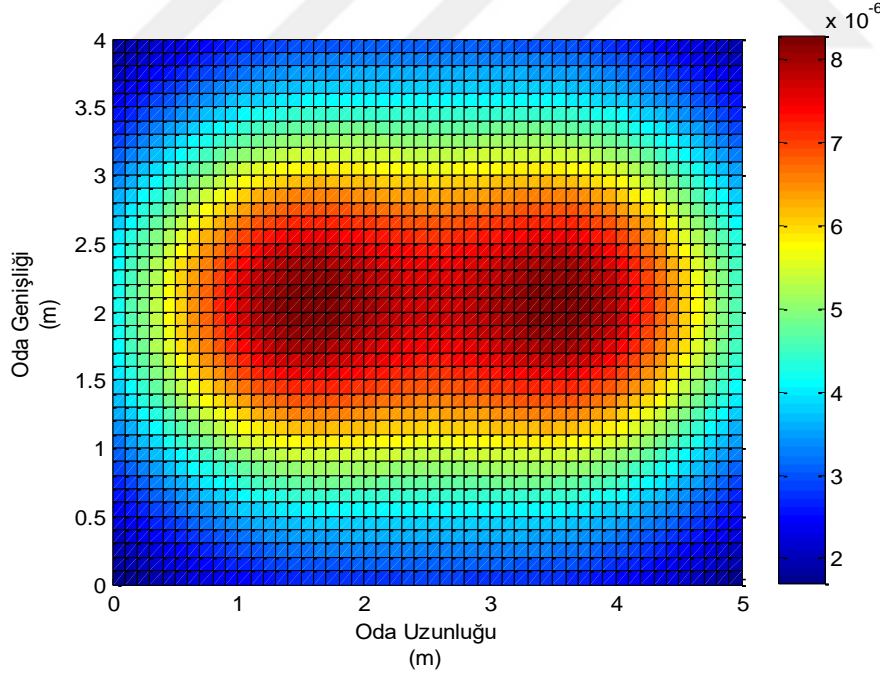
Şekil 3.13. CIR ve CFR grafikleri, Oda 3, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$

3.2.2. İki vericili sistemler

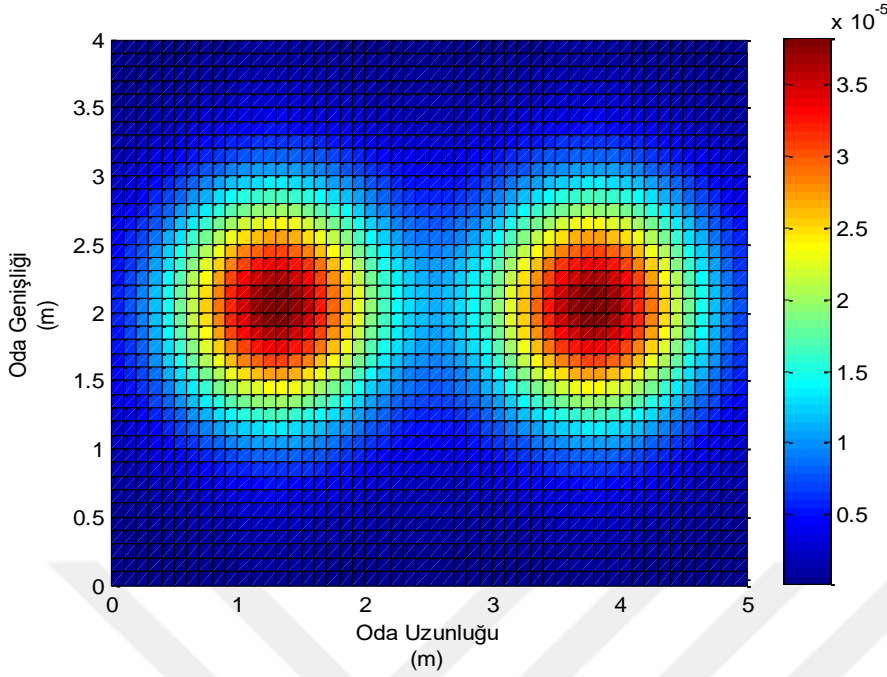
Tavana dağıtılmış çoklu ışık kaynaklı aydınlatma sistemleri tekli aydınlatmaya göre oda geneline daha homojen aydınlatma sağlayabilmesi açısından avantajlıdır. Özellikle büyük odalarda gölgelemeyi engellemesi açısından da önemlidir. VLC açısından bakıldığında çoklu verici sistemleri iletişimde gölgelemenin önüne geçebilir olması avantajdır ancak kanal çokyolluluktan daha ciddi şekilde etkilenecektir. Farklı ışık düzenekleri, yönlü LED ve dar alıcı açısı bu zorlukla başa çıkmada yardımcı çözümlerdir.

Çoklu vericili VLC sistemleri için kanal yapısını incelemek öncelikli konulardan biridir [50-54]. Bu amaçla daha önce olası senaryolar göz önünde bulundurularak tanımlanan ve Çizelge 3.3’de verilen yedi farklı oda (Oda 4- Oda 10) ele alınmıştır.

Tek vericili durumda olduğu gibi 20 m^2 ’lik 2 vericili Oda 4 için de öncelikle aydınlatma grafikleri incelenmiştir (Şekil 3.14 ve şekil 3.15).

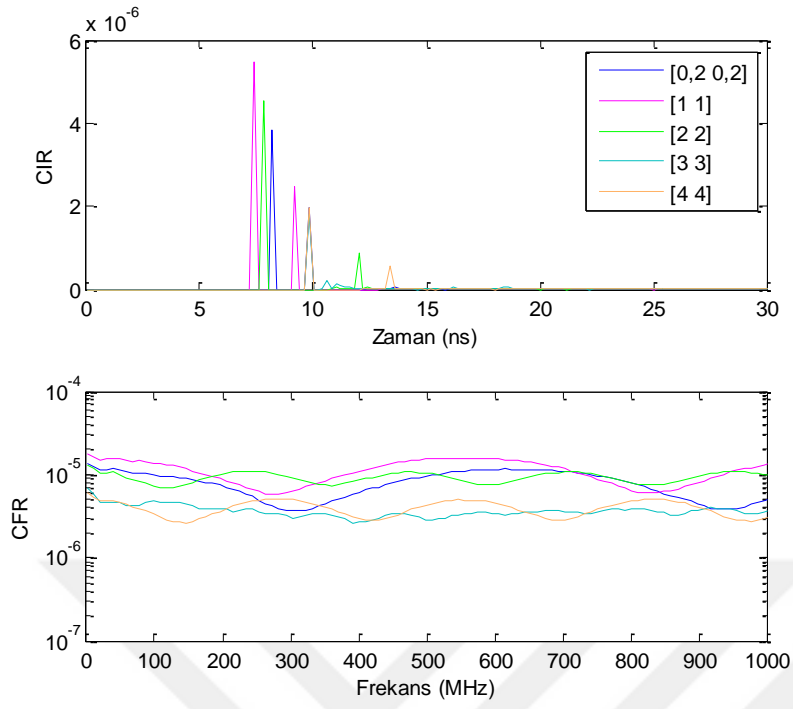


Şekil 3.14. Aydınlatma grafiği, Oda 4, $m = 1$

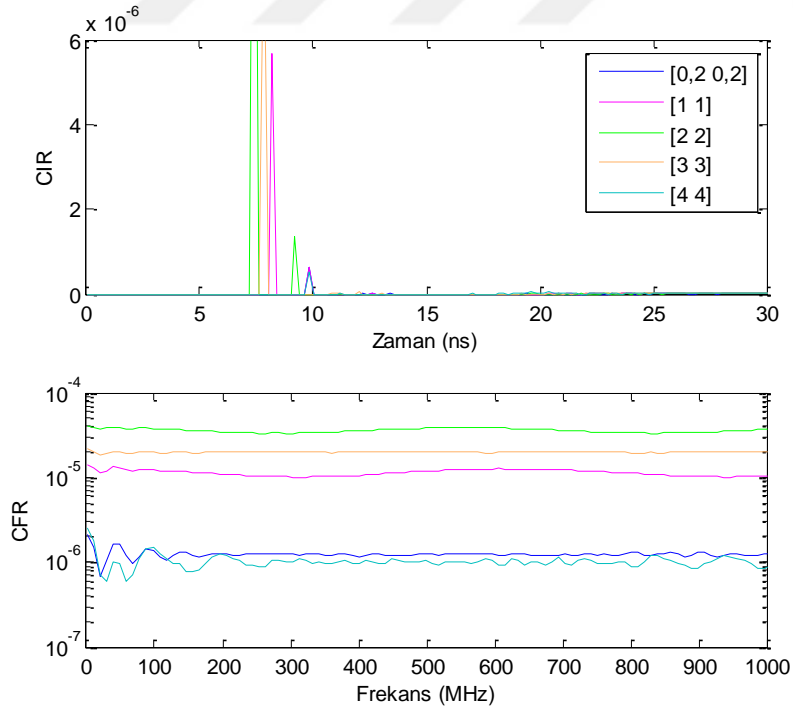


Şekil 3.15. Aydınlatma grafiği, Oda 4, $m = 10$

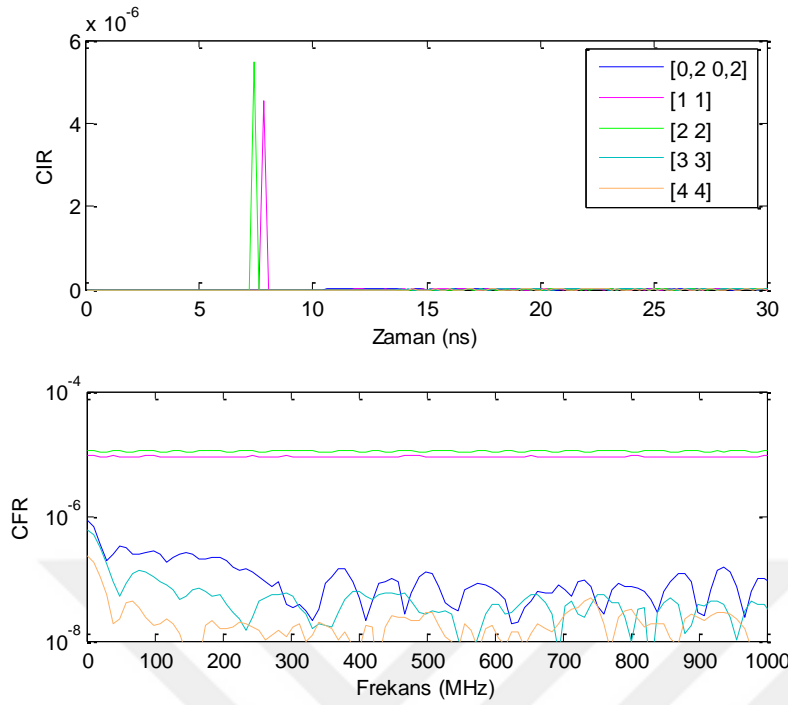
Ardından farklı alıcı konumları için çokyollu kanal yapısı incelenmiş, CIR ve CFR sonuçları $m = 1$ için Şekil 3.16, $m = 10$ için Şekil 3.17’de verilmiştir. CIR grafiklerinde, verici sayısı kadar LOS hatları açıkça fark edilmektedir. Alıcı vericilere yaklaştıkça LOS yollarındaki artan kazançları açıkça görülmektedir. CFR grafiklerinde farklı alıcı konumları için gözle görülür bir dalgalanma görülmektedir. Bu dalgalanma LOS hatları boyut olarak birbirine yaklaştıkça belirginleşmektedir. Dalgalanma periyodiktir ve periyot LOS hatları arasındaki zaman farkıyla ilişkilidir. İkili kaynak önemli bir frekans seçiciliğine neden olmaktadır (Şekil 3.16). Ancak yönlü aydınlatma ($m = 10$) kullanıldığında alıcı konumuna bağlı olarak sadece yakın LOS aldığından dolayı frekans seçiciliğin daha az olduğu Şekil 3.17’de ortaya çıkmıştır. Diğer bir çözüm dar açılı bir alıcı kullanmaktır. Ancak Şekil 3.18’de görüldüğü gibi açı daraldıkça bazı konumlarda LOS gözlenmemektedir.



Şekil 3.16. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 3.17. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 3.18. CIR ve CFR grafikleri, Oda 4, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$

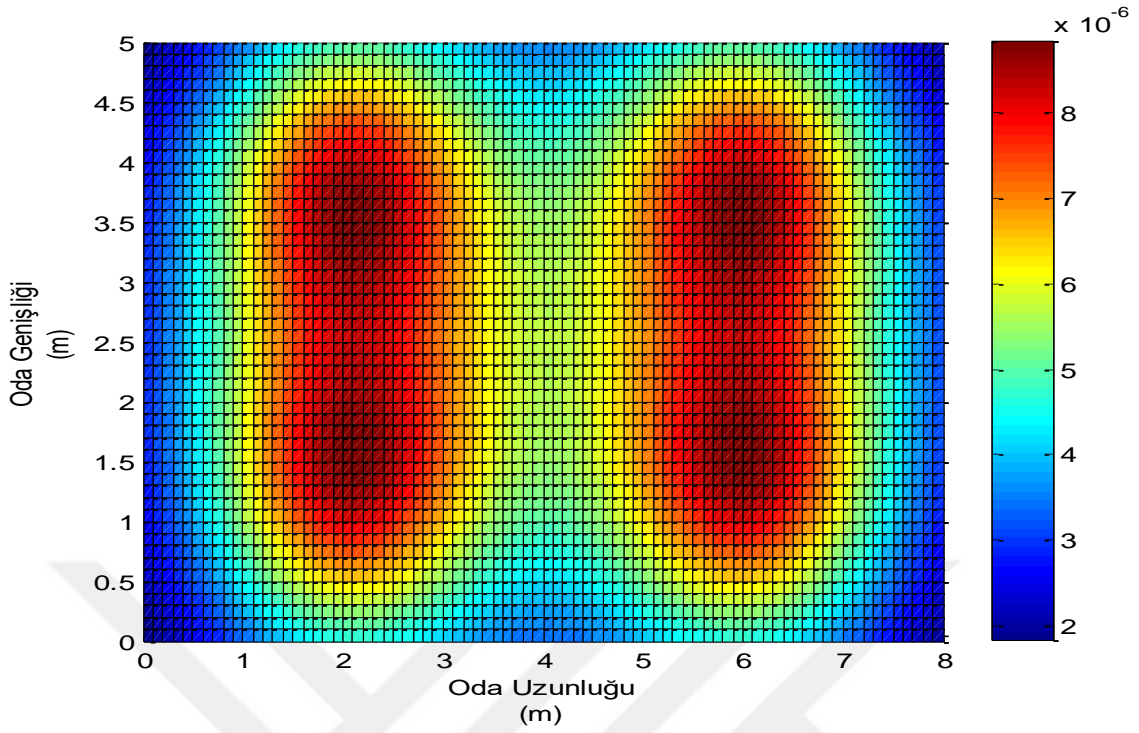
Alıcı konumları (0,2;0,2), (1;1), (2;2), (3;3) ve (4;4) için τ_{rms} değerleri kıyaslama amaçlı Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Oda 4 τ_{rms} değerleri

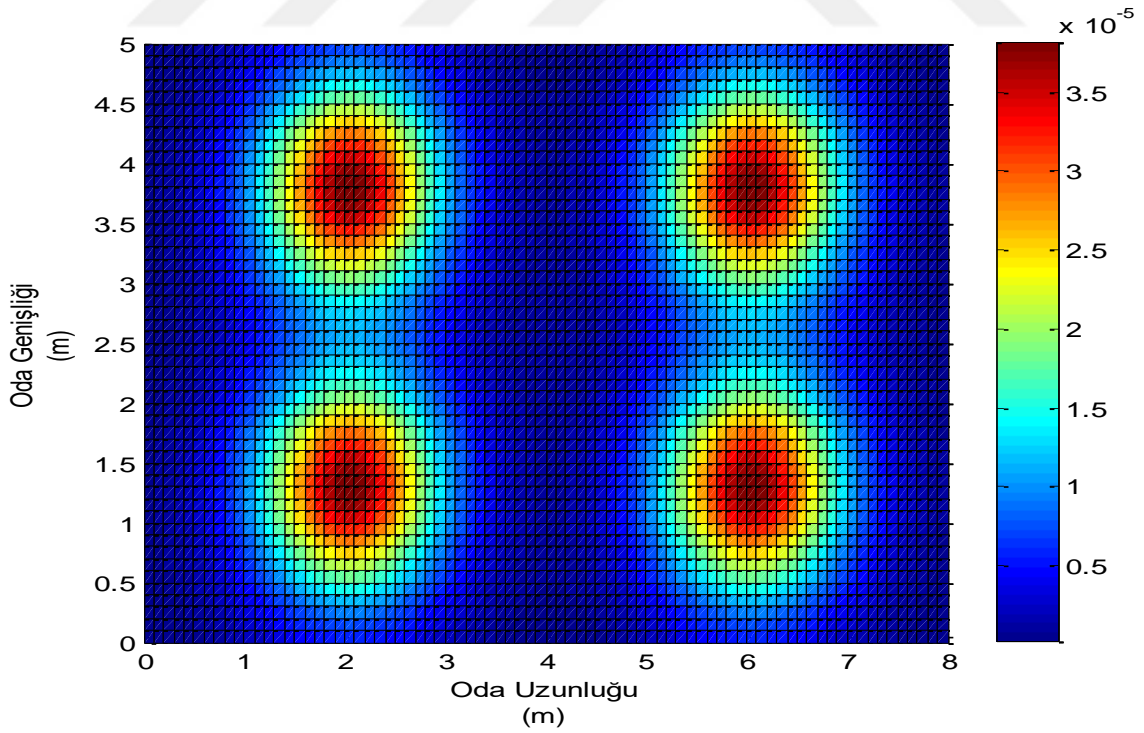
		τ_{rms} (ns)				
		(0,2; 0,2)	(1; 1)	(2; 2)	(3;3)	(4; 4)
Oda 4	$m = 1$, $FOV = 60^\circ$	9,881	9,015	8,428	8,977	9,130
	$m = 1$, $FOV = 30^\circ$	12,194	10,679	4,568	9,863	11,215
	$m = 10$, $FOV = 60^\circ$	7,176	8,756	6,217	9,745	10,687

3.2.3. Dört vericili sistemler

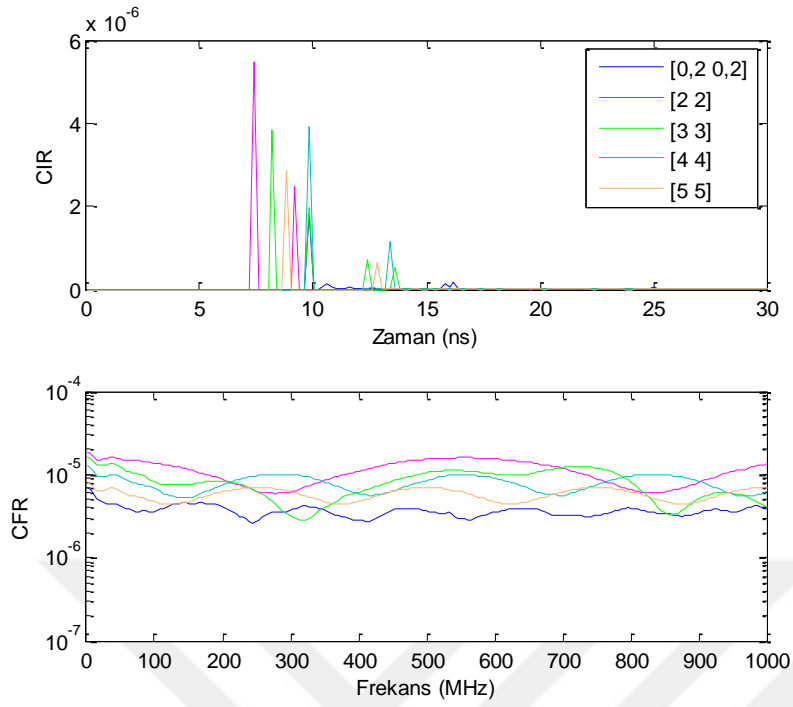
Çizelge 3.1’de gösterilen dört vericili 40 m²’lik farklı aydınlatma düzeneklerine sahip Oda 5’e ait aydınlatma grafiği Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve CIR, CFR grafikleri Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23’te, Oda 6’ya ait aydınlatma grafiği Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve CIR, CFR grafikleri Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28’de ve Oda 7’ye ait aydınlatma grafiği Şekil 3.29, Şekil 3.30 ve CIR, CFR grafikleri Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33’te verilmiştir.



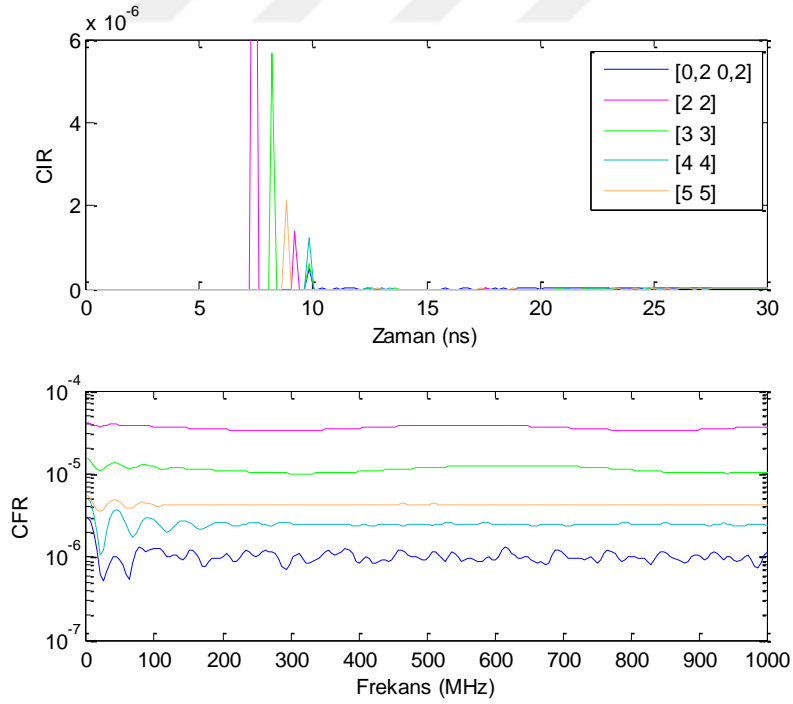
şekil 3.19. Aydınlatma grafiği, Oda 5, $m = 1$



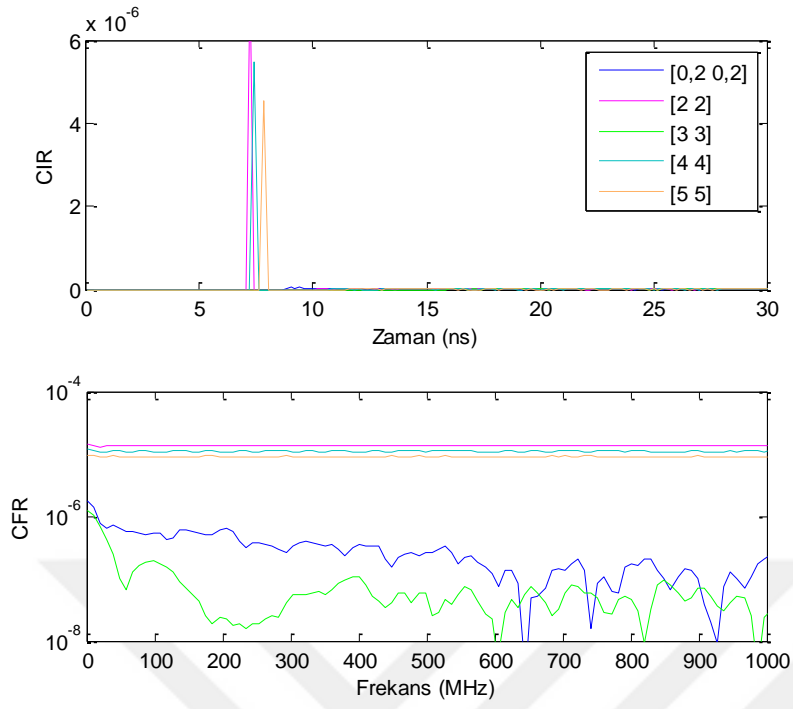
şekil 3.20. Aydınlatma grafiği, Oda 5, $m = 10$



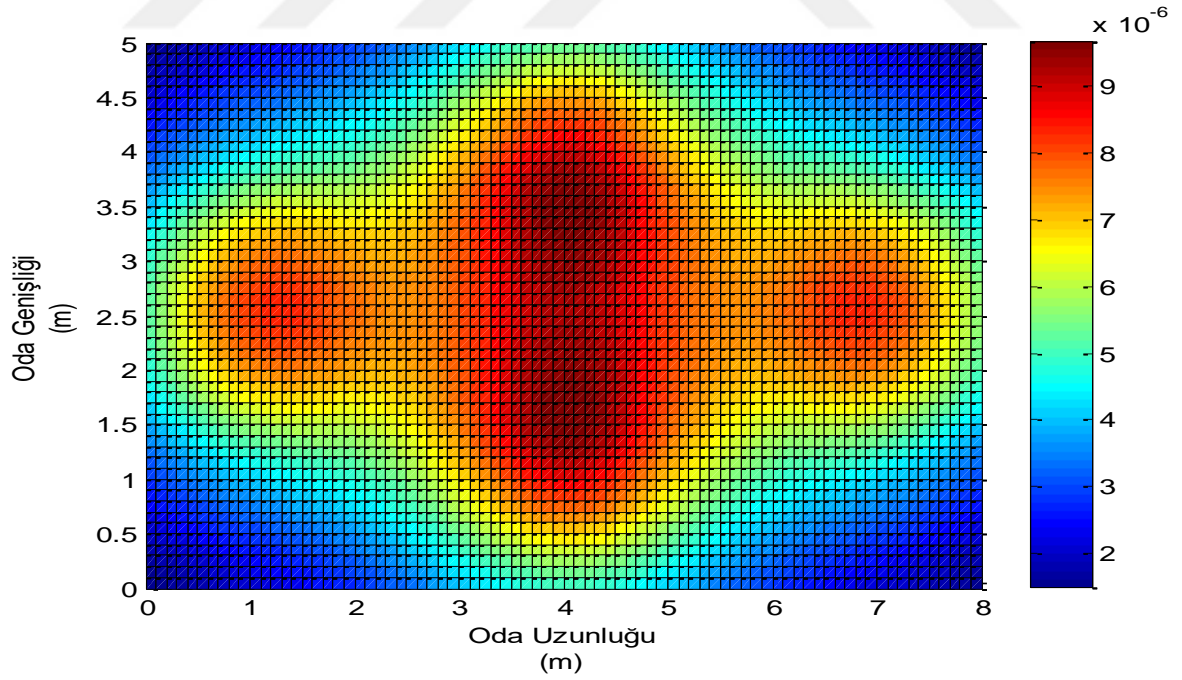
Şekil 3.21. CIR ve CFR grafikleri, Oda 5, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



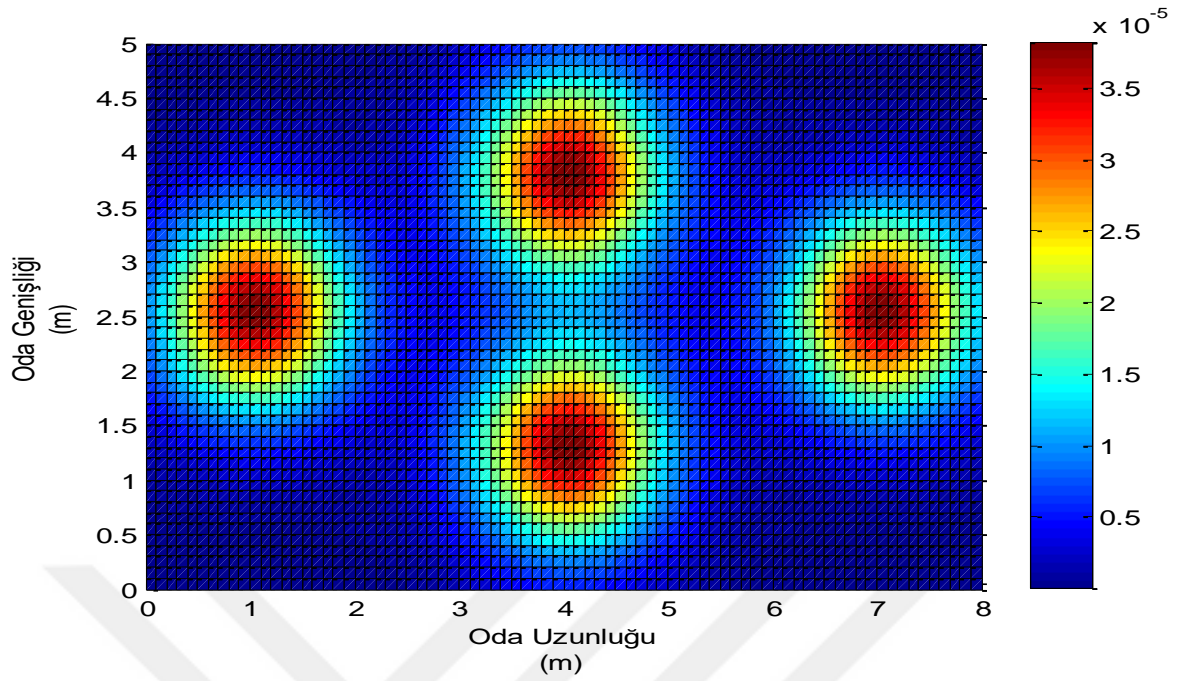
Şekil 3.22. CIR ve CFR grafikleri, Oda 5, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



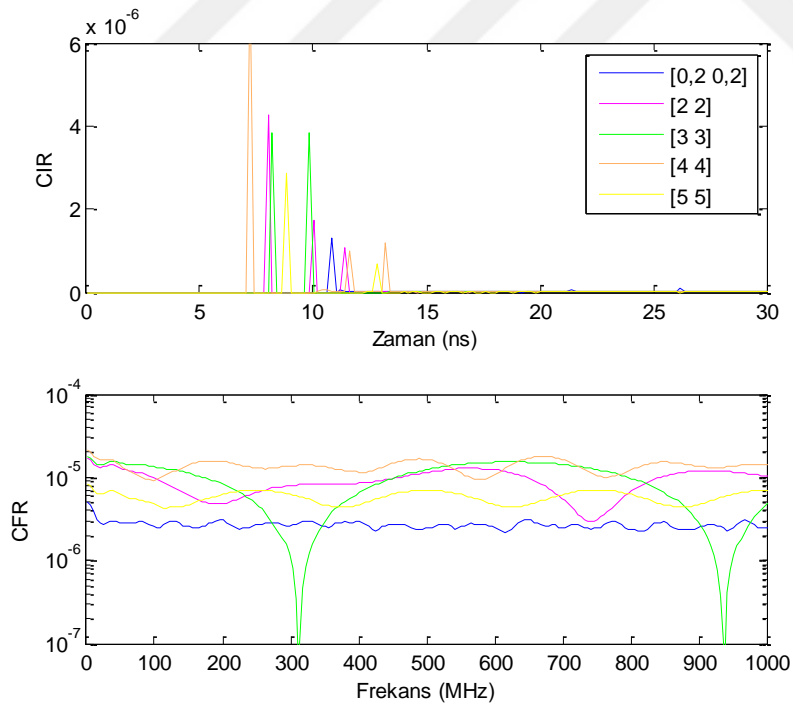
Şekil 3.23. CIR ve CFR grafikleri, Oda 5, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$



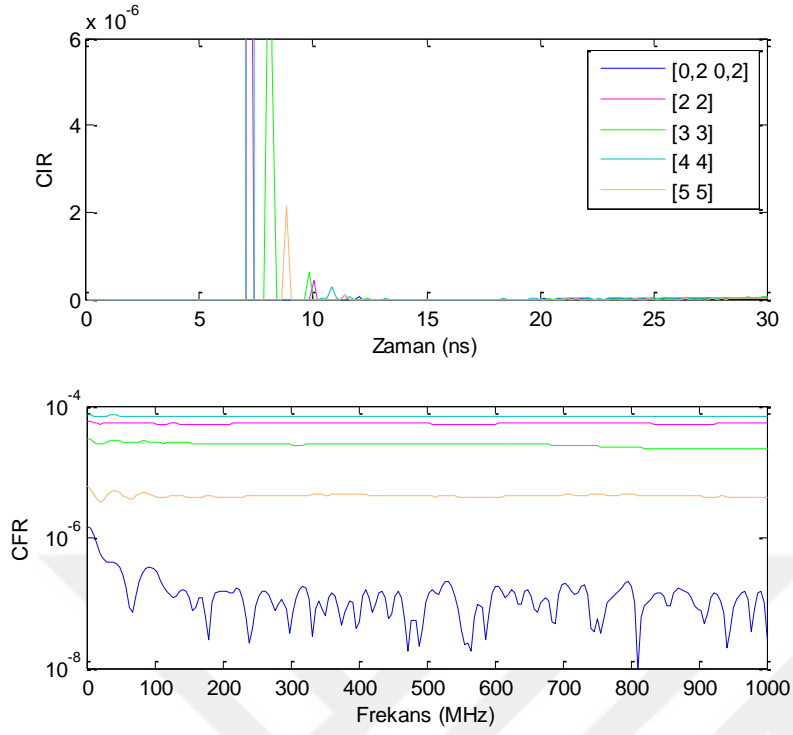
Şekil 3.24. Aydınlatma grafiği, Oda 6, $m = 1$



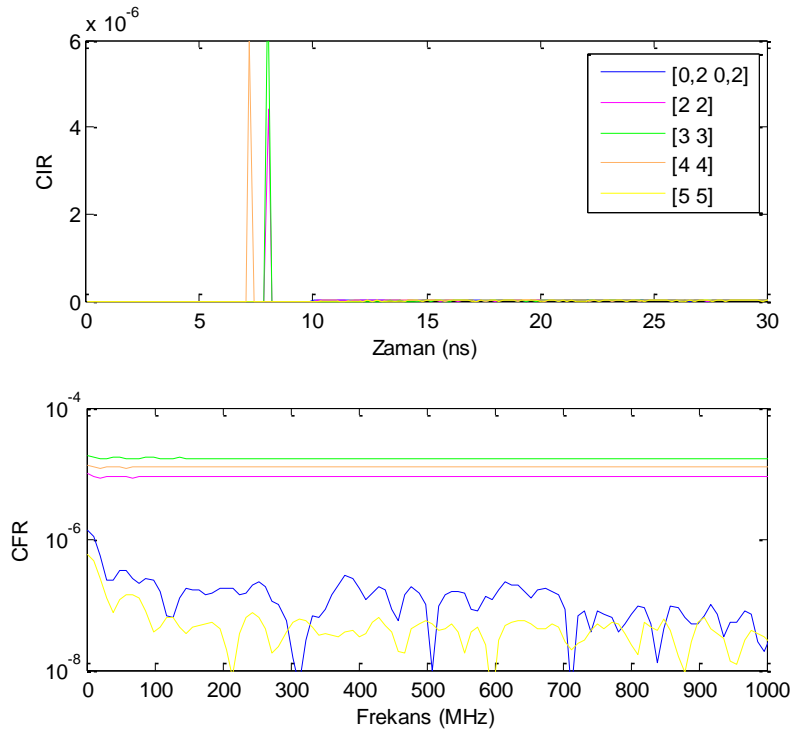
şekil 3.25. Aydınlatma grafiği, Oda 6, $m = 10$



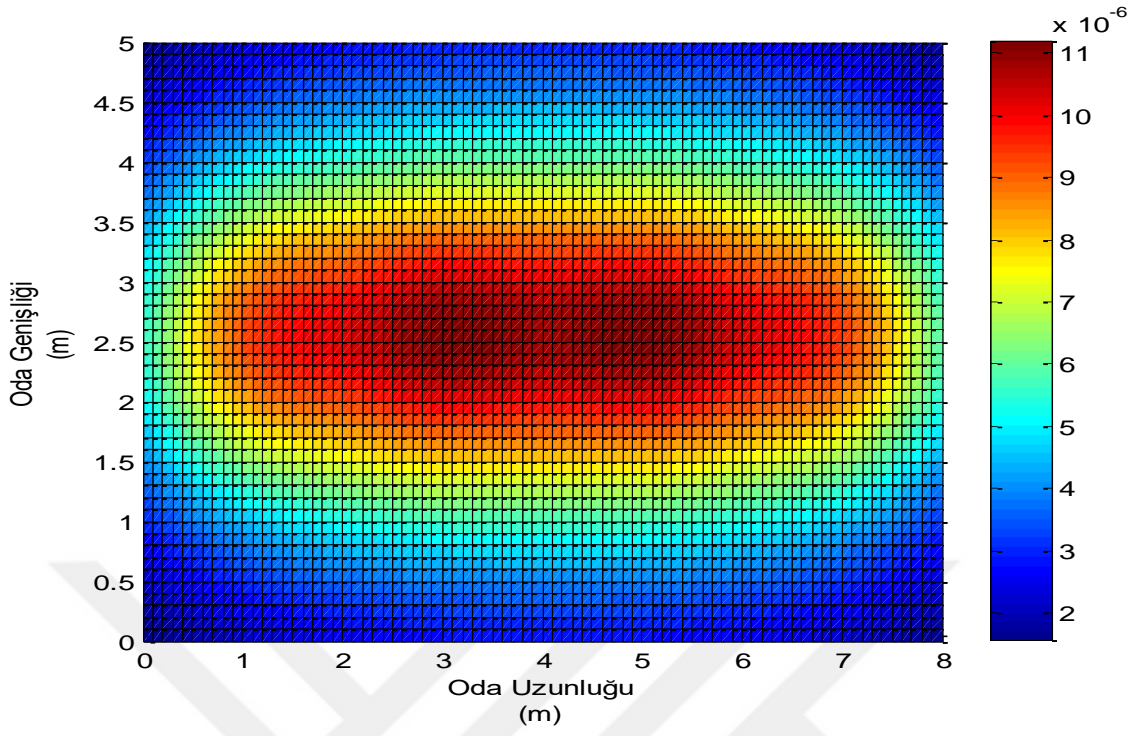
şekil 3.26. CIR ve CFR grafikleri, Oda 6, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



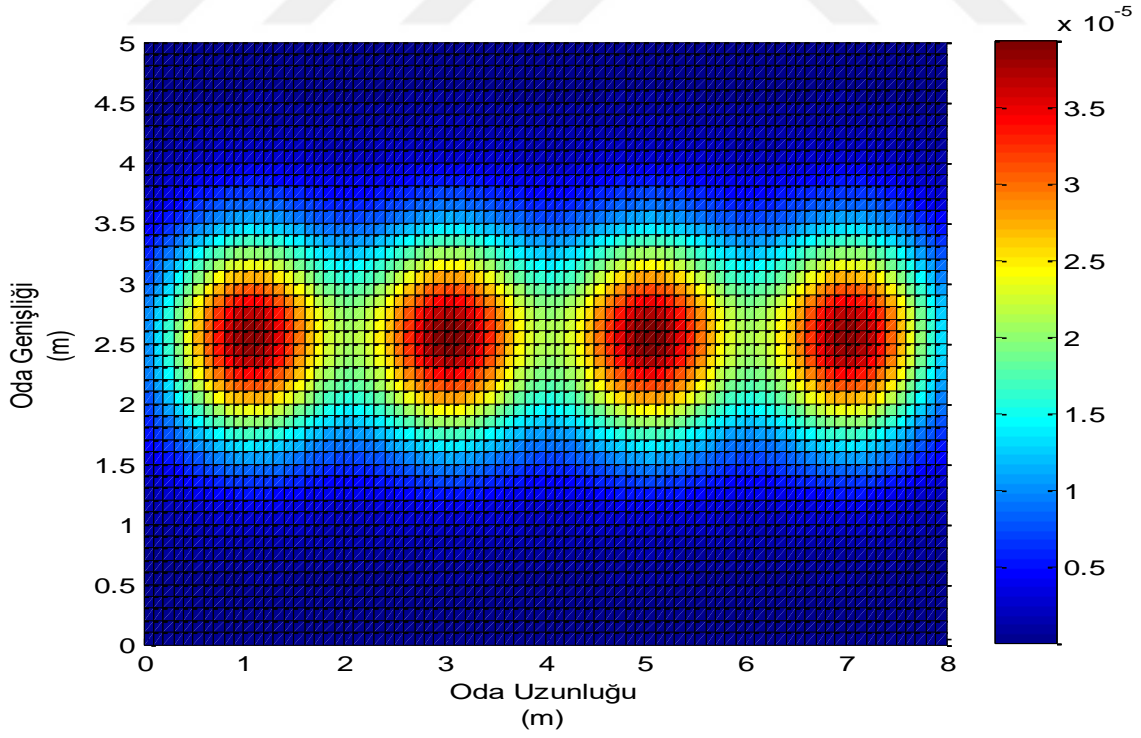
Şekil 3.27. CIR ve CFR grafikleri, Oda 6, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



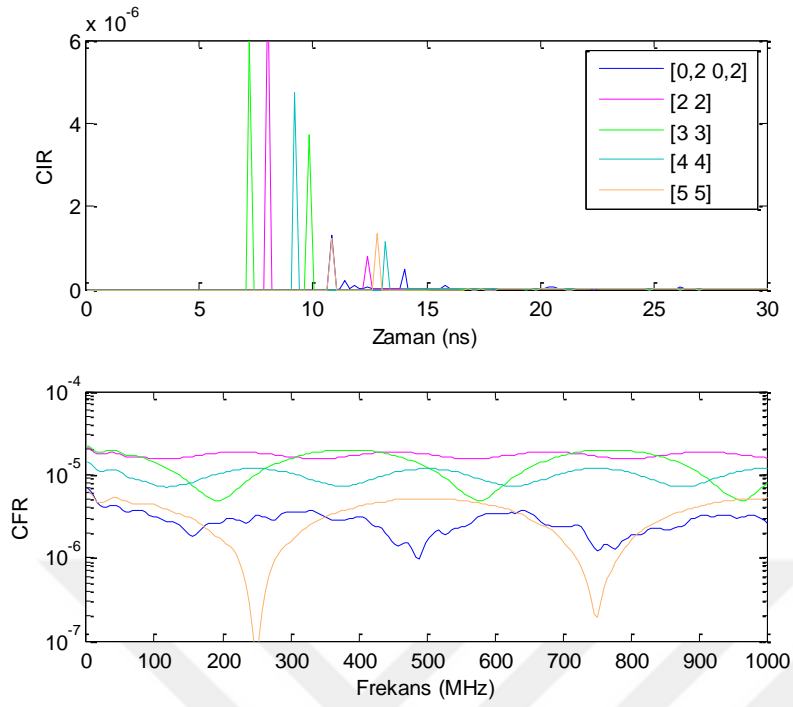
Şekil 3.28. CIR ve CFR grafikleri, Oda 6, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$



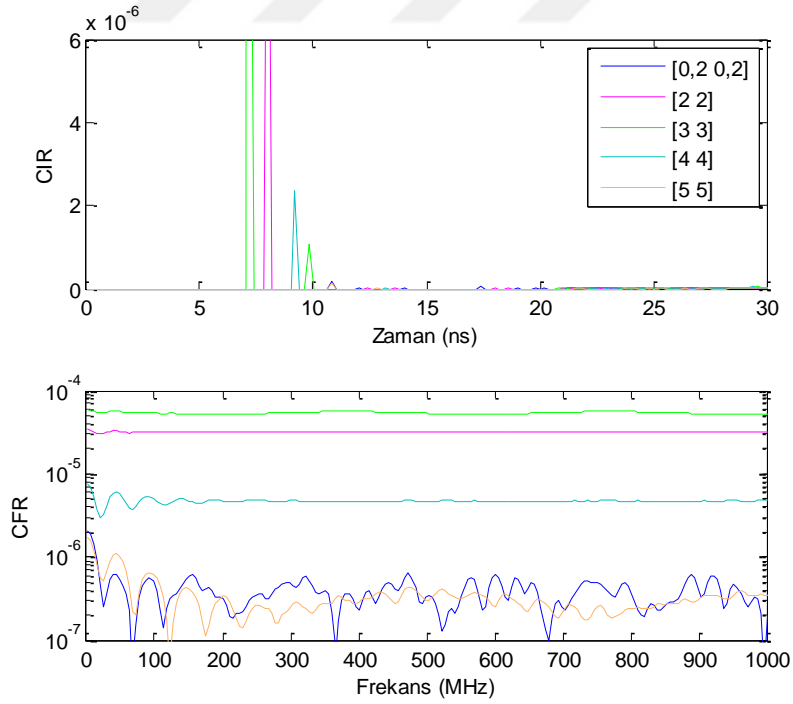
şekil 3.29. Aydınlatma grafiği, Oda 7, $m = 1$



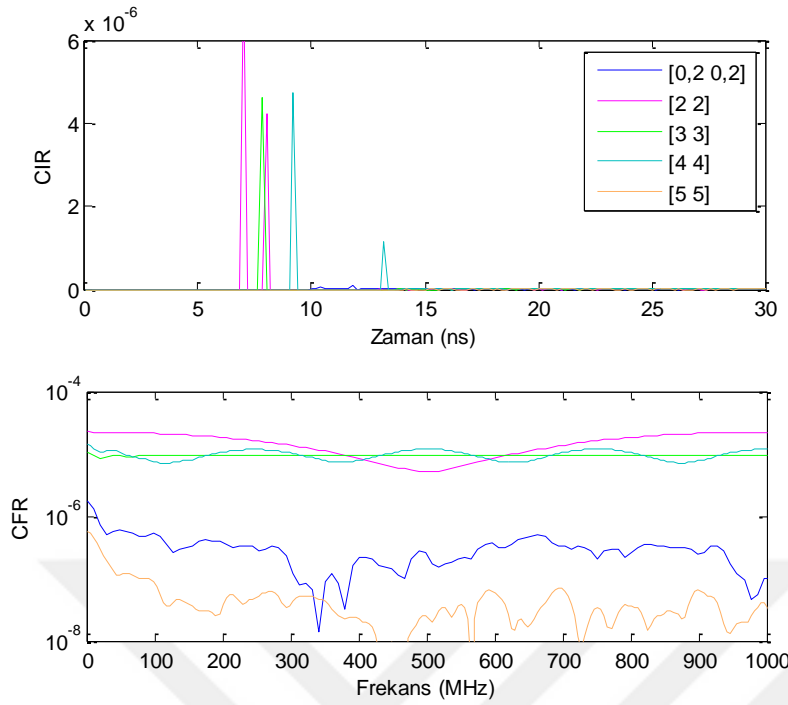
şekil 3.30. Aydınlatma grafiği, Oda 7, $m = 10$



Şekil 3.31. CIR ve CFR grafikleri, Oda 7, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 3.32. CIR ve CFR grafikleri, Oda 7, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 3.33. CIR ve CFR grafikleri, Oda 7, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$

Oda 5, Oda 6 ve Oda 7 τ_{rms} değerleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Oda 5, Oda 6 ve Oda 7 τ_{rms} değerleri

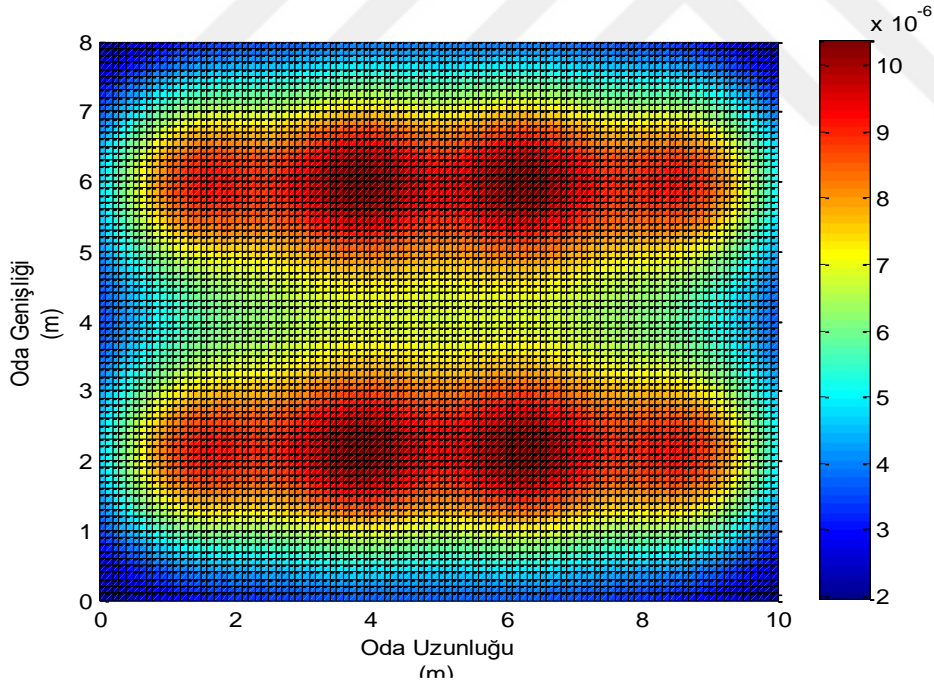
Alıcı konumu		τ_{rms} (ns)				
		(0,2; 0,2)	(2; 2)	(3; 3)	(4;4)	(5; 5)
Oda 5	$m = 1$, $FOV = 60^\circ$	12,502	10,650	10,850	11,415	11,025
	$m = 1$, $FOV = 30^\circ$	8,959	3,419	4,205	5,486	7,871
	$m = 10$, $FOV = 60^\circ$	10,029	4,885	7,843	11,002	9,006
Oda 6	$m = 1$, $FOV = 60^\circ$	13,294	10,246	9,699	9,549	12,090
	$m = 1$, $FOV = 30^\circ$	12,075	8,548	6,906	7,803	11,250
	$m = 10$, $FOV = 60^\circ$	14,359	10,379	11,237	5,968	1,297
Oda 7	$m = 1$, $FOV = 60^\circ$	12,057	10,013	10,061	11,195	11,465
	$m = 1$, $FOV = 30^\circ$	8,604	6,371	12,106	10,699	7,970
	$m = 10$, $FOV = 60^\circ$	13,027	7,909	6,739	14,449	14,071

CIR grafiklerinde, verici sayısı kadar LOS hatları ve alıcı vericilere yaklaştıkça LOS yollarındaki artan kazançları görülmektedir. CFR grafiklerinde LOS hatları boyutuna ve aralarındaki zaman farkıyla ilgili bir dalgalanma görülmektedir. Çoklu kaynak önemli bir frekans seçiciliğine neden olmaktadır. Kanalin frekans seçiciliği aydınlatma düzeneğine

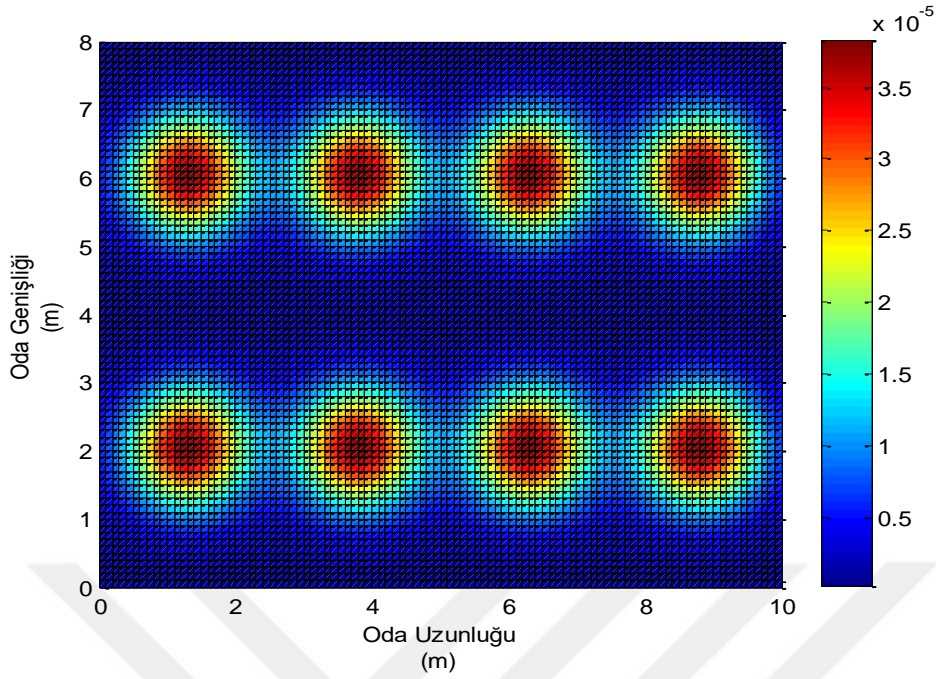
ve alıcı konumuna göre değişmektedir. Odalar kıyaslandığında aydınlatma ve kanal açısından en kötü performans Oda 7'de görülmüştür. Ancak yönlü aydınlatma ($m = 10$) kullanıldığında alıcı konumuna bağlı olarak sadece yakın LOS aldığından dolayı frekans seçiciliğin bu oda için bile azaldığı ortaya çıkmıştır. Bu da mobil bir kullanıcıların yaşadığı problem için bir çözüm olacaktır. Dar görüş açılı detektör de alternatif bir çözüm olacaktır. Ancak açı daraldıkça bazı konumlarda LOS gözlenmemektedir.

3.2.4. Sekiz vericili sistemler

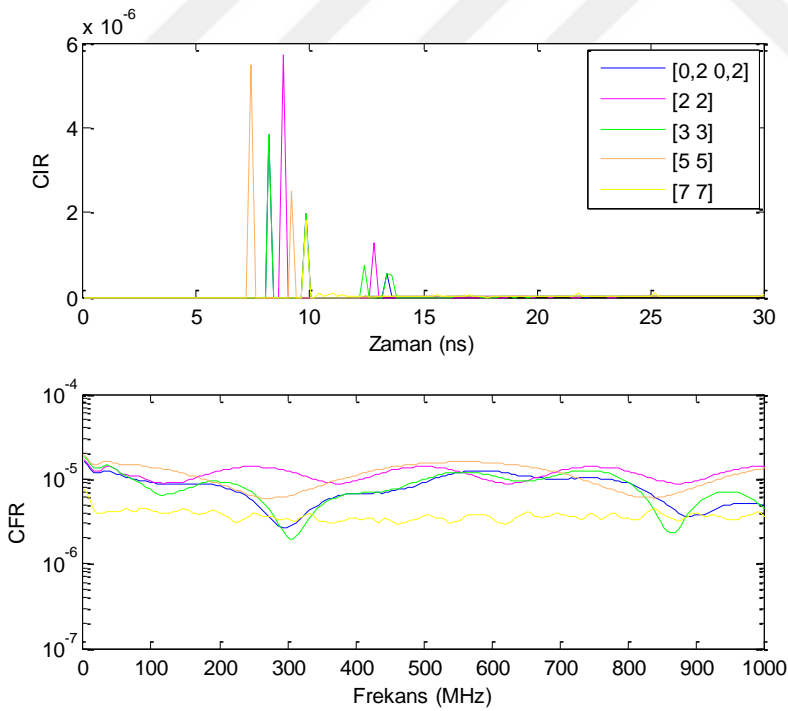
Çizelge 3.1'de gösterilen sekiz vericili farklı aydınlatma düzeneklerine sahip 80 m^2 'lik Oda 8'e ait aydınlatma grafikleri Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve CIR, CFR grafikleri Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38'de, Oda 9 aydınlatma grafikleri Şekil 3.39, Şekil 3.40 ve CIR, CFR grafikleri Şekil 3.41, Şekil 3.42, Şekil 3.43'te ve Oda 10'a aydınlatma grafikleri Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve CIR, CFR grafikleri Şekil 3.46, Şekil 3.47, Şekil 3.48'de verilmiştir.



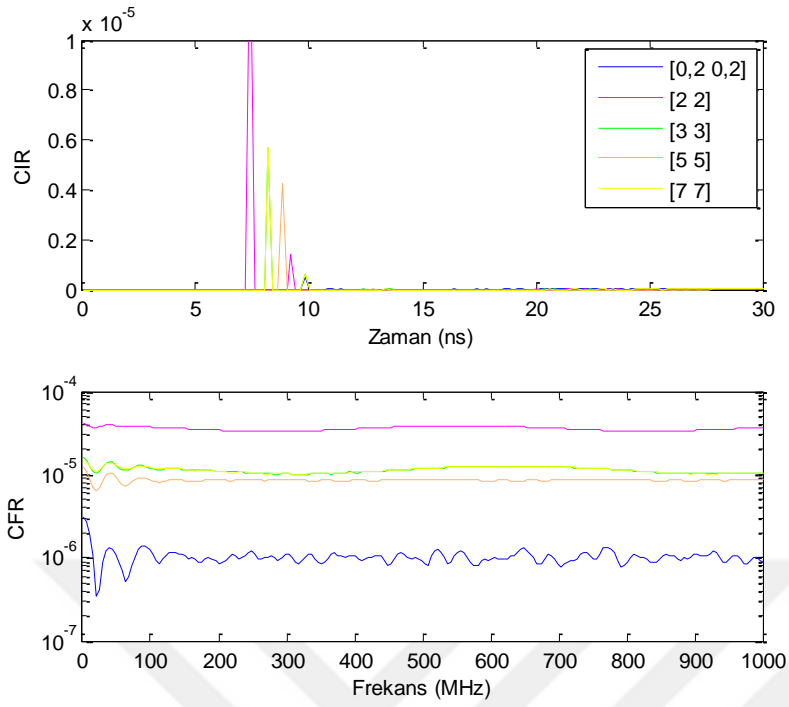
Şekil 3.34. Aydınlatma grafiği, Oda 8, $m = 1$



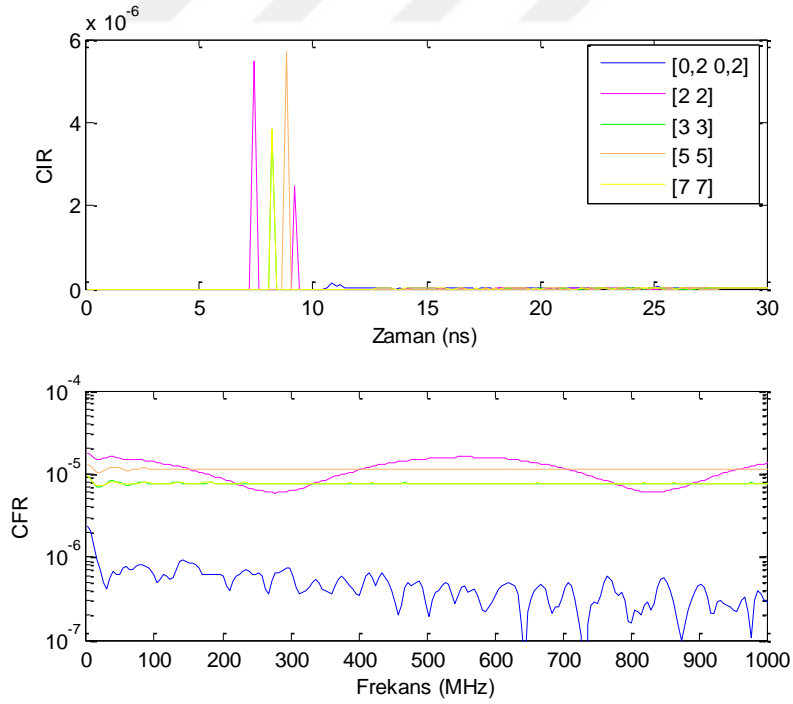
Şekil 3.35. Aydınlatma grafiği, Oda 8, $m = 10$



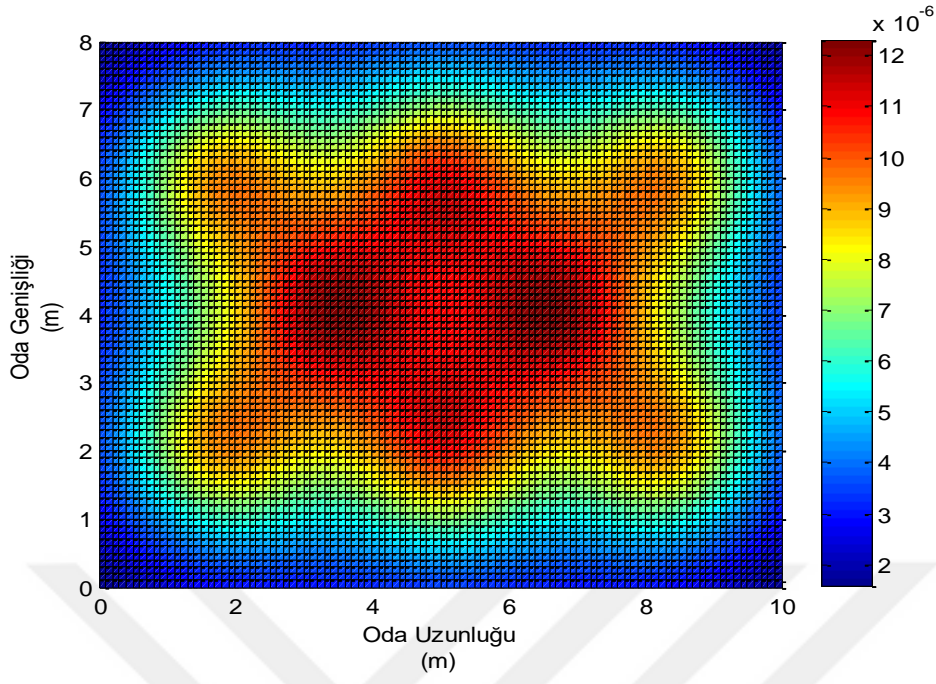
Şekil 3.36. CIR ve CFR grafikleri, Oda 8, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



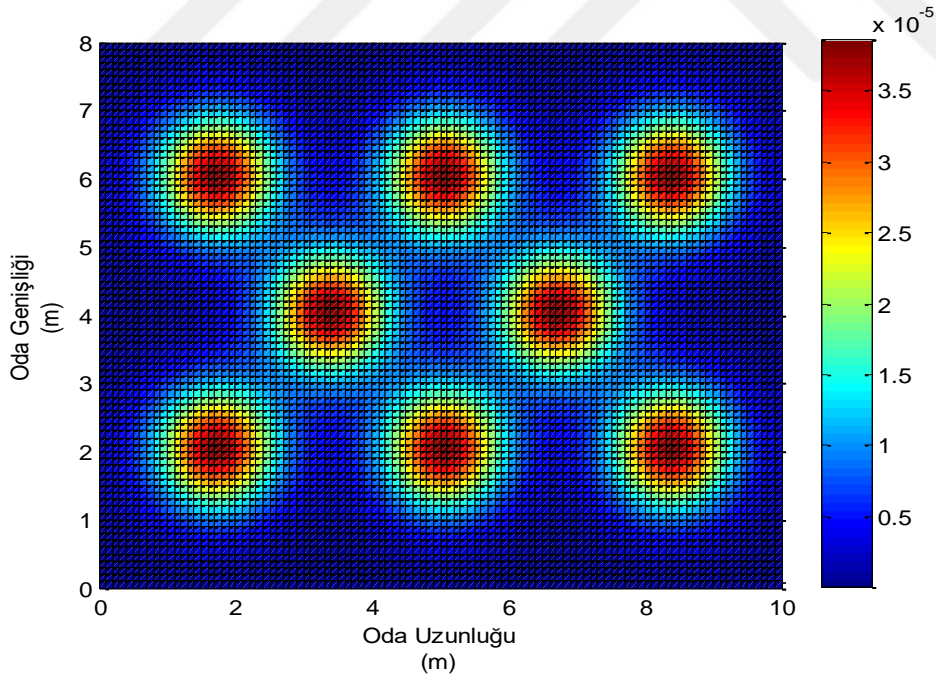
Şekil 3.37. CIR ve CFR grafikleri, Oda 8, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



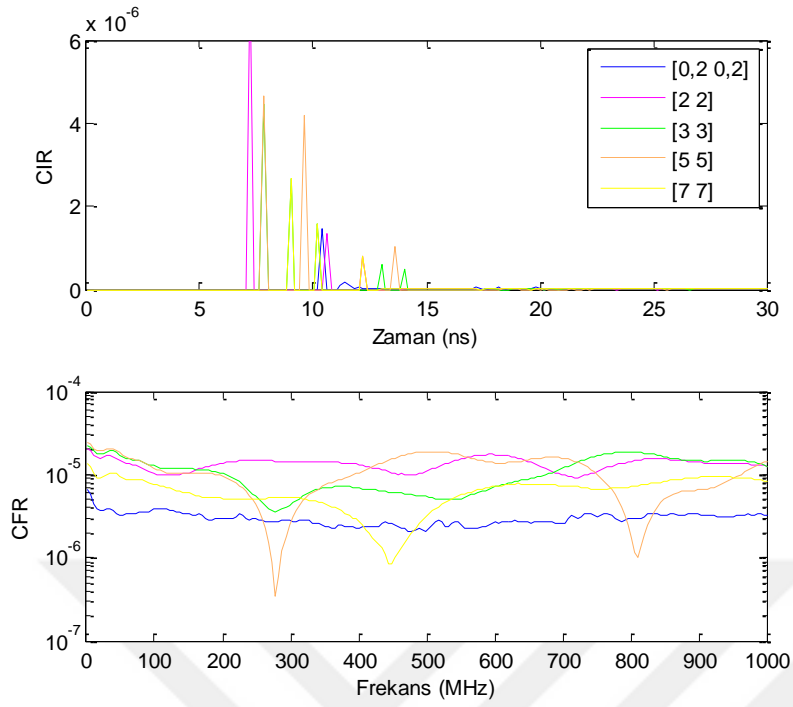
Şekil 3.38. CIR ve CFR grafikleri, Oda 8, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 40^\circ$



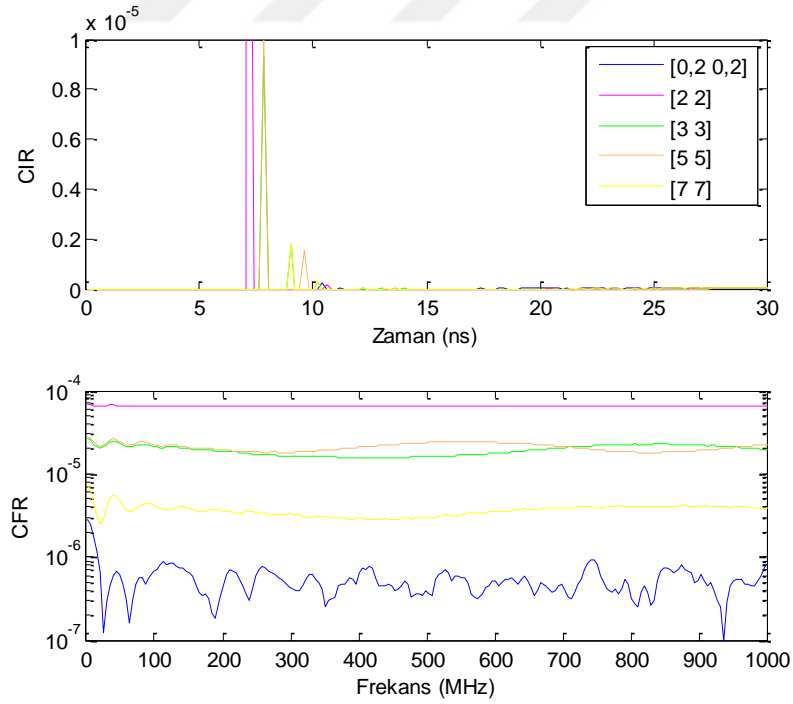
Şekil 3.39. Aydınlatma grafiği, Oda 9, $m = 1$



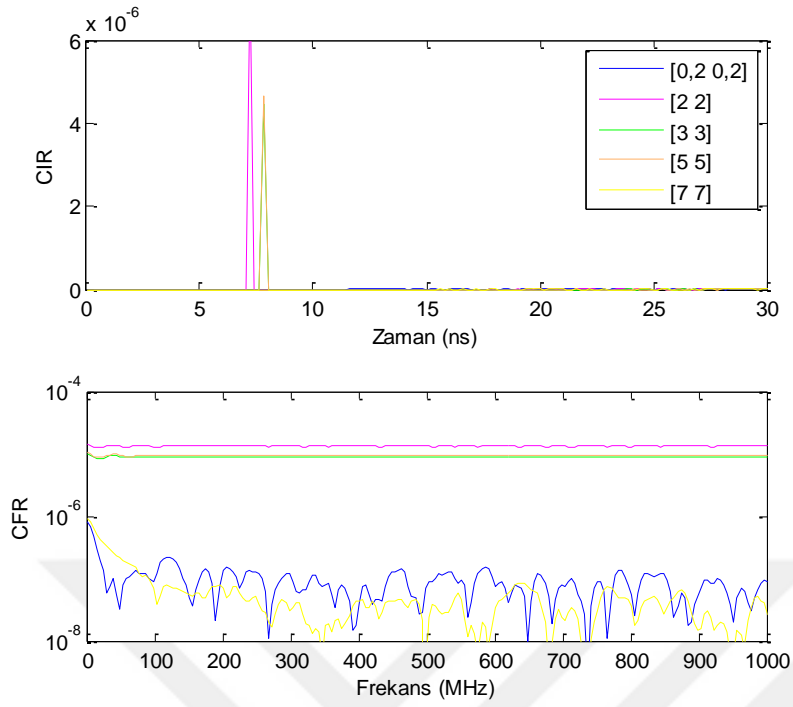
Şekil 3.40. Aydınlatma grafiği, Oda 9, $m = 10$



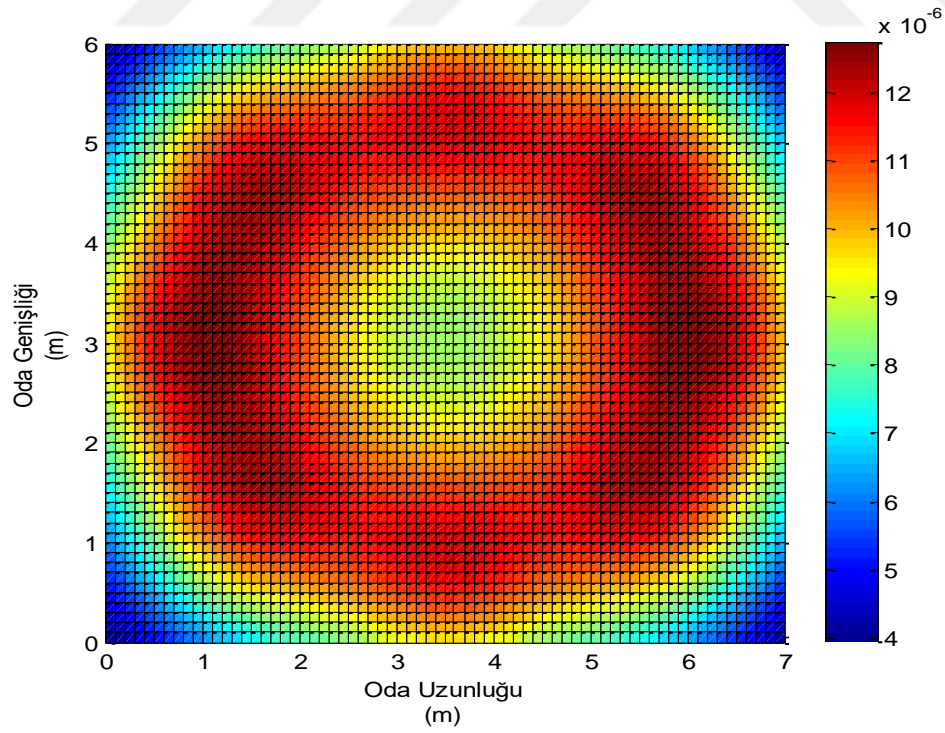
Şekil 3.41. CIR ve CFR grafikleri, Oda 9, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



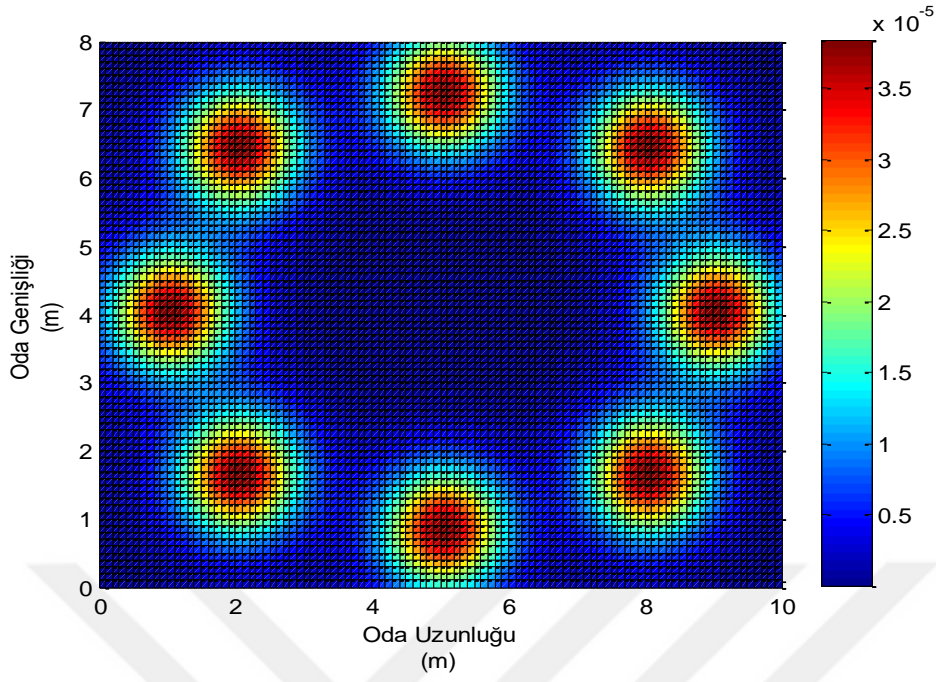
Şekil 3.42. CIR ve CFR grafikleri, Oda 9, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



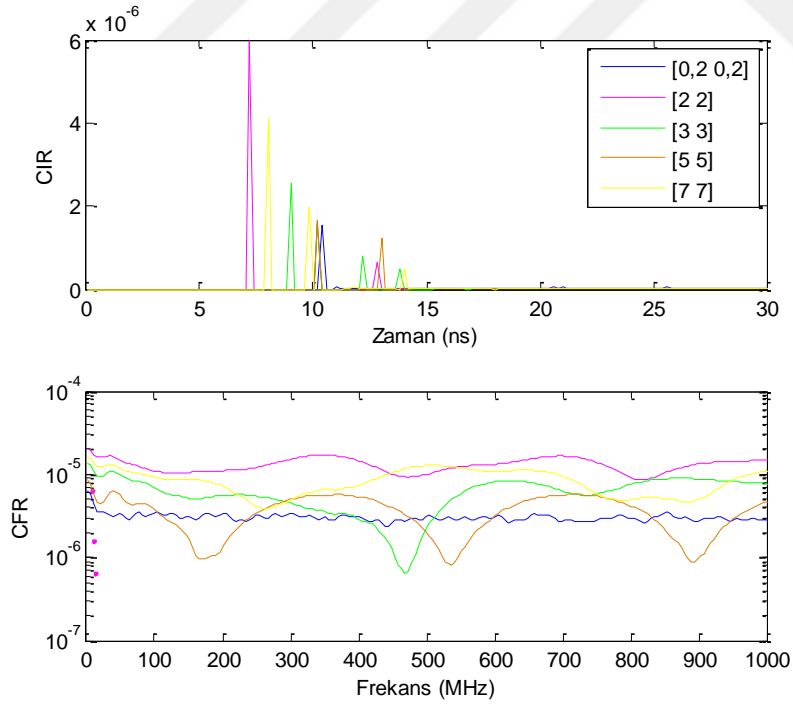
Şekil 3.43. CIR ve CFR grafikleri, Oda 9, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$



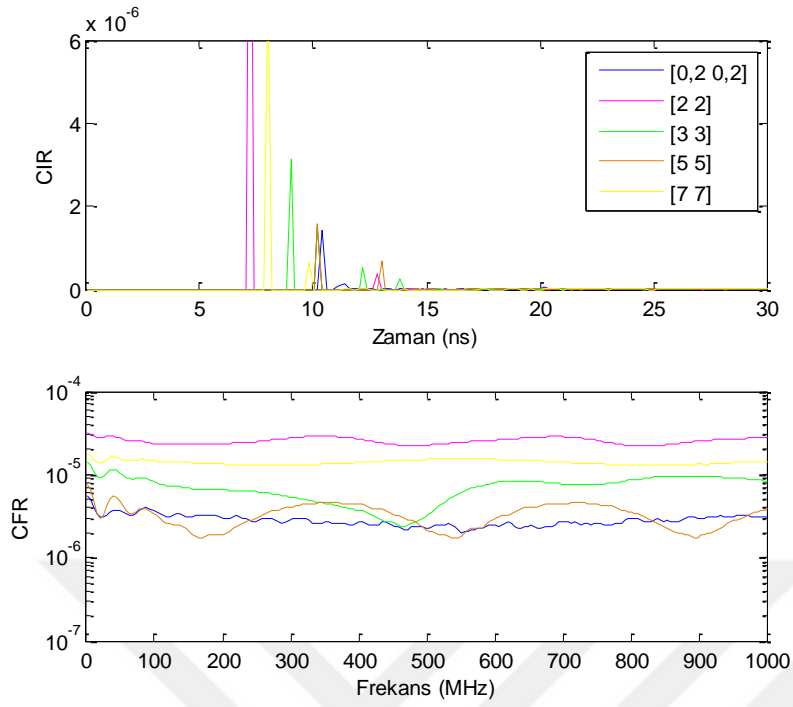
Şekil 3.44. Aydınlatma grafiği, Oda 10, $m = 1$



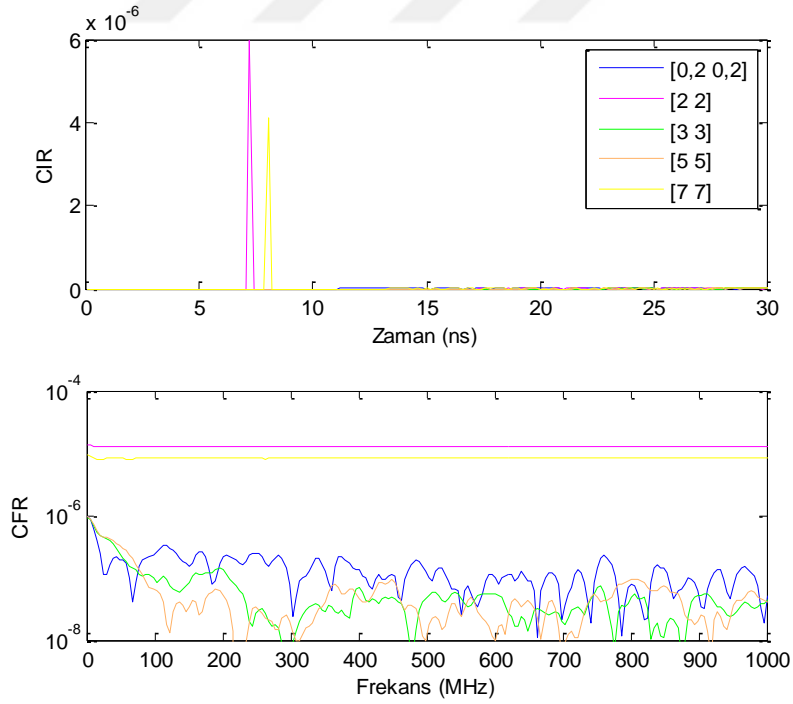
Şekil 3.45. Aydınlatma grafiği, Oda 10, $m = 10$



Şekil 3.46. CIR ve CFR grafikleri, Oda 10, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 3.47. CIR ve CFR grafikleri, Oda 10, $\gamma = 0,5$, $m = 10$, $FOV = 60^\circ$



Şekil 3.48. CIR ve CFR grafikleri, Oda 10, $\gamma = 0,5$, $m = 1$, $FOV = 30^\circ$

Oda 8, Oda 9 ve Oda 10 için τ_{rms} değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Oda 8, Oda 9 ve Oda 10 τ_{rms} değerleri

Alıcı konumu		τ_{rms} (ns)				
		(0,2; 0,2)	(2; 2)	(3; 3)	(5; 5)	(7; 7)
Oda 8	$m = 1, FOV = 60^\circ$	15,623	13,003	13,092	13,818	13,402
	$m = 1, FOV = 30^\circ$	16,467	9,496	14,193	13,179	14,005
	$m = 10, FOV = 60^\circ$	11,485	5,700	9,342	10,754	8,669
Oda 9	$m = 1, FOV = 60^\circ$	16,419	12,738	12,217	12,304	14,347
	$m = 1, FOV = 30^\circ$	16,170	8,682	11,153	11,122	14,885
	$m = 10, FOV = 60^\circ$	11,130	4,627	7,941	8,031	11,550
Oda 10	$m = 1, FOV = 60^\circ$	17,877	10,472	15,633	16,396	12,923
	$m = 1, FOV = 30^\circ$	16,900	9,204	13,927	13,553	10,224
	$m = 10, FOV = 60^\circ$	16,008	7,001	17,086	16,166	16,970

Diğer çoklu verici kanallarda olduğu gibi sekiz vericili üç farklı konfigürasyonda da çoklu kaynak önemli bir frekans seçiciliğine neden olmaktadır. Odalar kıyaslandığında en kötü performans Oda 10'da görülmüştür. Yönlü aydınlatma kullanıldığında kanalın frekans seçiciliği azalmış olsa da alıcı odanın orta bölümünde konumlandığında frekans seçicilik devam etmektedir. Oda 9 için de kanal ciddi seviyede frekans seçicidir. Yönlü aydınlatma yerine dar görüş açılı bir alıcı kullanmak da bazı alıcı konumları için çözüm olmaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

VLC teknolojisi, ışık şiddetini veya rengini insan gözünün fark edemeyeceği hızda değiştirerek ortam aydınlatması ve kablosuz bilgi iletimini birlikte yapar. Bu özelliğiyle gelecek vadeden haberleşme teknikleri arasında yerini almıştır. Bu nedenle, işlevsel ve yüksek performanslı VLC sistemleri geliştirmek için çalışmalar hızlanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle bina içi VLC sistemleri ve kanal modelleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Bina içi VLC kanalları yansımalar ve birden çok verici nedeniyle çokyollu yapıya sahiptirler. Çokyollu kanal iletişimi sınırlayan bir faktördür ve bu kanallarının özelliklerinin bilinmesi haberleşmenin sağlıklı şekilde yapılabilmesi için gereklidir. Kanalı karakterize eden CIR ve CFR fonksiyonları ve kanal özelliklerini özetleyen RMS gecikme yayılması, bant genişliği, dc kazanç, Rician katsayısı parametreleri bu bağlamda önemlidir.

Çalışma kapsamında yapılan Matlab simülasyonları ile kanal üstünde etkisi olabilecek bütün parametreler bir arada incelenerek bina içi VLC kanallarıyla ilgili bir bilgi birikimi oluşturulmuştur. Öncelikle tek vericili üç farklı boyutta odalar ele alınmış, her oda için aydınlatma grafikleri incelenmiştir. Beklenildiği üzere aydınlatmaya en yakın nokta en yüksek güçte ışığa maruz kalmaktadır. Oda boyutu büyüdükçe, kaynağa en uzak noktalarda, köşelerde, aydınlatma zayıf kalmaktadır.

Tek vericili odalarda LOS hattının yansımalara göre çok daha baskın olduğu görülmüştür. Yansıma katsayısının etkisini incelemek amacıyla en küçük oda, düşük ve yüksek yansıma katsayılı yüzeyler için incelenmiştir. Alıcı konumu köşede ve merkeze yakın olacak şekilde seçilmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda alıcı vericiye yaklaştıkça LOS'ın büyüdüğü, dolayısıyla kanal zayıflamasının azaldığı görülmüştür. Yansıma katsayısı büyüdükçe RMS gecikme yayılımının arttığı da görülmüştür. Yansıma katsayısının etkisi alıcı köşede iken, merkezde olduğu duruma göre NLOS daha baskın hale geldiğinden, daha belirgindir. Bu durumda kanalın frekans tepkisinde hareketlilik gözlemlenmiştir. Oda büyüklüğü arttıkça yansımaların etkisinin azaldığı, ancak RMS gecikme yayılımının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, kanal hala frekans seçici sayılmayacak kadar durgundur. Oda şeklinin kare veya dikdörtgen olması arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.

Tek vericili oda için Lambert mod numarası ile FOV açısının etkisi de incelenmiştir. Yönlü bir aydınlatma kullanıldığında, FOV açısı yeterince büyük seçilmediğinde, alıcı LOS hattını göremeyecek, kanal sadece yansımalarından oluşacaktır. Bu durumda CFR kazancı düşecek ve frekans seçici karakteristik gösterecektir. Bu simülasyonların sonucu değerlendirildiğinde, tek vericili odalarda LOS hattı olduğu müddetçe alıcının yer değiştirmesinin sorun teşkil etmeyeceği sonucuna varılmıştır.

Ardından çok elemanlı aydınlatma düzeneklerinin VLC kanalı üzerine etkisi ele alınmıştır. Çeşitli ortamları incelemek amacıyla farklı boyut ve farklı aydınlatma düzeneğine sahip yedi farklı odanın kanal yapısı incelenmiştir. Aydınlatma açısından bakıldığında tavana yayılmış şekilde yerleşen düzenekler ile daha homojen bir aydınlatma sağlanabilmektedir. Ancak VLC kanalı açısından bakıldığında; her bir vericiden gelen LOS ile çokyollu kanalın yapısını daha da belirginleştirmektedir. Kanallar frekans seçicidir ve bu kanallar alıcı konumuyla da tamamen değişmektedir. Bu durum özellikle mobil kullanıcılar için problem teşkil edeceği için kanal kestiriminin ve denkleştirmenin sürekli yapılmasını gerektirir. Yönlü aydınlatma kullanmak, bu frekans seçiciliği ciddi oranda hafifletmektedir. Dolayısıyla çoklu vericili VLC sistemlerinde yönlü aydınlatma kullanmak rahatlatıcı bir yöntem olabilir. Frekans seçiciliği azaltmanın bir diğer yolu, alıcının görüş açısını daraltmaktır. Herhangi bir vericiden LOS oluştuğu durumlarda kanal nerdeyse düz bir yapıya sahip olmaktadır.

Tezde çoklu verici kullanmanın kanalın frekans seçiciliğini ciddi şekilde etkilediği gösterilmiştir. Bu durum özellikle mobil alıcılar için çözülmesi gereken bir problemdir. Aydınlatma seviyesini homojen bir seviyede sağlayan, ama kanalın frekans seçiciliğini de minimize edecek aydınlatma düzeneklerinin araştırılması önerilen konular arasındadır. Ayrıca bina içi çok vericili VLC kanallarının kestirimi ve denkleştirilmesi de olası çalışma konuları arasındadır.

KAYNAKLAR

1. Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA). (2007). Visible light ID system (CP-1222).
2. Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V., ve Parthiban, R. (2015). LED based indoor Visible Light Communications: State of the art. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 17(3), 1649-1678.
3. Tanaka, Y., Nakagawa, M., Akanegawa M. (2001). Basic study on traffic information system using LED traffic lights, Intelligent Transportation Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2(4), 197-203.
4. Jovicic, A., Li, J., Richardson, T. (2013). Visible Light Communication: opportunities, challenges and the path to market. *IEEE, Communications Magazine*, 51(12), 26-32.
5. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. ve Rajbhandari, S. (2017). Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB.
6. Visible Light Communications Consortium. (2007). Visible Light Communications consortium report.
7. Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA). (2007). Visible Light Communications system (CP-1221).
8. Cossu, G., Khalid, A., Choudhury, P., Corsini, R. ve Ciaramella, E. (2012). 3.4 Gbit/s Visible Optical Wireless Transmission Based on RGB LED.
9. Bhalerao, M.V., Sumathi, M., Sonavane. S.S. (2016). Line of sight model for visible light communication using Lambertian radiation pattern of LED. *International Journal of Communication Systems*, 30(11), 1-7.
10. Rodriguez, S.P., Jimenez, R.P., Mendoza, B.R., et al. (2013). Simulation of impulse response for indoor visible light communications using 3D CAD models. *Eurosip Journal on Wireless Communications and Networking*, 7.
11. Wu, F., Chen, L., Cai, S., Wang, W. (2018). Experimental study and application of response mask invariant characteristic for generalized visible light. *IEEE Photonics Journal*, 10(3), 7903912.
12. Qiu, Y., Chen H.H., ve Meng, W.X. (2016). Channel modeling for visible light communications - a survey. *Wireless Communications and Mobile Computing*; 16, 2016 – 2034.
13. Chen, C., Basnayaka, D.A., Wu, X., Haas, H. (2018). Efficient analytical calculation of non-line-of-sight channel impulse response in Visible Light Communications. *Journal of Lightwave Technology*, 36(9), 1666 – 1682.
14. Hong, H., Ren, Y., Wang, C. (2008). Information illuminating system for healthcare institution. *The 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 801-804.

15. Li, J., Liu, A., Shen, G., Li, L., Sun, C., and Zhao, F. (2015). Retro-VLC: Enabling battery-free duplex visible light communication for mobile and IoT applications, in *ACM International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 21–26.
16. Jung, S.-Y., Hann, S., Park, C.S. (2011). TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57(4), 1592-1597.
17. Liu, X., Makino, H., Maeda, Y. (2008). Basic study on indoor location estimation using Visible Light Communication platform. *30th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*, 2377-2380.
18. Ucar, S., Ergen, S. C., Ozkasap, O., ve Ergen, M. (2016). Askeri araçlar arası güvenilir görünür ışık ile iletişim protokolü (SV2LC). Savunma Teknolojileri (SAVTEK).
19. Uysal, M., Miramirkhani, F., Narmanlioglu O. Ve ark. (2017). IEEE 802.15.7r1 reference channel models for Visible Light Communications. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), 212-217.
20. Yaqub, H., Misbah, M., Mahjabeen, R., Shaheen, R., ve Pervez, S. (2016). LiFi: The future for indoor wireless data communication. *Internatronal Journal Of Scientific and Engineering Research*, 7(10), 823–829.
21. Damnjanovic, A., Montojo, J., Wei, Y., Ji, T., Luo, T., Vajapeyam, M., Yoo, T., Song, O. ve Malladi, D. (2011). A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 18(3), 1536-1284.
22. Gfeller F.R., ve Bapst, U. (1979). Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. *Proceedings of the IEEE*, 67(11), 1474 – 1486
23. Çelik, Y. (2018). Görünür ışık haberleşmesi için yeni nesil fiziksel katman teknikleri.
24. Raham, M. (2015). Heterogeneous integration of optical wireless communications within next generation networks. Boston Üniversitesi Tezi.
25. Kamsula., P., Katz, M., Mäkelä, J.P.(2015). Design and implementation of a bidirectional visible light communication testbed.
26. Perkovic, T., Kovačević, T., Čagalj, M. (2018). BlinkComm: Initialization of IoT Devices Using Visible Light Communication.
27. Lil, X., Mardling R. ve Arms trong, J. (2007). Channel capacity of IM/DD optical communication systems and of ACO-OFDM. *IEEE Communications Society*.
28. Narmanlıoğlu, Ö. (2016). Relay-assisted ofdm-based visible light communications.
29. Barry, J.R., Kahn, J.M., Krause, W.J., Lee, E.A. ve Messerschmitt, D.G. (1993). Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels. *IEEE Journal on Selected Areas Communications.*, 11(3), 367–379.

30. Mavrakis D. ve Saunders, S.R. (2000). A novel modelling approach for wireless infrared links, *The Third International symposium on Wireless Personal Multimedia Communication*, 609–614.
31. Lopez-Hernandez, F.J., Perez-Jimenez, R. ve Santamaria, A. (1998). Monte Carlo calculation of impulse response on diffuse IR wireless indoor channels. *Electronics Letters.*, 34(12), 1260–1262.
32. Audeh, M.D., Kahn J.M. and Barry, J.R. (1996). Performance of Pulse-Position Modulation on Measured NonDirected Indoor Infrared Channels. *IEEE Transactions on Communication*, 44, 654-659.
33. Barry, J.R., Kahn, J.M., Krause, W.J., Lee, E.A. and Messerschmitt, D.G. (1993). Simulation of Multipath Impulse Response for Wireless Optical Channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 11(3), 367-379.
34. Jungnickel, V., Pohl, V., Nonnig, S. ve Helholt, C. (2002). A physical model of the wireless infrared communication channel. *IEEE Journal on Selected Areas Communications.*, 20(3), 631–640.
35. 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.
36. Chowdhury, M.I.S., Zhang, W., 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.
37. Chvojka, P., Zvanovec, S., Haigh P.A., et al., (2015). Channel characteristics of Visible Light Communications within dynamic indoor environment. *Journal of Lightwave Technology*, 33(9), 1719-1725.
38. Yamaguchi, S., Mai, V.V., Thang, T.C., and Pham, A.T.(2014). Design and performance evaluation of vlc indoor positioning system using optical orthogonal codes. In Communications and Electronics (ICCE), IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), 54–59.
39. Tan, J.J., Zou, C.Q., Du, S.H. and Tan, J.T. (2014). Simulation of MIMO channel characteristics for indoor visible light communication with LEDs
40. Al-Kinani, A., Wang, C.X., Haas, H., Yang, Y. (2016). Characterization and modeling of Visible Light Communication channels. *IEEE 83rd Vehicular Technology Conference*, 1-5.
41. Miramirkhani, F., Uysal, M. (2015). Channel modeling and characterization for Visible Light Communications. *IEEE Photonics Journal*, 7(6).
42. Muhammad, S.S. (2015). Delay profiles for indoor diffused visible light communication. *13th International Conference on Telecommunications*, 1-5.

43. Mitran, R., Stanic, M. (2016). Delay spread evaluation of HF channels based on ray tracing. *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, 1- 5.
44. Barry, J.R., Kahn, J.M., Krause, W.J., Lee, E.A. ve Messerschmitt, D.G. (1993). Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels. *Journal on Selected Areas in Communications.*, 11(3), 367–379.
45. Lopez-Hernandez, F. J. ve Betancor, M. J. (1997). DUSTIN: Algorithm for calculation of impulse response on IR wireless indoor channels. *Electronics Letters.*, 33(21), 1804–1806
46. Lopez-Hernandez, F.J., Perez-Jimenez, R. and Santamaria, A. (1998). Monte Carlo calculation of impulse response on diffuse IR wireless indoor channels. *Electronics Letters.*, 34(12), 1260–1262.
47. De-qiang, D., Ke, X. (2010). A new indoor VLC channel model based on reflection. *Optoelectronics Letters*, 6(4), 295–298.
48. Dong, Z., Shang, T., Gao, Y., et al. (2017). Study on VLC channel modeling under random shadowing. *IEEE Photonics Journal*, 9(6), 7908416.
49. Sewaiwar, A., Tiwari, S.V. and Chung, Y.H. (2015). Smart LED allocation scheme for efficient multiuser visible light communication networks. *Optics Express*, 23 (10).
50. Praneeth Varma, G. V. S. S., Sushma, R., Sharma, V., Kumar, A. and Sharma, G. V. V. (2017). Power allocation for uniform illumination with stochastic LED arrays. *Optics Express*, 25 (8).
51. Yesilkaya, A., Miramirkhani, F., Basar, E., Panayirci, E. and Uysal, M. (2016). Performance of MIMO Enhanced Unipolar OFDM with Realistic Indoor Visible Light Channel Models. *Workshop on Optical Wireless Communications*.
52. Ho, S.W., Saed, A., A., Lai, L. and Sung. C., W. (2018). Coding and Bounds for Channel Estimation in Visible Light Communications and Positioning. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36 (1).
53. Ding, J., Chih-Lin., I, Xu, Z. (2016). Indoor Optical Wireless Channel Characteristics With Distinct Source Radiation Patterns. *IEEE Photonics Journal*, 8 (1).
54. Long, S., Khalighi, M., A., Wolf, M., Bourennane, S. and Ghassemlooy, Z. (2016). Investigating Channel Frequency Selectivity In Indoor Visible Light Communication Systems. *IET Optoelectron*, 10 (3), 80-88
55. Hussain, W. (2015). Standard-Compliant And Software Defined Vlc System: Implementation And Performance Evaluation. *Özyeğin Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KİMYACI, Merve
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.05.1992 Hatay
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : -
 e-mail : merve.kimyaci.mfbe16@iste.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi/Elektrik Elektronik Mühendisliği	2019
Lisans	Erciyes Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2016
Lise	Hatay Osman Ötken Anadolu Lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Antakya Belediyesi	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Kimyacı, M., Çürük, S.M. (2018). Bina içi görünür ışık haberleşmesinde ortamların kanal karakteristiği üzerine etkisi. *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, EurasianSciEnTech*, 1409-1417

Çürük, S.M., Kimyacı, M. (2019) (kabul edildi). The Impact of Configuration on Channel Characteristics in Visible Light Communication, *IEEE Global Power, Energy And Communitacion Conference*.

Hobiler

Yüzme, Yürüyüş

DİZİN

A

Abstract · v
 Alıntılar · 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10,
 11, 12, 13, 14, 16, 19, 20, 21,
 22, 23, 28
 Alt Bölümler · 7,9, 10, 14, 20, 21,
 22, 24, 26, 36, 39, 48

B

başlık · 1, 6, 7, 9, 10, 11, 14, 20,
 21, 22, 24, 26, 36, 39, 48, 57
 bölüm · 1, 6, 24, 55

Ç

çizelge · 25, 39, 45, 56

D

Dizin · 64

E

Eşitlik · 10, 14, 15, 16, 17, 18,
 19, 20, 21, 22, 23
 Etik · 3

F

formül · 10, 14, 15, 16, 17, 18,
 19, 20, 21, 22, 23

G

Giriş · 1, 6, 7, 11, 14, 24, 26, 55

K

Kaynak · 50, 51, 52, 53
 Key Words · v

Ö

Özet · iv, v
 Özgeçmiş · 54

S

sembol · vii, viii

simge · viii, viv
 Simgeler ve Kısaltmalar · vii, viii
 Sonuç ve öneriler · 57

Ş

şekil · 6, 7, 10, 11, 15, 17, 18, 19,
 27, 29, 30, 31,32, 33, 34,35,
 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43,
 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51,
 52, 53, 54, 55

T

Teşekkür · vi

Y

yazar · 50, 51, 52, 53



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

