

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans programı kapsamında hazırlanan bu tezde, kapalı mekân çok renkli görünür ışık haberleşmesi için fiziksel katman güvenliğini sağlamak amacıyla yapay gürültü ve boş yönlendirme teknikleri kullanılmış ve gizlilik oranı sonuçları sunulmuştur.

Öncelikle sunulan tez çalışmasında benden desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Kadir TÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca lisansüstü çalışmalarım boyunca bilgilerini benimle paylaşarak çalışmalarına destek olan Dr. Öğr. Üyesi Cenk ALBAYRAK'a teşekkür ederim.

Lisans tez çalışmamda danışmanlığımı üstlenen ve akademik kariyer yapmam konusunda bana ilham olan, kendime örnek aldığım sayın hocam Doç. Dr. Cumhur BAŞARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Başta Arş. Gör. Reyhan SAĞ, Öğr. Gör. Oğuzhan BAŞER ve Arş. Gör. Mehmet Ali KÜÇÜK olmak üzere çalışmalarına verdikleri katkıları ve çalışmam boyunca beni cesaretlendirmeleriyle yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Başarılı olacağıma olan inançlarını asla yitirmeyen, her zaman bana destek olan ve bana güç veren annem Selma ve babam Nihat ÇETİNDERE'ye teşekkür ederim. Hayallerinin peşini bırakmamasıyla kendime örnek aldığım canım kardeşim Eyüp Hakan ÇETİNDERE'ye ve başarılarıyla kendime örnek aldığım ablam Betül KAYITMAZBATIR ve eşi Metin KAYITMAZBATIR'a teşekkür ederim. Son olarak beni motive eden ve hep yanımda olan nişanlım Arş. Gör. Serkan VELA'ya teşekkür ederim.

Besra ÇETİNDERE
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kapalı Mekan Çok Renkli Görünür Işık Haberleşmesi İçin Fiziksel Katman Güvenliği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Kadir TÜRK‘ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/06/2023

Besra ÇETİNDERE

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çok Renkli Görünür Işık Haberleşmesi	5
1.3. Kanal Modeli	6
1.4. RGB LED’ler ile Ortam Aydınlatma Renginin Belirlenmesi	8
1.5. Güç Spektral Yoğunluğu	11
1.6. Fiziksel Katman Güvenliği.....	13
1.6.1. VLC’de PLS Teknikleri	13
1.6.1.1. AN Tekniği.....	13
1.6.1.2. NS Tekniği.....	17
1.6.2. Gizlilik Kapasitesi ve Gizlilik Oranı	18
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	20
2.1. SISO VLC	20
2.1.1. Tek Renkli SISO VLC.....	20
2.1.2. Çok Renkli SISO VLC	22
2.2. MISO VLC	25
2.2.1. Sistem Modeli.....	25
2.2.2. Tek Renkli MISO VLC	27
2.2.3. Çok Renkli MISO VLC.....	28
2.2.3.1. MISO VLC’de AN Tekniği.....	32
2.2.3.2. MISO VLC’de NS Tekniği	37

3.	TARTIşMA, SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	42
4.	KAYNAKLAR.....	44
ÖZGEÇMİş		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KAPALI MEKAN ÇOK RENKLİ GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ İÇİN FİZİKSEL KATMAN GÜVENLİĞİ

Besra ÇETİNDERE

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Kadir TÜRK
2023, 61 Sayfa

Görünür ışık haberleşmesinde (VLC), genellikle bir aydınlatma kaynağının verici olarak kullanılarak ışık yoğunluğunun modülasyonu ile veri iletimi gerçekleştirilir. Çok renkli VLC ise birden fazla renk kanalını paralel kullanarak yüksek hızlarda veri iletimine olanak sağlar. VLC sistemlerinin ışığın saydam olmayan yüzeylerden geçememesi sebebiyle kapalı mekanlarda güvenlik sağladığı düşünülebilir, ancak halka açık ortamlarda gizli dinleyici bulunması nedeniyle veri güvenliğinin sağlanması gerekir. Veri güvenliği, fiziksel katman güvenliği (PLS) teknikleri ile sağlanabilmektedir. PLS, güvenliği sağlamak için haberleşmenin gerçekleştiği ortamın özelliklerinden yararlanarak sistemlerin fiziksel katmanında önlemler alır. Bu tez çalışmasında, tek verici tek alıcılı ve çok verici tek alıcılı VLC sistemler ele alınmıştır. Tek renkli ve çok renkli ışık yayan diyotlar verici olarak kullanılmıştır. PLS tekniklerinden olan boş yönlendirme ve yapay gürültü teknikleri VLC sistemlerine uygulanmıştır. Renk kanalları arası girişim etkisi hesaplanmış ve elde edilen gizlilik oranı sonuçları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çok renkli görünür ışık haberleşmesi, fiziksel katman güvenliği, boş yönlendirme, yapay gürültü, kanallar arası girişim

Master Thesis

SUMMARY

PHYSICAL LAYER SECURITY FOR INDOOR MULTICOLOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Besra ÇETİNDERE

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Kadir TÜRK
2023, 61 Pages

In visible light communication (VLC), data is transmitted by modulating the light intensity, usually by using a lighting source as a transmitter. Multi-color VLC, on the other hand, enables data transmission at high speeds by using multiple color channels in parallel. It can be thought that VLC systems provide security indoors because light cannot pass through non-transparent surfaces, but data security must be ensured due to the presence of eavesdroppers in public environments. Data security can be achieved with physical layer security (PLS) techniques. PLS takes measures at the physical layer of the systems by taking advantage of the characteristics of the environment where the communication takes place to ensure security. In this thesis, VLC systems with single input single output and multiple input single output are discussed. Monochrome and multi-colored light emitting diodes (LEDs) are used as transmitters. Null steering and artificial noise techniques, which are PLS techniques, have been applied to VLC systems. The inter-channel interference effect is calculated and the obtained secrecy rate results are presented.

Keywords: Multicolor visible light communication, physical layer security, null steering, artificial noise, inter channel interference

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Görünür ışığın elektromanyetik spektrumdaki yeri.....	5
Şekil 2. VLC sistemde verici ile alıcı arasındaki kanal.....	6
Şekil 3. XLamp XM-L RGB LED'in bağıl ışık akısı – ileri akım grafiği [47]	9
Şekil 4. XLamp XM-L RGB LED'in – grafiği [47]	10
Şekil 5. RGB LED'in farklı dalga boylarındaki ışın yayma miktarları.....	11
Şekil 6. Tek renkli MISO VLC'de AN tekniği	14
Şekil 7. Gram-Schmidt yönteminde dik vektör elde edilmesi.....	15
Şekil 8. Tek renkli MISO VLC'de NS tekniği	17
Şekil 9. Gizli dinleyicili VLC sistemin kanal modeli.....	19
Şekil 10. SISO VLC model oda gösterimi	21
Şekil 11. SISO VLC'de kanal kazançlarının model odada dağılımı	22
Şekil 12. RGB LED'li SISO VLC'de ICI olmadığında kanalların gösterimi	23
Şekil 13. RGB LED'li SISO VLC'de ICI olduğunda kanalların gösterimi	24
Şekil 14. Tek renk LED'li MISO VLC	27
Şekil 15. MISO VLC'de ICI olmadığında SNR'nin oda genelinde dağılımı (4000K)	29
Şekil 16. MISO VLC'de ICI olmadığında SNR'nin oda genelinde dağılımı (6000K)	30
Şekil 17. MISO VLC'de ICI olduğunda SINR'nin oda genelinde dağılımı (4000K)	31
Şekil 18. MISO VLC'de ICI olduğunda SINR'nin oda genelinde dağılımı (6000K)	32
Şekil 19. Çok renkli MISO VLC'de AN tekniği için ICI yokken gizlilik oranı sonuçları..	34
Şekil 20. MISO VLC'de ICI varken AN tekniği gizlilik oranı sonuçları	36
Şekil 21. Çok renkli MISO VLC'de ICI yokken NS tekniği gizlilik oranı sonuçları	38
Şekil 22. Çok renkli MISO VLC'de ICI varken NS tekniği gizlilik oranı sonuçları	39
Şekil 23. Tüm gizlilik oranı sonuçları	40

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. 4000K renk sıcaklığında ortam aydınlatması için hesaplanan değerler.....	10
Tablo 2. 6000K renk sıcaklığında ortam aydınlatması için hesaplanan değerler.....	11
Tablo 3. [49]'daki LED'in PSD parametreleri	12
Tablo 4. SISO VLC için simülasyon parametreleri.....	21
Tablo 5. MISO VLC için simülasyon parametreleri	26
Tablo 6. Farklı renk sıcaklıkları ve ICI durumunda gönderilen güç değerleri	26
Tablo 7. Armatür konumları.....	27
Tablo 8. MISO VLC'de ICI olmadığında hesaplanan SNR'ler (4000K).....	29
Tablo 9. MISO VLC'de ICI olmadığında hesaplanan SNR'ler (6000K).....	30
Tablo 10. MISO VLC'de ICI olduğunda hesaplanan SINR'ler (4000K).....	31
Tablo 11. MISO VLC'de hesaplanan SNR değerleri (6000K)	32
Tablo 12. Çok renkli MISO VLC'de AN tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olmadığında hesaplanan gizlilik oranı sonuçları.....	34
Tablo 13. MISO VLC'de AN tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olduğunda hesaplanan gizlilik oranları.....	36
Tablo 14. Çok renkli MISO VLC'de NS tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olmadığında hesaplanan gizlilik oranları	38
Tablo 15. Çok renkli MISO VLC'de NS tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olduğunda hesaplanan gizlilik oranları	40

SEMBOLLER DİZİNİ

<i>AN</i>	:	Artificial Noise (Yapay Gürültü)
<i>AWGN</i>	:	Additive White Gaussian Noise
<i>CSI</i>	:	Channel State Information (Kanal Durum Bilgisi)
<i>DC</i>	:	Direct Current (Doğru Akım)
<i>FOV</i>	:	Field of View (Görüş Açısı)
<i>GSSK</i>	:	Generalized Space Shift Keying
<i>ICI</i>	:	Inter Channel Interference (Kanallar Arası Girişim)
<i>IRS</i>	:	Intelligent Reflecting Surface (Akıllı Yansıtıcı Yüzey)
<i>LED</i>	:	Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
<i>LOS</i>	:	Line of Sight (Direkt Görüş)
<i>MISO</i>	:	Multiple Input Single Output (Çok Girdili Tek Çıktılı)
<i>NLOS</i>	:	Non Line of Sight (Direkt Olmayan Görüş)
<i>NOMA</i>	:	Non Orthogonal Multiple Access
<i>NS</i>	:	Null Steering (Boş Yönlendirme)
<i>PD</i>	:	Photo Diode (Fotodiyot)
<i>PLS</i>	:	Physical Layer Security (Fiziksel Katman Güvenliği)
<i>PSD</i>	:	Power Spectral Density (Güç Spektral Dağılımı)
<i>PSO</i>	:	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
<i>RGB</i>	:	Red Green Blue (Kırmızı Yeşil Mavi)
<i>RF</i>	:	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
<i>SCZ</i>	:	Secured Communication Zone
<i>SISO</i>	:	Single Input Single Output (Tek Girdi Tek Çıktılı)
<i>SINR</i>	:	Signal and Interference to Noise Ratio
<i>SNR</i>	:	Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
<i>TG</i>	:	Truncated Gaussian
<i>VLC</i>	:	Visible Light Communication (Görünür Işık Haberleşmesi)
I_f	:	İleri akım
V_f	:	İleri gerilim
λ	:	Dalga boyu
P	:	Güç

S	:	LED'in PSD'si
λ_p	:	PSD'nin tepe dalga boyu
$\Delta\lambda$	:	LED'in PSD'sinin yarı spektral genişliği
k	:	PSD karakteristik parametresi
$\mathbf{P}_{ICI}$	:	ICI varken LED güçlerinin matrisi
R_s	:	Gizlilik oranı
$\mathbb{I}$	:	Ortak bilgi
p	:	Sinyalin olasılık dağılımı
d	:	Bilgi sinyali
h_B	:	Bob'un kanal kazancı
h_E	:	Eve'in kanal kazancı
σ^2	:	Gürültü varyansı
y	:	Alınan sinyal
y_B	:	Bob'da alınan sinyal
y_E	:	Eve'de alınan sinyal
n_B	:	Bob'un kanalının gürültüsü
n_E	:	Eve'in kanalının gürültüsü
SNR_B	:	Bob'un SNR'ı
SNR_E	:	Eve'in SNR'ı
$SINR_B$	:	Bob'un SINR'ı
$SINR_E$	:	Eve'in SINR'ı
x	:	Vericiden çıkan sinyal
β	:	Modülasyon indeksi
P_t	:	DC öngerilim
h	:	Kanal kazancı
$\mathbf{w}$	:	Hüzmeleme vektörü
$\mathbf{\Psi}_B$	:	Bob'un kanalının ortonormal matrisi
$\mathbf{\Psi}_E$	:	Eve'in kanalının ortonormal matrisi
γ	:	Güç ölçekleme katsayısı
γ_N	:	Gürültü sinyalinin güç ölçekleme katsayısı
t	:	Normalizasyon katsayısı
N_a	:	Armatür sayısı

J : Bozucu sinyal
 z : Gürültü sinyali



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Veri haberleşmesi gerçekleştiren cihazların sayısı her geçen gün artmaktadır. Geleneksel radyo frekansı (Radio Frequency, RF) bandının giderek kalabalıklaşması yüksek hızda haberleşmeyi zorlaştırmaktadır [1, 2, 3]. Görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC), kapalı mekanlarda aydınlatma elemanlarının yüksek hızlarda anahtarlanması ile veri iletimi gerçekleştiren, kısa mesafeli bir optik haberleşme şekli olarak ortaya çıkmıştır. VLC sistemler, RF bandından farklı olarak geniş bir lisanssız bant sunmaktadır. Işık yayan diyotlar (Light Emittin Diode, LED) veya lazer gibi VLC’de kullanılan vericiler, yüksek hızlarda anahtarlanabilmektedir. Bu da yüksek hızlı haberleşmeye olanak sağlamaktadır. VLC sistemlerde verici olarak tek renkli fosfor tabakalı LED kullanılabileceği gibi üç renkli kırmızı-yeşil-mavi (Red-reen-Blue, RGB) LED veya dört renkli LED (Quadrature LED, QLED) de kullanılabilmektedir. Çok renkli LED’ler fosfor tabakalı LED’lere göre daha yüksek hızlarda anahtarlanabilmektedir. Daha yüksek hızlarda anahtarlama yapılabilmesi daha yüksek hızlarda haberleşmeye olanak sağlamaktadır. Ayrıca çok renkli LED’lerin kullanılmasıyla farklı renk kanallarından paralel veri iletimi de mümkündür. Vericide kullanılan renk sayısı kadar alıcıda fotodedektörler (Photodetector, PD) bulunmalıdır. Alıcıdaki her PD’nin önünde o renk bandını geçiren bir optik filtre yerleştirilerek renk kanalları birbirinden ayrılabilir. Verici olarak LED’ler kullanıldığında aynı zamanda aydınlatma da gerçekleştirildiğinden enerji verimliliği anlamında avantaj sağlanmaktadır. Alıcı olarak ise ışık şiddetindeki değişimleri hızlı bir şekilde algılayabilen foto-diyotlar gibi yüksek hızlı PD’ler kullanılmaktadır. Bu sayede, yüksek hızlı haberleşmeye olanak sağlanmaktadır. Bu elemanların VLC sistemlerde kullanılması, düşük maliyet, yüksek veri hızı gibi avantajlar sağlar [4, 5]. VLC, RF bandında girişim oluşturmamakta ve elektromanyetik kirliliğe sebep olmamaktadır. Bazı durumlarda, en iyi performansı elde etmek için her iki teknolojiyi de birleştirmek gerekebilmektedir [6].

Kapalı mekân VLC sistemlerde ışığın duvarlardan geçememesi haberleşme açısından bir dezavantaj gibi görülse de veri güvenliği açısından bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, bunun kapalı mekân ile dış mekân arasında haberleşme güvenliği sağladığı düşünülse dahi, kapalı mekânda gizli bir dinleyici bulunması durumunda güvenlik sağlamayacaktır [7].

VLC’de haberleşme güvenliğini tehlikeye atabilecek diğer etmenler, vericiden gelen sinyalin başka bir ışık kaynağı kullanılarak bozulması ve bir verici gibi davranarak sahte veri gönderilmesidir [8]. Haberleşme güvenliğini tehdit eden bu durumlar, kapalı mekânın dışından; örneğin kapının anahtar deliğinden veya kapı aralığındaki küçük boşluklardan sağlanabilmekte ve ortamda kullanılan eşyalardan yansıma ile ortamın dışına bilgi sinyalinin sızması mümkün olmaktadır [9]. VLC’de güvenliği tehdit eden gizli dinleme ve sinyal bozmanın önüne geçilebilmesi için haberleşmenin fiziksel katmanında önlemler alınması gerekmektedir [10].

5G kablosuz ağlar dahil kablosuz haberleşme sistemlerindeki güvenlik, fiziksel katman güvenliği (Physical Layer Security, PLS) teknikleri uygulanarak artırılabilir [11, 12]. PLS teknikleri, mevcut kriptografi temelli yöntemler kullanılarak RF’de uygulanmıştır [13]. Kablosuz haberleşme sistemlerinde tercih edilen PLS teknikleri [14]’te özetlenmektedir. RF sistemlerini VLC sistemlerinden ayıran bazı temel özellikler bulunmaktadır. RF sistemlerinde elektromanyetik dalgalar kullanılırken, VLC sistemlerinde görünür ışık kullanılır. Bu nedenle, bu iki sistemde kanallar ve iletilen sinyaller birbirinden farklıdır. VLC sistemlerinde, RF sistemlerden farklı olarak VLC kanallarında sönmeme (fading) olmamaktadır. VLC’de taşıyıcı modülasyonu bulunmamakta, bunun yerine yoğunluk modülasyonu/doğrudan sezim (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) yöntemi kullanılmaktadır [15]. Bu nedenle VLC’de kanallar ve iletilen optik sinyaller RF’ten farklı olarak gerçek ve pozitif değerlidir. VLC sistemlerinde verici olarak kullanılan LED’lerin sınırlı dinamik çalışma aralığı nedeniyle, limitsiz güce sahip giriş sinyalleri kanal girişine uygulanamamaktadır. Dolayısıyla, bir tepe güç kısıtlaması, yani bir genlik kısıtlaması mevcuttur. Kanalların ve iletilen sinyallerin doğasındaki farklılıklar ve genlik kısıtlamasından dolayı, RF iletişimi için geliştirilen PLS tekniklerinin doğrudan VLC sistemlerine uygulanamamaktadır [16].

Daha önce RF sistemleri için önerilen tekniklerden olan boş yönlendirme (Null Steering, NS) ve yapay gürültü (Artificial Noise, AN) teknikleri kapalı mekân VLC sistemleri için uyarlaması literatürde ilk defa [17]’de önerilmiştir. NS tekniğinde gizli dinleyicinin kanal durum bilgisi (Channel State Information, CSI) ile oluşturulan ortonormal matrisi kullanarak gizli dinleyicide bilginin alınmaması amaçlanmakta iken, AN tekniğinde alıcının CSI’si ile oluşturulan ortonormal matrisi kullanarak gizli dinleyiciye gürültülü bir sinyalin ulaşması hedeflenmektedir. AN tekniğinde bozucu sinyal bilgi mesajı ile birlikte gönderilebileceği gibi, vericiden ayrı bir kaynaktan da gönderilebilmektedir [18].

VLC’de güvenli haberleşme bölgesi (Secure Communication Zone, SCZ) oluşturulması da PLS tekniği olarak sunulmuştur [19, 20, 21, 22]. [19]’da, bilgi sinyali vericiden bir karıştırma matrisi ile çarpılarak gönderilmektedir. Vericideki ışık kaynaklarının konum ve açısı değiştirebildiği varsayılmaktadır. Alıcıda ise bu matris tersiyle çarpılarak bu karıştırılmış sinyalden kurtulmakta ve güvenli bölgenin dışında gizli dinleyicinin karıştırılmış bir sinyal alması hedeflenmektedir. [20]’de, tavanı kaplayan bir LED dizisi verici olarak kullanılmakta ve alıcının çevresinde bir güvensiz bölge tanımlanmaktadır. Alıcının CSI’sı kullanılarak oluşturulan hüzmleme (beamformer) vektörleri yardımıyla farklı boyutlarda SCZ’ler oluşturulmaktadır. [21]’de ise, vericide LED güçleri ve LED’lerin hüzmleme açıları yardımıyla SCZ oluşturulmakta ve LED’lerin yarısından bilgi sinyali diğer yarısından ise bozucu sinyaller gönderilmektedir. Bu şekilde gizli dinleyici aynı miktarda aydınlatma seviyesine ulaşmakta, ancak haberleşme için yeterli sinyal gürültü oranına (Signal to Noise Ratio, SNR) ulaşamamaktadır. [22]’de VLC sistemde SCZ oluşturulması için hareketli kullanıcılar durumu ele alınmaktadır.

VLC’de önerilen bir başka yöntemde, kanallar arası girişimi (Inter Channel Interference, ICI) ve güç tüketimini azaltan bir modülasyon çeşidi olan genelleştirilmiş uzamsal kaydırmalı anahtarlama (Generalized Space Shift Keying, GSSK) kullanılarak vericiden gönderilen sinyaller alıcıda demodülasyon ile alınmaktadır [23, 24]. Dikgen olmayan çoklu erişim (Non Orthogonal Multiple Access, NOMA) sistemler için önerilen bir yöntemde vericinin önüne bir röle yerleştirilerek gizli dinleyiciye bozucu sinyal gönderimi sağlanmaktadır [23]. PLS tekniği olarak önerilen eşleme (mapping) tekniğinde benzer olarak vericiden kodlanarak gönderilen bilgi sinyali, alıcıda kod çözücü yardımıyla alınmaktadır [25]. Bu teknik kullanılarak yapılan başka bir çalışmada [26], vericiden gönderilecek sinyali karıştırmak için bir rastgele matris oluşturulmakta ve alıcıda bu sinyal ayrıştırılıp demodüle edilerek alınmaktadır. Kodlama ve kod çözme işlemleri için sistem tarafından zamanla değişen bir kaotik dizi tanımlanmakta ve verici ile alıcı aynı kaotik diziyi paylaşmaktadır.

Optimizasyon algoritmaları kullanılarak gizlilik kapasitesinin artırılmasının amaçlandığı çalışmalar literatürde mevcuttur [27, 28, 29, 30, 31, 32]. [27]’de, vericiden gönderilen sinyal bir hüzmleme vektörü ile çarpılarak gönderilmekte ve gizlilik kapasitesi ifadesinde bu vektör bilinmeyen olarak tanımlanarak bu ifadeyi maksimum yapan iki farklı vektöre ulaşılmaktadır. [28] ve [29]’de ise birden fazla gizli dinleyici tanımlanarak, bu gizli dinleyicilere bir bozucu sinyal gönderilmesi için [27]’deki gibi bir hüzmleme vektörü tanımlanmaktadır. [30]’da gizli dinleyicinin CSI’sının vericide var olduğu ve olmadığı

durumlar için farklı hüzmleme vektörü tanımlanmakta ve bu vektörler optimizasyon probleminin bilinmeyen olarak tanımlanmaktadır. [31] ve [32]'de optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapılan çalışmalar arasında öncekilerden farklı olarak kanal hesaplamalarında direkt görüş (Line of Sight, LOS) ve direkt olmayan görüş (Non Line of Sight, NLOS) bileşenleri de kanal hesaplamalarına dahil edilmektedir.

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları VLC'de PLS sağlanmasında tercih edilmiştir [33, 34, 35, 36]. [33]'te SCZ oluşturulması için vericilerdeki LED'lerden farklı güçlerde sinyal gönderilmekte ve alıcılarda gücü belirten maksimizasyon probleminin çözümü için uyarlanabilir arama ve popülasyon mutasyonlu guguk kuşu (Cuckoo Search with Adaptive Searching and Population Mutation, CSASPM) algoritması kullanılmaktadır. Hareketli kullanıcılar dahil edilerek kanal kazancı hesabı yapılan bir çalışmada [34], NOMA VLC sistemdeki tüm alıcılar ve gizli dinleyicinin CSI'sı kullanılarak, NOMA için güç tahsisini gizlilik kapasitesini maksimum yapacak şekilde optimize eden bir algoritma önerilmektedir. [35]'te vericilerin önüne yerleştirilen, akıllı yansıtıcı yüzey (Intelligent Reflecting Surface, IRS) olarak da isimlendirilen, bir ayna dizisinin açısı bilgisi optimizasyon probleminin bilinmeyen olarak tanımlanmakta ve gizlilik oranını maksimum yapmak için parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) algoritması kullanılmaktadır. [36]'da ise, verici olarak Lambert dağılımlı olmayan LED'ler kullanılarak bu LED'lerin hüzm açısı ve konum bilgileri optimizasyon probleminin bilinmeyen olarak tanımlanmakta ve gizlilik kapasitesini maksimum yapan değerler optimizasyon algoritmaları aracılığıyla bulunmaktadır. Hareketli kullanıcıların kanal hesabına katıldığı bir VLC sistemde ise, vericideki armatürlerin önüne IRS yerleştirilmekte ve bu ayna dizisinin açısı ve konum bilgilerinin bilinmeyen olarak tanımlandığı optimizasyon probleminde, gizlilik kapasitesini maksimum yapmak için bir derin öğrenme kullanılmaktadır. Ayrıca, ayna dizisinde kullanılan ayna sayısının artırılmasıyla daha yüksek bir gizlilik oranına ulaşılmaktadır [37].

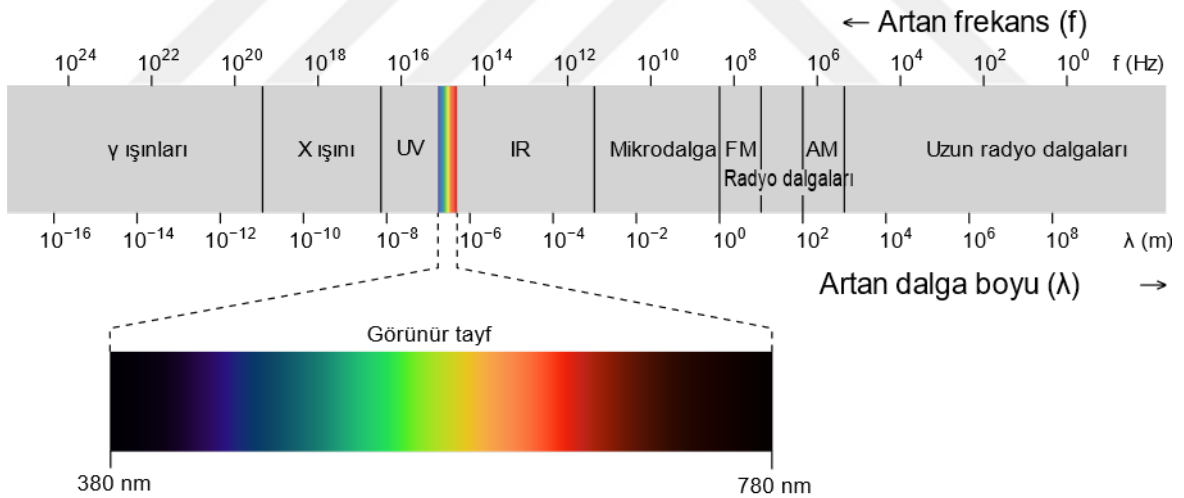
VLC'de fosfor tabakalı LED'ler verici olarak kullanılabileceği gibi çok renkli LED'ler de kullanılmaktadır [38, 39, 40, 41, 42]. [38]'de bilgi işareti bazı kaotik dizilerle modüle edilerek iki ayrı renk kanalından iletilirken geri kalan renk kanalından referans kaotik dizilerin iletildiği bir yapı önerilmektedir. [39]'da, alıcı biriminde yer alan RGB LED bozucu sinyal kaynağı olarak kullanılmakta ve bilgi mesajı ile bozucu mesaj farklı renk kanallarından gönderilmektedir. Vericideki RGB LED'in belirli bir renginden bilgi sinyali modüle edilerek gönderilmekte ve alıcıda demodüle edilerek alınmaktadır. Alıcı birim hangi renkten bozucu sinyal gönderildiği bilgisine sahip olduğu için bu rengi filtreleyerek bozucu

sinyali elimine etmiş olur. [40]'ta ise [39]'da önerilen yönteme ek olarak NLOS bileşenleri kanal hesabına dahil edildiği duruma genişletilmektedir. [41]'de, çok renkli LED'ler ile oluşturulan verici birimin önüne IRS yerleştirilerek, bu ayna dizisinde kullanılan ayna sayısının bilinmeyen olarak tanımlandığı gizlilik kapasitesini maksimize eden optimizasyon probleminin çözümü için PSO önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında, NS ve AN teknikleri çok renkli LED'lerin verici olduğu kapalı mekân VLC sisteme uygulanmıştır. ICI etkisi kanal hesabına dahil edilerek gönderilen ve alınan sinyaller elde edilmiş, gizlilik oranı sonuçları farklı renk sıcaklıklarında ortam aydınlatmaları için hesaplanmıştır.

1.2. Çok Renkli Görünür Işık Haberleşmesi

VLC, lisanssız olan görünür ışık spektrumunu kullanarak iletişimi sağlayan bir teknolojidir. Şekil 1'de görünür ışığın elektromanyetik spektrumdaki yeri gösterilmektedir.



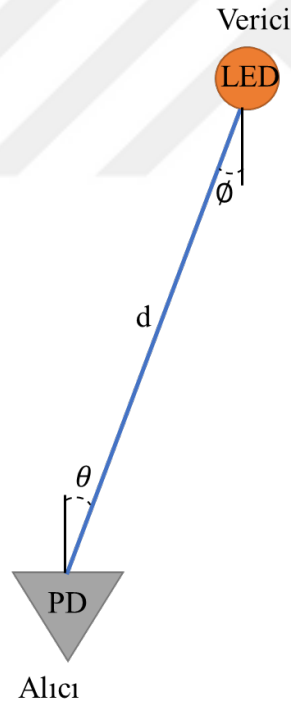
Şekil 1. Görünür ışığın elektromanyetik spektrumdaki yeri

VLC teknolojisi, ışık şiddetini veya rengini insan gözünün fark edemeyeceği hızda değiştirerek ortam aydınlatmasının ve kablosuz bilgi iletişiminin birlikte yapılmasını amaçlamaktadır [43, 44]. Çok renkli VLC sistemler, fosfor tabakalı LED'lerin verici olarak kullanıldığı sistemlere göre farklı renk kanallarından iletişim sağlayarak yüksek hızda haberleşme sağlaması yönüyle öne çıkmaktadır. Çok renkli VLC sistemlerde vericide kullanılan renk sayısı kadar kanaldan haberleşme imkânı doğmaktadır. Bu durumda, alıcı

birimde kullanılan renk kanalı sayısı kadar optik filtre ve PD olması gerekmektedir. Örneğin, verici olarak RGB LED’ler kullanıldığında üç farklı kanaldan haberleşme sağlandığı için alıcı tarafta üç adet PD ve her bir PD önünde kırmızı, yeşil ve mavi ışığı geçiren optik filtrelerin yer alması gerekmektedir.

1.3. Kanal Modeli

VLC kanal modeli LOS ve NLOS durumları için tanımlanmaktadır. Hesaplamalarda VLC kanalının NLOS bileşenleri işlem kolaylığı sağlanması için ihmal edilmekte ve yalnızca LOS bileşenleri dikkate alınmaktadır. Verici ile alıcı arasındaki LOS kanalın temsili gösterimi Şekil 2’de verilmektedir. LED’den çıkan ışının yüzey normali ile yaptığı açı $\emptyset$ ile ve alıcı PD’ye ulaşan ışının yüzey normali ile yaptığı açı θ ile temsil edilmektedir.



Şekil 2. VLC sistemde verici ile alıcı arasındaki kanal

Verici ile alıcı arasındaki LOS kanal kazancı $h(1)$ ’de verilmektedir.

$$h = \begin{cases} \frac{(m+1)A(\cos \phi)^m \cos \theta}{2\pi d^2} \frac{v^2}{(\sin \theta_c)^2} R, & |\theta| \leq \theta_c \\ 0, & |\theta| > \theta_c \end{cases} \quad (1)$$

A PD fiziksel alanını, v alıcı PD önündeki lensin kırılma indisi, R PD duyarlılığını, θ_c PD görüş açısını (Field of View, FOV) temsil eder. m , LED'in yarı görüş açısına ($\phi_{1/2}$) bağlı olarak değer alan Lambert indeksini temsil etmekte olup (2)'de verilmektedir.

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

d LED ile PD arasındaki mesafeyi temsil eder ve (3)'teki gibi hesaplanır.

$$d = \sqrt{(x_L - x_{PD})^2 + (y_L - y_{PD})^2 + (z_L - z_{PD})^2} \quad (3)$$

Burada, x_L ve x_{PD} sırasıyla LED ve PD'nin yatayda konumunu, y_L ve y_{PD} sırasıyla LED ve PD'nin düşeyde konumunu ve z_L ve z_{PD} sırasıyla LED ve PD'nin zeminden yüksekliğini temsil eder.

Çok renkli VLC sistemlerde I adet renkli LED ve J adet optik filtre kullanıldığında VLC kanalı $I \times J$ boyutunda bir matris olarak ifade edilebilir. Bu kanal matrisi (4)'te verilmektedir.

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1J} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{I1} & h_{I2} & \cdots & h_{IJ} \end{bmatrix} \quad (4)$$

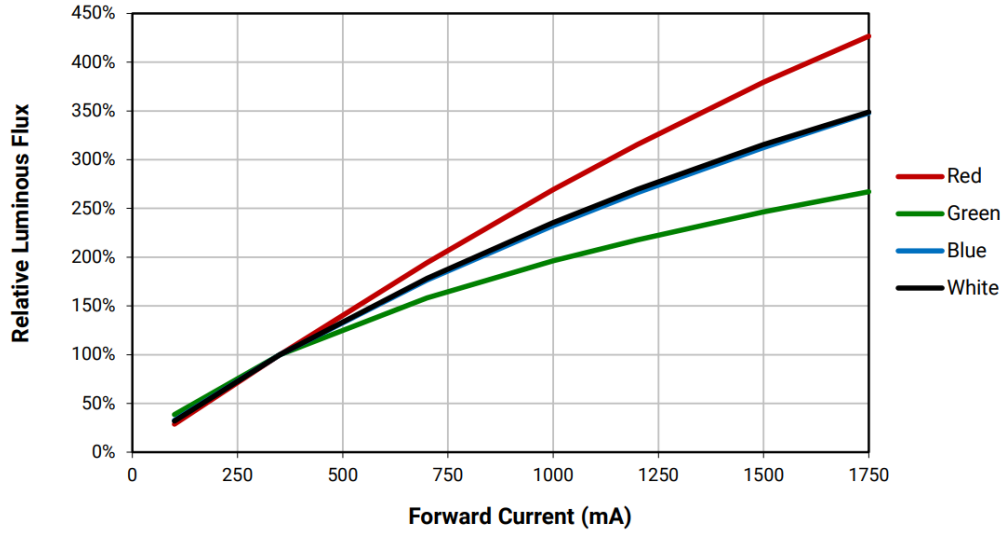
Bu kanal matrisin her bir elemanı h_{ij} olmak üzere, köşegen elemanlar, aynı renkte olan, vericinin renk bileşeni ile filtre arasındaki kanalı ifade ederken, diğer elemanlar ICI'yi ifade etmektedir. Kanal matrisinin satır elemanlarının toplamı, ilgili renkteki toplam kanalı ifade etmektedir.

1.4. RGB LED'ler ile Ortam Aydınlatma Renginin Belirlenmesi

Kapalı mekân VLC sistemler için ortamda dengeli bir aydınlatma seviyesinin sağlanması önceliklidir. Ortam aydınlatmalarında tercih edilen beyaz ışığın farklı renk sıcaklıklarındaki tonlarına göre uygulanma alanları farklılık göstermektedir. Sıcak beyaz bir tonda ortam aydınlatmasının elde edildiği 4000K renk sıcaklığı, göz yormaması nedeniyle ev ortamında tercih edilirken, soğuk beyaz tonda ortam aydınlatmasını sağlayan 6000K renk sıcaklığı, çalışma ortamında daha yüksek bir aydınlatma seviyesi gerektirmesi nedeniyle ofis, hastane vb. ortamlarda tercih edilmektedir.

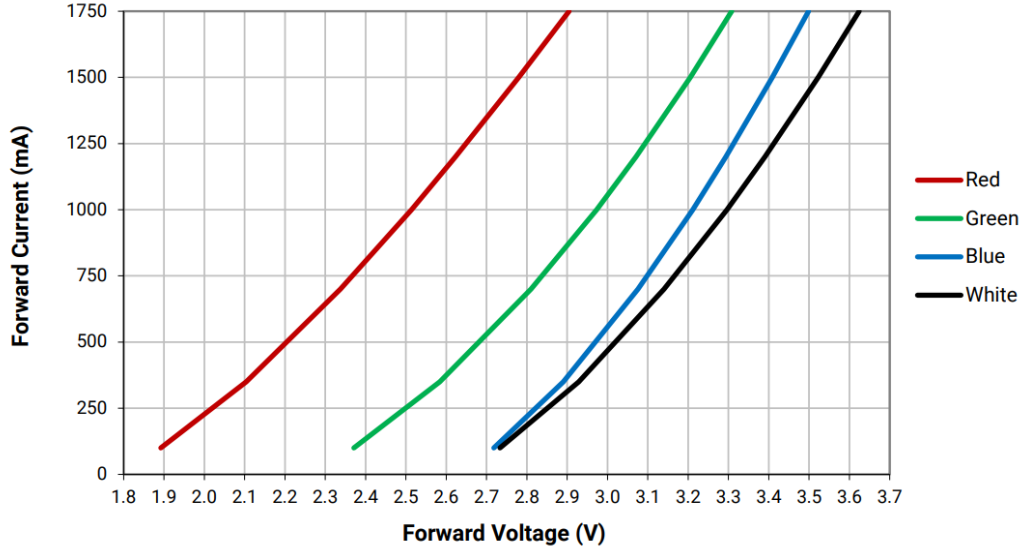
RGB LED'ler ile istenilen renk sıcaklığında ortam aydınlatmasının sağlanabilmesi LED'in içindeki R, G, B hücrelerinin farklı güçlerde sürülmesi ile sağlanabilmektedir. İstenilen aydınlatma için her bir LED hücrelerini beslemek için gereken güç değerleri aşağıdaki sekiz adım izlenerek bulunmuştur:

- İlk adımda istenilen renk sıcaklıklarında ortam aydınlatması için [0,255] aralığında değişen renk değerleri alınmıştır [45]. RGB LED için bu renk değerleri; 4000K renk sıcaklığında (255, 209, 163) ve 6000K renk sıcaklığında (255, 243, 239)'dur.
- İkinci adımda bir renk seçilerek, bu rengin karşılığında referans bir akım değeri belirlenmiştir. Her iki renk sıcaklığında aydınlatma için kırmızı renk seçilerek referans akım değeri 650 mA alınmıştır.
- Üçüncü adımda kullanılan LED'in bağıl ışık akısı – İleri akım (I_f) grafiğinden faydalanılarak seçilen referans akıma karşılık gelen akı alınmıştır. Grafikteki değerler okumak için internet üzerinden erişilebilecek grafik hesaplama araçlarından faydalanılmıştır [46]. Simülasyonlarda Cree® firmasına ait ticari olarak satılan XLamp XM-L RGB LED'i kullanılmaktadır. LED'in teknik dokümanında yer alan bağıl ışık akısı – I_f grafiği Şekil 3'te verilmektedir [47].



Şekil 3. XLamp XM-L RGB LED'in bağıl ışık akısı – ileri akım grafiği [47]

- Dördüncü adımda, renk değeri bağıl ışık akısı değerine bölünerek bir oran bulunmuştur. Örneğin, 4000K renk sıcaklığında oda aydınlatması için kırmızı renkte seçilirse referans alınan 650mA akım değerine karşılık gelen bağıl ışık akısı değeri Şekil 3'teki grafikten yararlanılarak %180 olarak bulunmuştur. Bu adımda ise, seçilen renk değeri/bağıl ışık akısı işleminden, kırmızı renk için oran $255/180=1,4$ olarak elde edilmiştir.
- Beşinci adımda, bir önceki adımda elde edilen oran sabit değer kabul edilerek, renk değeri/oran işlemi yapılarak diğer renkler için bağıl ışık akısı değerleri bulunmuştur. Örneğin, bir önceki adımda bulunan oran kullanılarak bağıl ışık akısı değerleri 4000K'de yeşil renk için $(209/1,4=150)$ işleminden %150 ve mavi renk için $(163/1,4=116)$ işleminden %116 olarak hesaplanmıştır.
- Altıncı adımda, bir önceki adımda bulunan bağıl ışık akısı değerlerine karşılık gelen akım değerleri kullanılan LED'in bağıl ışık akısı – I_f grafiği kullanılarak elde edilmiştir.
- Yedinci adımda, kullanılan LED'in teknik dokümanında yer alan I_f – ileri gerilim (forward voltage, V_f) grafiğinden akım değerlerine karşılık gelen gerilim değerleri bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan LED'in teknik dokümanında yer alan I_f – V_f grafiği Şekil 4'te verilmektedir [47].



Şekil 4. XLamp XM-L RGB LED'in $I_f - V_f$ grafiği [47]

- Sekizinci ve son adımda, gerilim ve akım değerleri çarpılarak R, G, B LED'lerin sürülmesi gereken güç değerleri olan $P_{t,i}$ değerleri bulunmuştur.

RGB LED'in her bir hücresinin beslendiği güç $P_{t,i}$ ile verilebilir. Burada $i \in \{R, G, B\}$ olup R, G ve B sırasıyla kırmızı, yeşil ve mavi renk LED'leri temsil etmektedir. İlgili $P_{t,i}$ değerleri 4000K renk sıcaklığı için Tablo 1'de ve 6000K renk sıcaklığı için ise Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1. 4000K renk sıcaklığında ortam aydınlatması için hesaplanan değerler

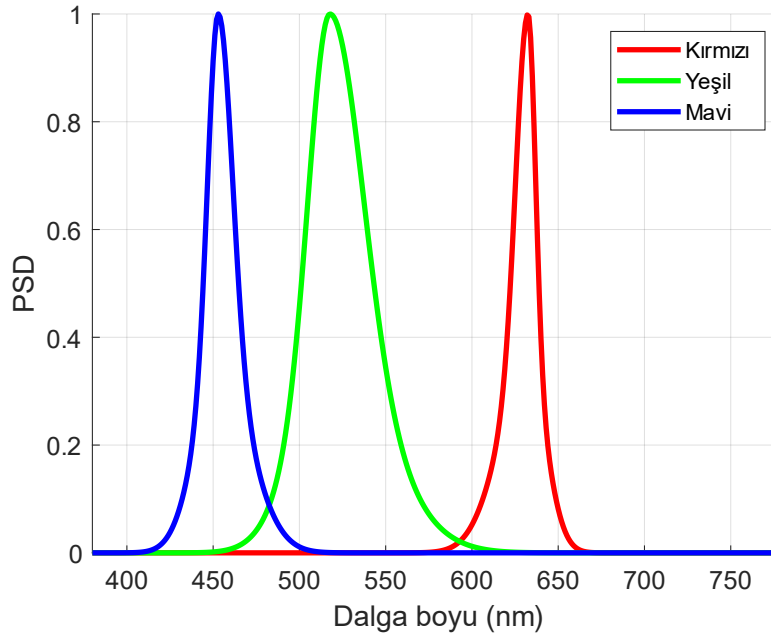
Renk	Renk değeri	I_f (mA)	V_f (V)	$P_{t,i}$ (W)
R	255	650	2.46	1.6
G	209	652	3.56	2.32
B	163	414	3.14	1.3

Tablo 2. 6000K renk sıcaklığında ortam aydınlatması için hesaplanan değerler

Renk	Renk değeri	I_f (mA)	V_f (V)	$P_{t,i}$ (W)
R	255	650	2.46	1.6
G	243	848	3.69	3.13
B	239	668	3.26	2.18

1.5. Güç Spektral Yoğunluğu

LED'ler, farklı dalga boylarında farklı ışın yayma miktarlarına sahiptir. Farklı dalga boylarında R, G ve B LED'lerin yaptığı ışınmanın normalize edilmiş gösterimi Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. RGB LED'in farklı dalga boylarındaki ışın yayma miktarları

RGB LED'in dalga boyunda toplam yaptığı ışın LED'in gücünü verir ve (5)'teki şekilde ifade edilebilir.

$$P_{t,ij} = \int_{\lambda_{l,j}}^{\lambda_{u,j}} S_i(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

λ dalga boyunu ve $S_i(\lambda)$ ise RGB LED'in i renkli hücrelerinin güç spektral yoğunluğunu (Power Spectral Density, PSD) temsil eder. Optik bant geçiren filtre alt sınırları $\lambda_{l,j} = \{592 \text{ nm}, 479 \text{ nm}, 380 \text{ nm}\}$ ve üst sınırları $\lambda_{u,j} = \{764 \text{ nm}, 615 \text{ nm}, 497 \text{ nm}\}$ olarak alınmış ve filtre kazancı 1 kabul edilmiştir. RGB LED'in PSD'si [48]'deki H-modeli kullanılarak hesaplanmıştır. LED'in PSD'si (6)'da verilmektedir.

$$S(\lambda) = \frac{g(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda) + k_1 g^{k_2}(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda)}{1 + k_1} \quad (6)$$

λ_p PSD'nin tepe dalga boyunu, k_1 ve k_2 ise PSD'nin karakteristik parametrelerini temsil eder ve $g(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda)$ ve $\Delta\lambda$ ifadeleri sırasıyla (7) ve (8)'de verilmektedir.

$$g(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda) = \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{\Delta\lambda^2}\right] \quad (7)$$

$$\Delta\lambda = \begin{cases} \Delta\lambda_1, & \lambda < \lambda_p \\ \Delta\lambda_2, & \lambda \geq \lambda_p \end{cases} \quad (8)$$

$\Delta\lambda_1$ ve $\Delta\lambda_2$ LED'in PSD'sinin yarı spektral genişliklerini temsil eder. Bu tez çalışmasında LED PSD parametreleri için [49]'da ticari olarak satılan LED'in değerleri kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. [49]'daki LED'in PSD parametreleri

Parametreler	LED'ler		
	Kırmızı	Yeşil	Mavi
λ_p	632,5	517,7	453
$\Delta\lambda_1$	23,84	29,38	18,99
$\Delta\lambda_2$	14,74	45,21	25,5
k_1	2	2	2
k_2	6	3	5

Kanaldan ve optik filtrelerden geçip alıcıya ulaşan güç $P_{r,ij}$ ile verilebilir. Burada $j \in \{R, G, B\}$ olup R, G ve B sırasıyla kırmızı, yeşil ve mavi renk optik filtreleri temsil etmektedir. $P_{r,ij}$ (9)'da verilmiştir.

$$P_{r,ij} = P_{t,ij} \cdot h_{ij} \quad (9)$$

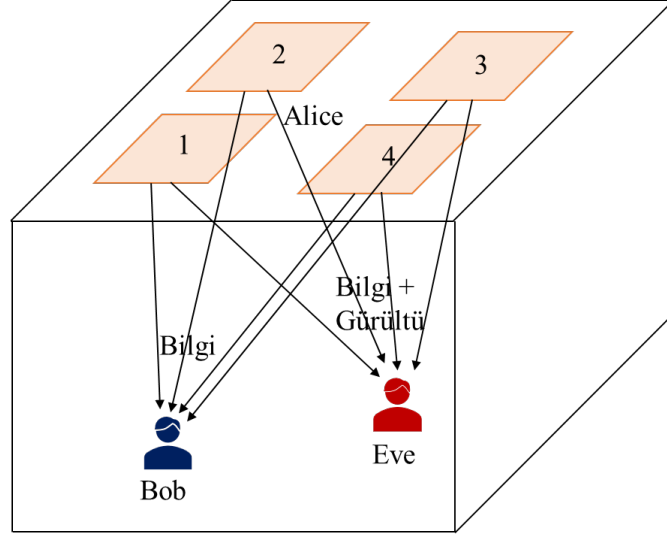
1.6. Fiziksel Katman Güvenliği

Geleneksel haberleşme sistemlerinde, veriler iletişim kanalı üzerinden şifrelenerek gönderilerek güvenli iletişim sağlanmaktadır. PLS, kriptografi teknikleri olmaksızın bir iletişim kanalının veya ağının fiziksel özelliklerinin kullanılarak verici ile alıcı arasında güvenli iletişim sağlanmasıdır. VLC'de gizli dinleme gibi güvenlik tehditlerinin önüne geçilebilmesi için iletişimin fiziksel katmanında önlemler alınması gerekmektedir.

1.6.1. VLC'de PLS Teknikleri

1.6.1.1. AN Tekniği

AN tekniği, gönderilen sinyale bir gürültü eklenmesi veya esas vericiden ayrı başka bir kaynaktan rastgele gürültü sinyallerinin gönderilerek gizli dinleyicinin bilgi mesajına ulaşmasının engellenmesidir. Bu çalışmada yapay gürültü sinyali bilgi sinyaline eklenerek gönderilmektedir. Şekil 6'da tek renkli çoklu giriş tekli çıkış (Multiple Input Single Output, MISO) VLC'de AN tekniğinin temsili gösterimi verilmiştir.



Şekil 6. Tek renkli MISO VLC’de AN tekniği

PLS sistemde verici Alice, alıcı Bob ve gizli dinleyici Eve olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde, alıcının CSI’sı kullanılarak, alıcıda gürültü oluşturmayacak şekilde bozucu sinyal gönderilmektedir. Bu sayede, alıcının bozucu sinyalden etkilenmeden bilgi mesajına erişimi sağlanmakta ve alıcının dışındaki kanallara gürültü gönderilerek gizlilik sağlanmaktadır.

Tek renkli MISO VLC’de AN tekniği için vericiden çıkan sinyalin ifadesi (10)’da verilmektedir.

$$\mathbf{x} = \beta t \left(\gamma (\hat{\mathbf{H}}_B)^T \mathbf{b} + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \hat{\Psi}_{B|l} \right) \quad (10)$$

$\mathbf{b} \in \{-1,1\}$ düzgün dağılımlı bilgi sinyalini, $\mathbf{J}_l \in \{-1,1\}$ düzgün dağılımlı yapay gürültü sinyalini, β modülasyon indeksini ve $\gamma \in [0, 1]$ yapay gürültü katsayısını temsil etmektedir. γ_N (11)’de verilmektedir.

$$\gamma_N = \frac{1 - \gamma}{N_a - 1} \quad (11)$$

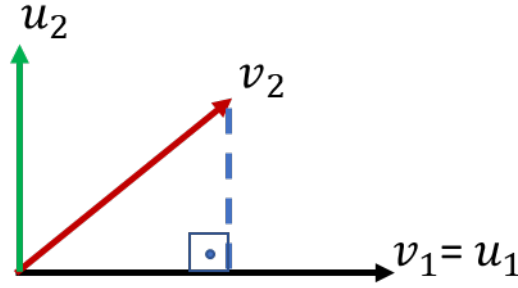
Denklem (10)'da $\hat{\mathbf{H}}_B$, Alice-Bob arasındaki kanal olan $\mathbf{H}_B$ 'nin normalize edilmiş halidir ve (12)'de verilmektedir.

$$\hat{\mathbf{H}}_B = \frac{\mathbf{H}_B}{\|\mathbf{H}_B\|_1} \quad (12)$$

$\|\cdot\|_1$ ifadesi 1-norm almayı ifade eder. Vektörün 1-normunu almak, o vektörün elemanlarının mutlak değerlerini alıp toplamaktır. Denklem (10)'da $\hat{\Psi}_B$ ise $\mathbf{H}_B$ 'nin ortonormal matrisi olan Ψ_B 'nin normalize edilmiş halidir ve (13)'te verilmektedir.

$$\hat{\Psi}_B = \frac{\Psi_B}{\|\Psi_B\|_1} \quad (13)$$

Ortonormal matris Gram-Schmidt yöntemi ile elde edilmektedir. Bu yöntemde ele alınan vektörün ortogonal matrisi daha sonra elde edilen matris normalize edilerek ortonormal matrisi bulunmaktadır. Ortogonal matrisin bulunması Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Gram-Schmidt yönteminde dik vektör elde edilmesi

Ortogonal matris bulunurken ilk olarak ortonormali bulunmak istenen vektörle aynı boyutta bir rastgele vektör alınır. Şekil (7)'de $v_1 = u_1$ ortonormali bulunmak istenen vektörü ve v_2 ise u_1 ile aynı boyutta alınan rastgele vektörü göstermektedir. u_1 'in ortogonalı olan u_2 vektörü (14)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$u_2 = v_2 - \frac{\langle u_1, v_2 \rangle}{\langle u_1, u_1 \rangle} u_1 \quad (14)$$

Son olarak elde edilen ortogonal vektörler kendi uzunluklarına bölünerek ortonormali elde edilmektedir.

Denklem (10)'da t (15)'teki şartı sağlayan bir sabit sayıdır.

$$t \left| \gamma (\hat{\mathbf{H}}_B)^T + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \hat{\Psi}_{Bl} \right| \leq 1 \quad (15)$$

Bob ve Eve'de alınan sinyallerin ifadesi sırasıyla (16) ve (17)'deki gibi olmaktadır.

$$y_B = \beta t \left(\gamma \mathbf{P}_{r_B} (\hat{\mathbf{H}}_B)^T b + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \mathbf{P}_{r_B} \hat{\Psi}_{Bl} \right) + z_B \quad (16)$$

$$y_E = \beta t \left(\gamma \mathbf{P}_{r_E} (\hat{\mathbf{H}}_B)^T b + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \mathbf{P}_{r_E} \hat{\Psi}_{Bl} \right) + z_E \quad (17)$$

Bir vektörün ortonormal matrisi ile çarpımı 0 olacağı için $\mathbf{H}_B \hat{\Psi}_{Bl} = 0$ olur ve Bob'a gürültü sinyallerinin ulaşmaması sağlanır. P_t LED gücünü temsil etmek üzere, Bob'da alınan güç $\mathbf{P}_{r_B}$ (18)'de ve Eve'de alınan güç $\mathbf{P}_{r_E}$ (19)'da verilmektedir.

$$\mathbf{P}_{r_B} = P_t \mathbf{H}_B \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_{r_E} = P_t \mathbf{H}_E \quad (19)$$

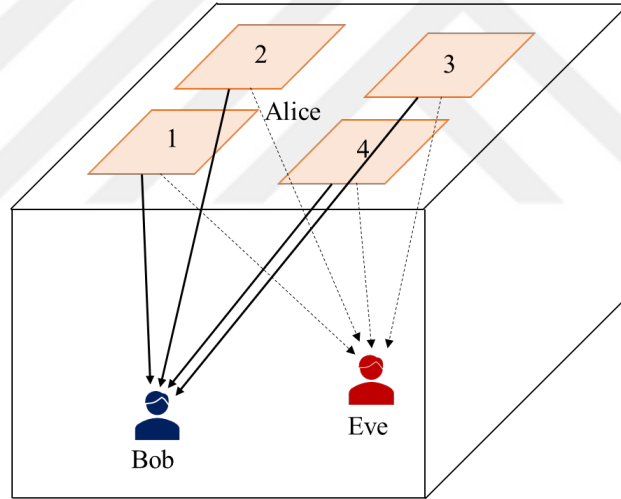
Alıcıda ve gizli dinleyicide sıfır ortalamalı ve varyansları sırasıyla σ_B^2 ve σ_E^2 olan toplanır beyaz Gauss gürültü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) olduğu kabul edilmiştir. Bob'un SNR ve Eve'in sinyal, girişim artı gürültü oranı (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio, SINR) ifadeleri sırasıyla (20) ve (21)'de verilmektedir. Bob'da yapay gürültü olmayacağı için SINR yerine SNR hesaplanmaktadır.

$$SNR_B = \frac{(\gamma\beta t \mathbf{P}_{r_B} (\hat{\mathbf{H}}_B)^T)^2}{\sigma_B^2} \quad (20)$$

$$SINR_E = \frac{(\gamma\beta t \mathbf{P}_{r_E} (\hat{\mathbf{H}}_B)^T)^2}{(\gamma_N \beta t)^2 \sum_{l=1}^{N_a-1} (\mathbf{P}_{r_E} \hat{\Psi}_{Bl})^2 + \sigma_E^2} \quad (21)$$

1.6.1.2. NS Tekniği

NS, uzamsal olarak dağıtılmış vericiler kullanılarak, gizli dinleyicinin konumuna bilgi mesajının ulaşmamasını sağlamak için önerilen bir tekniktir. Tek renkli MISO VLC’de NS tekniğinin örnek bir gösterimi Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Tek renkli MISO VLC’de NS tekniği

Bilgi mesajı bir hüzeleme vektörü ile çarpılarak vericiden gönderilmektedir. Hüzeleme vektörü gizli dinleyicinin CSI’sından yararlanılarak elde edilmekte ve gönderilen sinyal, alıcının konumuna güç ölçeklendirme katsayıları yardımıyla yönlendirilmektedir. VLC sistemde gizli dinleyiciye ulaşan bilgi minimumda tutulduğu sürece bu yöntem iletişim güvenliği sağlamaktadır. Bu yöntemin uygulanabilmesi için alıcı ve gizli dinleyicinin CSI’sının vericide bilinmesi gerekmektedir. Bilgi sinyali, Eve’in kanal

kazanç vektörü $\mathbf{H}_E$ 'nin ortonormal matrisi Ψ_E ile çarpılarak gönderilmekte, Eve'e sinyalin ulaşmaması amaçlanmaktadır. Vericiden çıkan $\mathbf{x}$ sinyalinin ifadesi (22)'de verilmektedir.

$$\mathbf{x} = \beta \mathbf{w} b \quad (22)$$

$\mathbf{w}$ hüzmleme vektörü (23)'te verilmektedir.

$$\mathbf{w} = t \Psi_E \Psi_E^T \mathbf{H}_B \quad (23)$$

Burada t , $|\mathbf{w}| \leq 1$ şartını sağlayan bir sabit sayıdır.

Bob ve Eve'de alınan sinyallerin ifadesi sırasıyla (24) ve (25)'te verilmektedir.

$$y_B = \beta b \mathbf{P}_{r_B}^T \mathbf{w} P_t + z_B \quad (24)$$

$$y_E = \beta b \mathbf{P}_{r_E}^T \mathbf{w} P_t + z_E \quad (25)$$

Bob ve Eve'deki SNR ifadeleri sırasıyla (26) ve (27)'de verilmektedir.

$$SNR_B = \frac{\beta^2 (\mathbf{P}_{r_B}^T \mathbf{w})^2}{\sigma_B^2} \quad (26)$$

$$SNR_E = \frac{\beta^2 (\mathbf{P}_{r_E}^T \mathbf{w})^2}{\sigma_E^2} \quad (27)$$

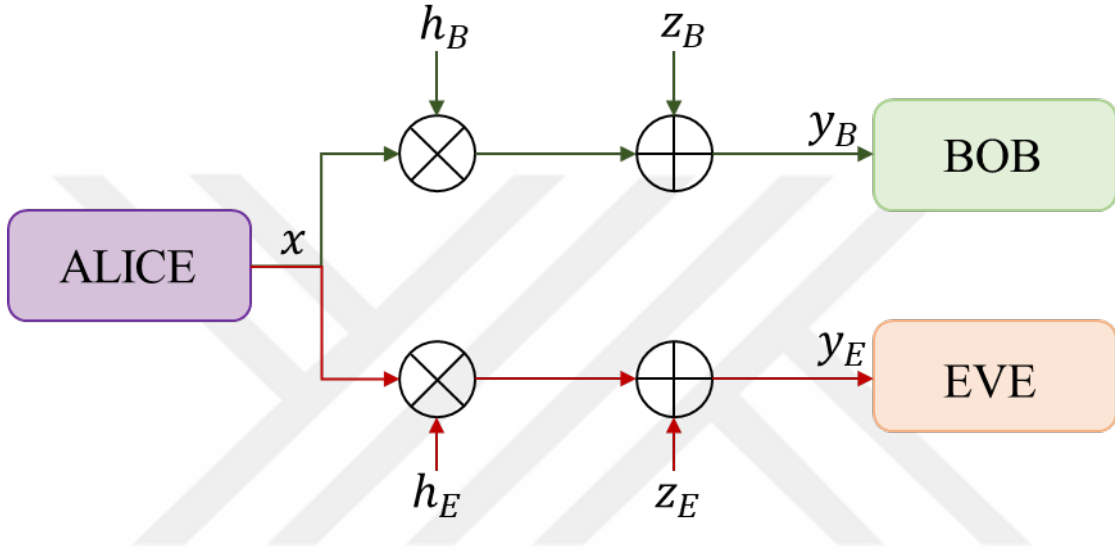
1.6.2. Gizlilik Kapasitesi ve Gizlilik Oranı

Gizlilik kapasitesi bir iletişim kanalı üzerinde ortalama olarak elde edilebilecek maksimum gizlilik oranını temsil eder. Gizlilik oranı ise bir gizli dinleyicinin varlığında dinlenmesi mümkün olmadan gönderilecek bilgi miktarıdır [50]. RF haberleşme sistemlerinde gizlilik kapasitesi hesabı için Shannon kanal kapasitesi kullanılmaktadır [51]. Shannon kanal kapasitesi formülleri, LED'lerin sınırlı çalışma aralığına sahip olmalarından dolayı VLC sistemlerine doğrudan uygulanamamaktadır [6]. VLC sistemleri için gizlilik kapasitesi C_s 'nin hesabı (28)'de ifade edilmektedir.

$$C_s = \left\{ \max_{p(b)} \mathbb{I}(b; y_B) - \mathbb{I}(b; y_E) \right\}^+, \text{ s.t. } |b| \leq 1 \quad (28)$$

$\mathbb{I}$ karşılıklı bilgiyi (mutual information) ve $p(b)$ gönderilen olasılık yoğunluk dağılımını (Probability Density Function, PDF) ifade etmektedir.

Gizli dinleyicili VLC sistemin kanal modeli Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Gizli dinleyicili VLC sistemin kanal modeli

Vericiden çıkan işaret x , Alice-Bob arasındaki kanalı h_B ve Alice-Eve arasındaki kanalı h_E , Bob ve Eve’deki gürültüler sırasıyla z_B ve z_E , alıcı ve gizli dinleyicide alınan sinyaller sırasıyla y_B ve y_E ile temsil edilmiştir. Gönderilen verinin PDF’si $b \in \{-1, 1\}$ düzgün dağılımlı, z_B ve z_E ’nin 0 ortalamalı ve σ^2 varyanslı normal dağılımlı AWGN kabul edildiği durumda gizlilik oranı tek renkli MISO VLC için (29)’da ifade edilmektedir [52]. Çok renkli MISO VLC için ise gizlilik oranı (30)’da ifade edilmiştir.

$$R_s = \max \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{6SNR_B + 3\pi e}{\pi e SNR_E + 3\pi e} \right), 0 \right\} \quad (29)$$

$$R_s = \sum_j \max \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{6SNR_{B,j} + 3\pi e}{\pi e SNR_{E,j} + 3\pi e} \right), 0 \right\} \quad (30)$$

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. SISO VLC

2.1.1. Tek Renkli SISO VLC

Tek renkli tekli giriş tekli çıkış (Single Input Single Output, SISO) VLC’de vericiden çıkan işaret (31)’deki gibi tanımlanabilir.

$$x = \beta b \quad (31)$$

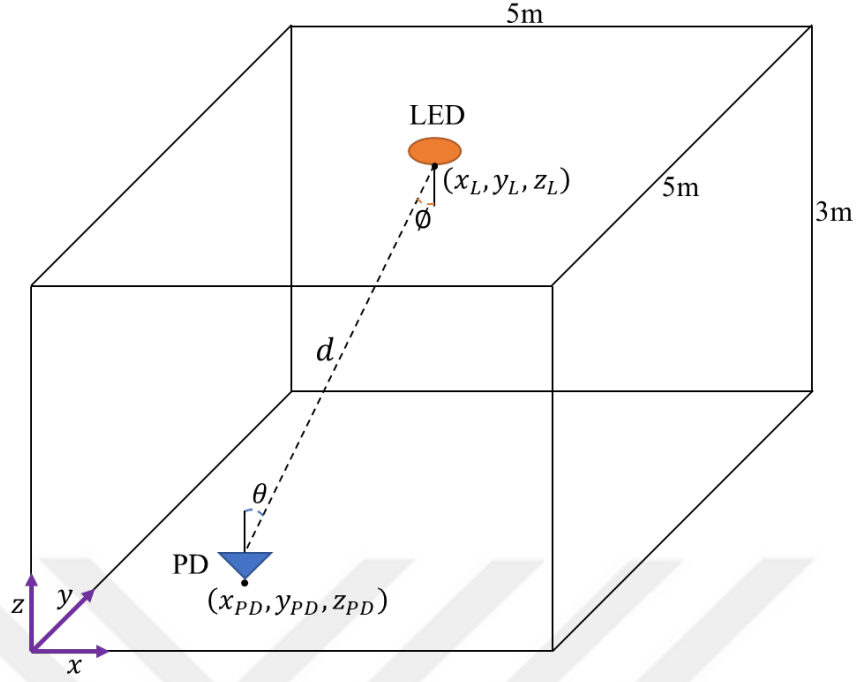
Alınan sinyal (32)’de verilmektedir.

$$y = P_r x + z \quad (32)$$

Burada z alıcıdaki gürültüyü ve P_r alınan gücü temsil etmektedir. Alınan güç (33) ile hesaplanmaktadır.

$$P_r = P_t h \quad (33)$$

SISO VLC sistem simülasyonları için tasarlanan oda Şekil 10’da ve simülasyon parametreleri Tablo 4’te verilmiştir.

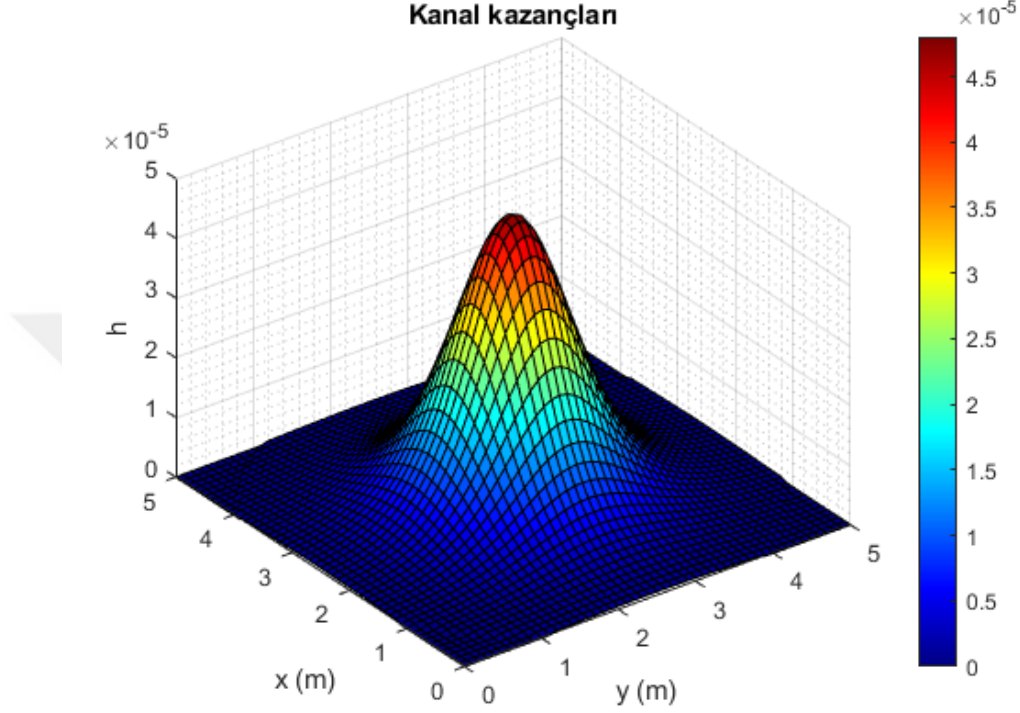


Şekil 10. SISO VLC model oda gösterimi

Tablo 4. SISO VLC için simülasyon parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer
P_t	LED gücü	10 W
$\Phi_{1/2}$	LED yarı görüş açısı	65°
m	Lambert indeksi	0.8048
R	PD duyarlılığı	0.54 mA/mW
c	Işık hızı	3×10^8 m/s
v	Lens kırılma indisi	1.5
A	PD fiziksel alanı	1 cm ²
θ_c	PD görüş açısı	60°
β	Modülasyon indeksi	0.1
σ^2	Gürültü gücü	1.47×10^{-13} W
z_{PD}	PD yüksekliği	0.85 m
x_L	LED'in yatayda konumu	2.5 m
y_L	LED'in düşeyde konumu	2.5 m
z_L	LED'in yüksekliği	3 m

Tablo 4'teki parametreler yardımıyla hesaplanan kanal kazançlarının odanın zemininde referans alınan (0,0) konumundan itibaren x ve y eksenlerinde 0,1 m aralıklarla model oda içerisindeki dağılımı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. SISO VLC'de kanal kazançlarının model odada dağılımı

Şekilden anlaşılabacağı üzere merkezden yani vericinin bulunduğu konumdan uzaklaştıkça kanal kazancı azalmaktadır. Alıcıdaki gürültü sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı AWGN kabul edilmektedir. Alıcıdaki SNR'nin hesabı (34)'te verilmektedir.

$$SNR = \frac{\beta^2 P_r^2}{\sigma^2} \quad (34)$$

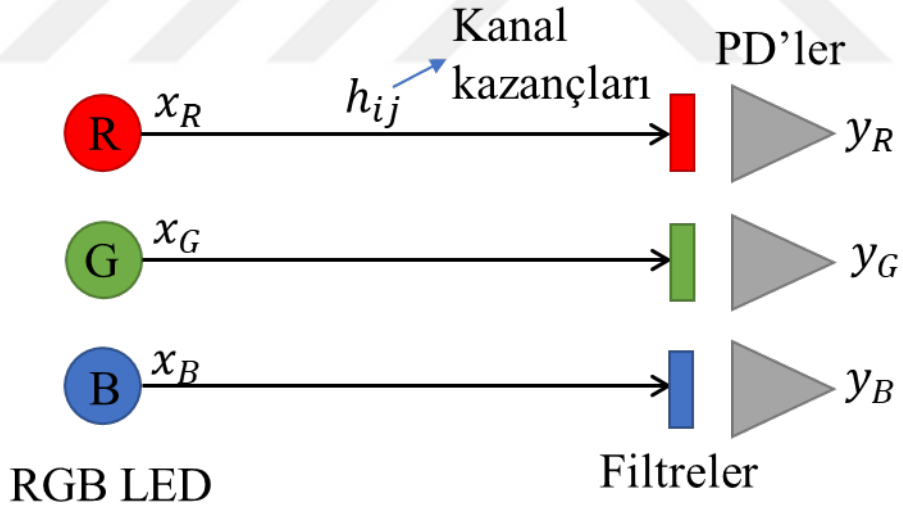
2.1.2. Çok Renkli SISO VLC

Bu tez çalışmasında çok renkli SISO VLC sisteminde verici olarak bir RGB LED ve alıcı olarak ise üç PD olduğu varsayılmıştır. Alıcıda her rengin ayrı olarak algılanması için

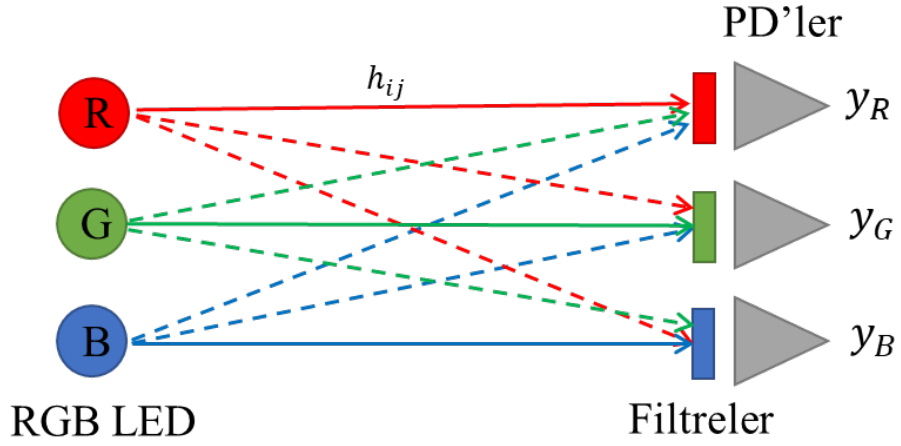
kırmızı, yeşil ve mavi renkleri geçiren optik filtreler her bir PD'nin önünde yer almaktadır. Vericiden çıkan sinyal x_i ile (35)'te verilmiştir. Renk kanallarında gönderilen verinin PDF'si $b_i \in \{-1,1\}$ şeklinde düzgün dağılımlı kabul edilmiştir.

$$x_i = \beta b_i \quad (35)$$

Çok renkli VLC'de vericiden gönderilen renk hariç farklı bir renkte optik filtreden geçen sinyaller ICI'dır. ICI olmadığında vericiden bir renk kanalından gönderilen sinyal alıcıda aynı renkte optik bant geçiren filtreden geçerek alınmaktadır. Bu durumda verici ile alıcı arasındaki kanal kazancı h_{ij} ile verilmiştir. ICI olmadığında $h_{i \neq j} = 0$ olmaktadır. ICI, vericiden bir renk kanalından gönderilen sinyalin alıcıda aynı renkte optik bant geçiren filtreden geçmesinin yanı sıra farklı renkte filtrelerden de geçmesini ifade etmektedir. Bu durumda $h_{i \neq j} \neq 0$ olmaktadır. Verici ile alıcı arasındaki kanalların gösterimi ICI olmadığında Şekil 12'de ve ICI olduğunda ise Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 12. RGB LED'li SISO VLC'de ICI olmadığında kanalların gösterimi



Şekil 13. RGB LED’li SISO VLC’de ICI olduğunda kanalların gösterimi

Alınan sinyal y_j ise (36)’da verilmiştir.

$$y_j = \sum_i P_{r,ij} x_i + z_j \quad (36)$$

Alınan güç $P_{r,ij}$ (9)’da ifade edilmiştir. z_j alıcı PD’lerdeki gürültüleri belirtir. z_j ’nin sıfır ortalamalı, σ_j^2 dağılımlı AWGN olduğu kabul edilmiştir. ICI olmadığında alıcılardaki SNR değerlerinin hesabı (37)’de verilmiştir.

$$SNR_j = \frac{\sum_i P_{r,ij}^2 \beta^2}{\sigma_j^2} \quad (37)$$

ICI olduğunda alıcılardaki $SINR_j$ (38)’de verilmiştir.

$$SINR_j = \frac{S_j}{I_j + \sigma_j^2} \quad (38)$$

Sinyal gücünü ifade eden S_j (39)’de ve ICI gücünü ifade eden I_j (40)’ta verilmiştir.

$$S_j = \sum_i \beta^2 P_{r,ij}^2 \quad , st. i = j \quad (39)$$

$$I_j = \sum_i \beta^2 P_{r,ij}^2 \quad , st. i \neq j \quad (40)$$

2.2. MISO VLC

2.2.1. Sistem Modeli

Tasarlanan model odanın $5m \times 5m \times 3m$ boyutlarında olduğu kabul edilmektedir. Oda tavanında karesel olarak konumlandırılmış dört adet armatür ve her bir armatürde 9 adet RGB LED bulunmaktadır. Çok renkli MISO VLC sistem için verici olarak kullanılan RGB LED'in içindeki R, G, B hücreleri arasındaki mesafe çok küçük bir değer olduğu için bunların aynı konumda bulunduğu kabul edilmiştir. Alıcı taraftaki 3 PD'nin de aynı konumda varsayılmıştır.

MISO VLC için simülasyon parametreleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. MISO VLC için simülasyon parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer
$\Phi_{1/2}$	LED yarı görüş açısı	65°
m	Lambert indeksi	0.8048
R	PD duyarlılığı	0.54 mA/mW
c	Işık hızı	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
v	Lens kırılma indisi	1.5
A	PD fiziksel alanı	1 cm^2
θ_c	PD görüş açısı	60°
β	Modülasyon indeksi	0.1
σ^2	Gürültü gücü	$1.47 \times 10^{-13} \text{ W}$
N_a	Armatür sayısı	4
N_L	Toplam LED sayısı	36
z_L	LED'lerin ya da panellerin zeminden yüksekliği	3 m
z_{PD}	PD zeminden yüksekliği	0.85 m
g_L	LED'lerin birbirleri arasındaki mesafe	0.2 m

ICI olduğunda ve ICI olmadığında vericiden çıkan gücü belirten $P_{t,ij}$ değerleri 4000K ve 6000K renk sıcaklıklarında ortam aydınlatmaları için Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı renk sıcaklıkları ve ICI durumunda gönderilen güç değerleri

Renk	P_t (W)					
Sıcaklığı	ICI yok			ICI var		
4000K	$\begin{bmatrix} 1.6 & 0 & 0 \\ 0 & 2.32 & 0 \\ 0 & 0 & 1.3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.5913 & 0.1695 & 5.214 \times 10^{-16} \\ 0.0133 & 2.2917 & 0.1784 \\ 5.213 \times 10^{-15} & 0.0598 & 1.2943 \end{bmatrix}$				
6000K	$\begin{bmatrix} 1.6 & 0 & 0 \\ 0 & 3.13 & 0 \\ 0 & 0 & 2.18 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.5913 & 0.1695 & 5.214 \times 10^{-16} \\ 0.0179 & 3.0918 & 0.2406 \\ 8.742 \times 10^{-15} & 0.1003 & 2.1705 \end{bmatrix}$				

Armatürlerin konumları Tablo 7’de verilmiştir.

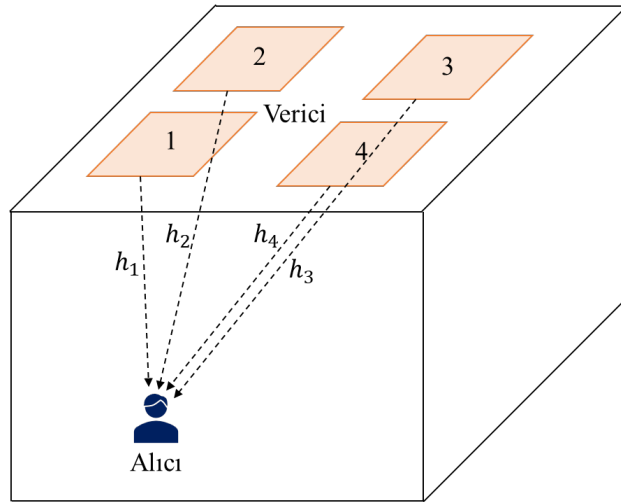
Tablo 7. Armatür konumları

Armatür	Konumlar		
	x	y	z
A1	1.25	1.25	3
A2	1.25	3.75	3
A3	3.75	1.25	3
A4	3.75	3.75	3

PLS hesaplamalarının yapıldığı tezin 2.2.3.1 ve 2.2.3.2 bölümlerinde Bob’un konumu (2.5, 2.5, 0.85) alınmıştır. Eve’in ise zeminden 0.85m yükseklikte olduğu kabul edilmiştir. Gizlilik oranı sonuçları Eve’in zeminde 0.1m aralıklarla konumları için hesaplanmıştır.

2.2.2. Tek Renkli MISO VLC

Şekil 14’te tek renk LED’lerin verici olduğu MISO VLC’nin örnek bir gösterimi verilmiştir. Armatür sayısı N_a ile ve LED sayısı l ile gösterilmek üzere, LED ile PD arası kanal $h_{N_a,l}$ ile belirtilmiştir.



Şekil 14. Tek renk LED’li MISO VLC

Bir armatür içindeki tüm LED'lerden aynı veri gönderildiği için armatür ile PD arasındaki kanal (41)'de ifade edilmektedir.

$$h_{N_a} = \sum_l h_{N_a,l} \quad (41)$$

Burada h_{N_a} belirli bir armatür ile alıcı arasındaki kanalı göstermektedir. Kanal kazanç vektörü $\mathbf{h}$, $N_a \times 1$ boyutunda olmaktadır. Alınan güç (42)'de verilmiştir.

$$\mathbf{P}_r = P_t \mathbf{h} \quad (42)$$

Vericiden çıkan sinyal (31) denkleminde verilen ifade ile aynıdır. Alıcıya ulaşan sinyalin ifadesi (43)'te verilmiştir.

$$y = \|\mathbf{P}_r\|_1 x + z \quad (43)$$

Alıcının gürültüsü z 'nin sıfır ortalamalı, σ^2 dağılımlı AWGN kabul edilmiştir. Alıcıdaki SNR değeri (44)'te verilmiştir.

$$SNR = \frac{\beta^2 \|\mathbf{P}_r\|_1^2}{\sigma^2} \quad (44)$$

2.2.3. Çok Renkli MISO VLC

Vericiden çıkan sinyal (35) denkleminde verilen ifade ile aynıdır. Alıcıya ulaşan sinyalin ifadesi (45)'te verilmiştir.

$$y_j = \sum_i \|\mathbf{P}_{r,ij}\|_1 x_i + z_j \quad (45)$$

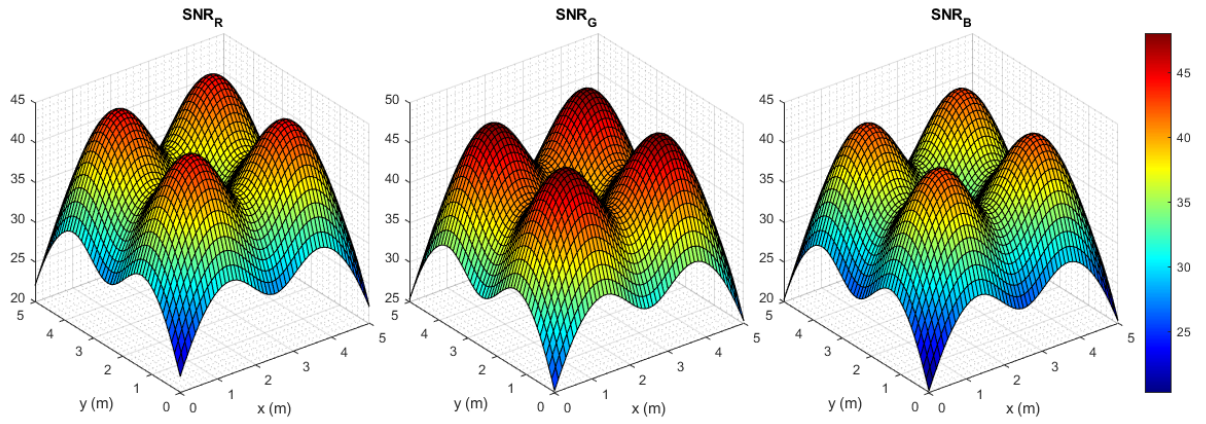
MISO VLC sistemde kanal kazancı $\mathbf{h}_{ij}$ vektör olduğu için alınan güç $\mathbf{P}_{r,ij}$ de vektör olmuştur ve (46)'da verilmiştir.

$$\mathbf{P}_{r,ij} = P_{t,ij} \mathbf{h}_{ij} \quad (46)$$

ICI olmadığında alıcılardaki SNR değerleri (47)'de verilmiştir.

$$SNR_j = \frac{\beta^2 \|\mathbf{P}_{r,ij}\|_1^2}{\sigma_j^2} \quad (47)$$

Alıcının 0.1m aralıklarla her bir konumu için SNR_j değerleri 4000K oda aydınlatması için Şekil 15'te ve her renk kanalı için 4000K oda aydınlatması durumunda elde edilen maksimum ve minimum SNR_j değerleri Tablo 8'de verilmektedir.



Şekil 15. MISO VLC’de ICI olmadığında SNR’nin oda genelinde dağılımı (4000K)

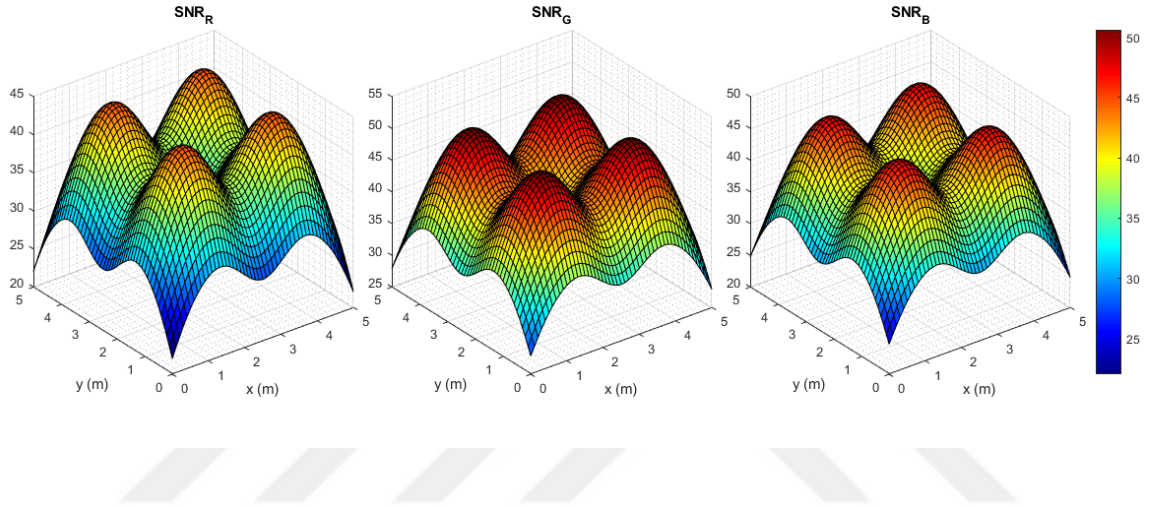
Tablo 8. MISO VLC’de ICI olmadığında hesaplanan SNR’ler (4000K)

4000K	Kırmızı	Yeşil	Mavi
Max SNR (dB)	44.7938	48.0212	42.9903
Min SNR (dB)	22.0481	25.2754	20.2445

Şekil 15’ten görüleceği üzere en yüksek SNR’lere Bob’un x ve y ekseninde armatürlerin merkez konumlarında olduğu konumlarında ulaşılmıştır. Bunun sebebi bu

konumlarda kanal kazancının en yüksek değerinde olmasıdır. En yüksek SNR'ye yeşil renk optik bant geçiren filtrenin olduğu PD'de ulaşılmıştır. Bunun sebebi ise vericiden yeşil renk LED'in kırmızı ve maviye göre daha yüksek güçle beslenmesidir.

Alıcının oda zemininde 0.1m aralıklarla her bir konumu için SNR_j değerleri 6000K oda aydınlatması için Şekil 16'da ve her renk kanalı için 6000K oda aydınlatması durumunda elde edilen maksimum ve minimum SNR_j değerleri Tablo 9'da verilmektedir.



Şekil 16. MISO VLC'de ICI olmadığına SNR'nin oda genelinde dağılımı (6000K)

Tablo 9. MISO VLC'de ICI olmadığına hesaplanan SNR'ler (6000K)

6000K	Kırmızı	Yeşil	Mavi
Max SNR (dB)	44.7938	50.6223	47.4805
Min SNR (dB)	22.0481	27.8766	24.7348

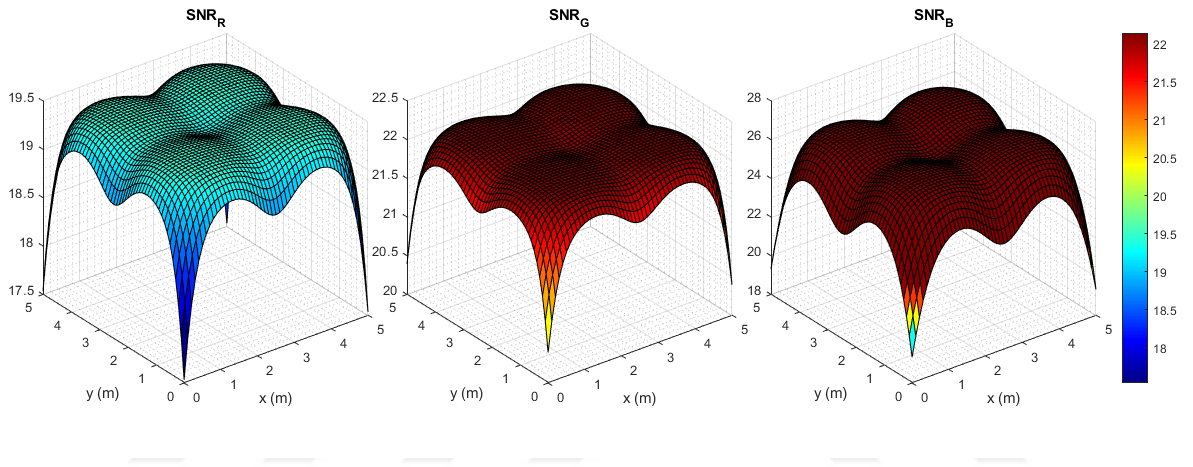
6000K renk sıcaklığında ortam aydınlatmasında 4000K'e kıyasla daha yüksek SNR'lere ulaşılmıştır. Bunun sebebi ise bu renk tonunun elde edilmesi için LED'in tüm hücrelerinin toplam olarak daha yüksek güçte beslenmesidir.

ICI olduğunda alıcılardaki $SINR_j$ değerleri (38)'deki gibi hesaplanmıştır. Sinyal gücünü ifade eden S_j (48)'de ve girişim gücünü ifade eden I_j (49)'da verilmiştir.

$$S_j = \sum_i \beta^2 \|\mathbf{P}_{r,ij}\|_1^2 \quad , st. i = j \quad (48)$$

$$I_j = \sum_i \beta^2 \|\mathbf{P}_{r,ij}\|_1^2 \quad , st. i \neq j \quad (49)$$

Alıcının oda zemininde 0.1m aralıklarla her bir konumu için $SINR_j$ değerleri 4000K oda aydınlatması için Şekil 17’de ve her renk kanalı için 4000K oda aydınlatması durumunda elde edilen maksimum ve minimum $SINR_j$ değerleri Tablo 10’da verilmiştir.



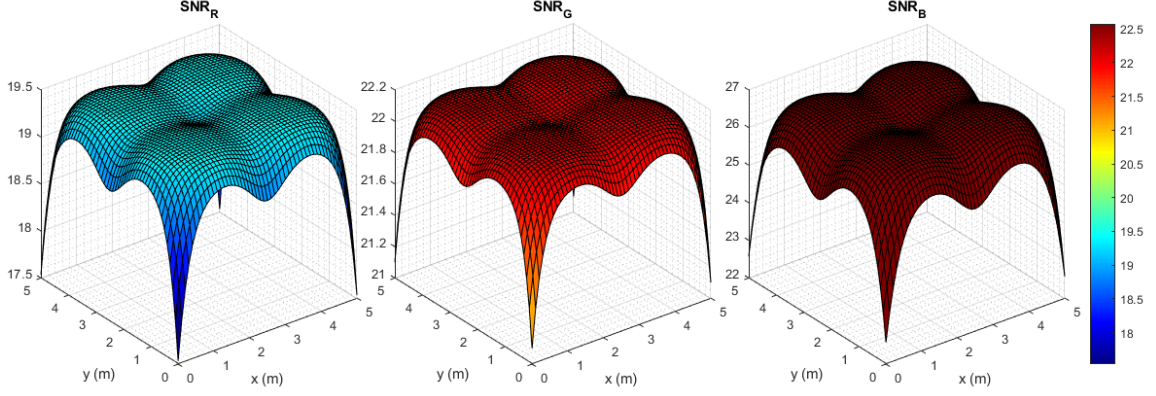
Şekil 17. MISO VLC’de ICI olduğunda SINR’nin oda genelinde dağılımı (4000K)

Tablo 10. MISO VLC’de ICI olduğunda hesaplanan SINR’ler (4000K)

4000K	Kırmızı	Yeşil	Mavi
Max SINR (dB)	19.4409	22.1413	26.6034
Min SINR (dB)	17.5328	20.3938	19.3289

ICI olduğunda yapılan hesaplamalarda en yüksek SINR’ye mavi renk optik bant geçiren filtrenin olduğu PD’de ulaşılmıştır. ICI olmadığında en yüksek SNR’ye yeşil renk optik bant geçiren filtrenin olduğu PD’de ulaşılmıştı. Mavi renkte ICI’nın daha düşük olması sebebiyle burada hesaplanan SINR diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır.

Alıcının oda zemininde 0.1m aralıklarla her bir konumu için $SINR_j$ değerleri 6000K oda aydınlatması için Şekil 18’de ve her renk kanalı için 6000K oda aydınlatması durumunda elde edilen maksimum ve minimum $SINR_j$ değerleri Tablo 11’de verilmektedir.



Şekil 18. MISO VLC’de ICI olduğunda $SINR$ ’nin oda genelinde dağılımı (6000K)

Tablo 11. MISO VLC’de hesaplanan SNR değerleri (6000K)

6000K	Kırmızı	Yeşil	Mavi
Max SINR (dB)	19.4409	22.1465	26.6688
Min SINR (dB)	17.5328	21.0999	22.5756

2.2.3.1. MISO VLC’de AN Tekniği

AN tekniğinde yapay gürültü sinyali oluşturulup bu gürültünün Bob’un dışındaki konumlara gönderimi amaçlanmaktadır. Bob’un CSI’sı $\mathbf{H}_{B,ij}$ kullanılarak Bob’un ortonormal matrisi $\mathbf{\Psi}_{B,ij}$ oluşturulmuştur. Tek renkli MISO VLC’de AN tekniğinde Bob’un CSI’sı $\mathbf{H}_B$ şeklinde ifade edilmiş, vericiden çıkan sinyal (10) denkleminde $\mathbf{x}$ ile verilmişti. Ancak çok renkli MISO VLC’de $\mathbf{H}_{B,ij}$ vericiden çıkan sinyalde yer aldığı için, bu sinyal $\mathbf{x}_{ij}$ olarak (50)’de ifade edilmiştir.

$$\mathbf{x}_{ij} = \beta t_{ij} \left(\gamma (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T b_i + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \hat{\Psi}_{B,ij} J_{l,i} \right) \quad (50)$$

$J_{l,i}$ i rengindeki LED bileşeninin yapay gürültü sinyalini ifade eder. $\hat{\mathbf{H}}_{B,ij}$, $\mathbf{H}_{B,ij}$ 'nin normalize edilmiş hali ve $\hat{\Psi}_{B,ij}$ ise $\Psi_{B,ij}$ 'nin normalize edilmiş halidir. t_{ij} , (51)'deki şartı sağlayan bir sabit sayıdır.

$$t_{ij} \left| \gamma (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \hat{\Psi}_{B,ij} \right| \leq 1 \quad (51)$$

Bob ve Eve'de alınan sinyallerin ifadesi sırasıyla (52) ve (53)'te verilmektedir.

$$y_{B,j} = \beta \sum_i t_{ij} \left(\gamma \mathbf{P}_{r_B,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T b_i + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \mathbf{P}_{r_B,ij} \hat{\Psi}_{B,ij} J_{l,i} \right) + z_{B,j} \quad (52)$$

$$y_{E,j} = \beta \sum_i t_{ij} \left(\gamma \mathbf{P}_{r_E,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T b_i + \gamma_N \sum_{l=1}^{N_a-1} \mathbf{P}_{r_E,ij} \hat{\Psi}_{B,ij} J_{l,i} \right) + z_{E,j} \quad (53)$$

Bob'da alınan güçler $\mathbf{P}_{r_B,ij}$ (54)'te ve Eve'de alınan güçler $\mathbf{P}_{r_E,ij}$ (55)'te verilmiştir.

$$\mathbf{P}_{r_B,ij} = P_{t,ij} \mathbf{H}_{B,ij} \quad (54)$$

$$\mathbf{P}_{r_E,ij} = P_{t,ij} \mathbf{H}_{E,ij} \quad (55)$$

ICI olmadığında Bob'un SNR ve Eve'in SINR ifadeleri sırasıyla (56) ve (57)'de verilmektedir.

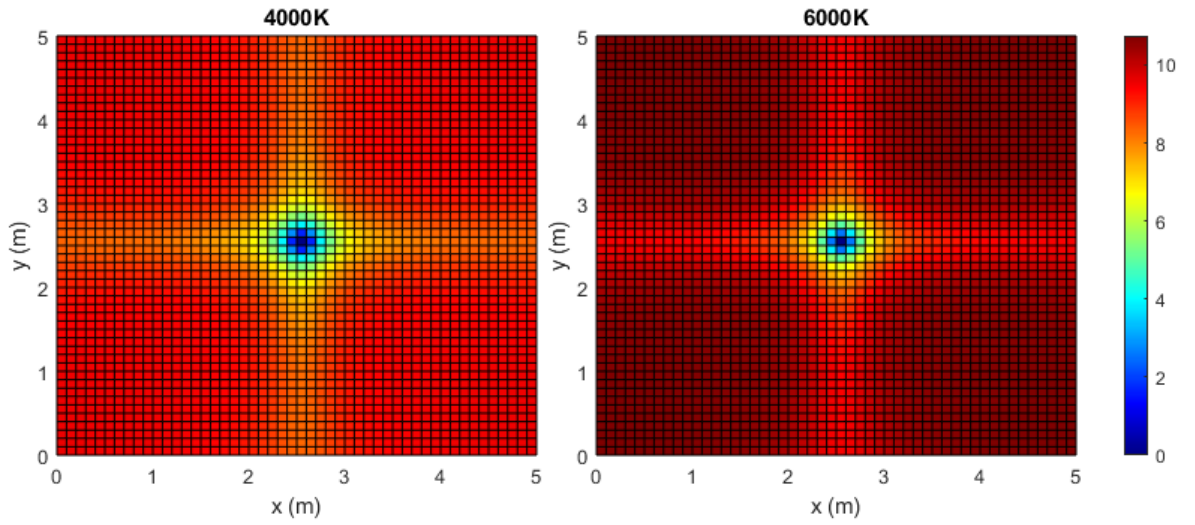
$$SNR_{B,j} = \frac{\sum_i (\gamma \beta t_{ij} \mathbf{P}_{r_B,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T)^2}{\sigma_{B,j}^2} \quad (56)$$

$$SINR_{E,j} = \frac{\sum_i (\gamma \beta t_{ij} \mathbf{P}_{r_E,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,j})^T)^2}{\sum_i (\gamma_N \beta t_{ij})^2 \sum_{l=1}^{N_a-1} (\mathbf{P}_{r_E,ij} \hat{\Psi}_{B,ij})^2 + \sigma_{E,j}^2} \quad (57)$$

Gizlilik oranı hesabı (58)'de verilmiştir.

$$R_s = \sum_j \max \left\{ \frac{1}{2} \log \left(\frac{6SNR_{B,j} + 3\pi e}{\pi e SINR_{E,j} + 3\pi e} \right), 0 \right\} \quad (58)$$

Gizlilik oranı sonuçları Şekil 19'da ve Tablo 12'de verilmiştir.



Şekil 19. Çok renkli MISO VLC'de AN tekniği için ICI yokken gizlilik oranı sonuçları

Tablo 12. Çok renkli MISO VLC'de AN tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olmadığında hesaplanan gizlilik oranı sonuçları

Renk sıcaklığı	Gizlilik oranı (bit/kanal kullanımı)	
	Maksimum	Ortalama
4000K	9.5977	8.9996
6000K	10.7484	10.1659

Gizlilik oranında en düşük değere Şekil 19'dan görüleceği üzere Bob ile Eve'in aynı konumda olduğu (2.5, 2.5, 0.85) konumunda ulaşılmıştır. Bunun sebebi ise bu konumda

$\mathbf{H}_{B,ij} = \mathbf{H}_{E,ij}$ olmasıdır. Bir vektörün kendi ortonormali ile çarpımı 0 olduğu için (53)'te $\mathbf{P}_{rE,ij} \hat{\Psi}_{Bl,ij}$ çarpımı 0 olacaktır. Bu durumda Eve'e yapay gürültü sinyali ulaşmayacağı için Bob ve Eve'in aynı CSI'ya sahip olduğu durumda gizlilik oranı en düşük değerinde olmuştur.

ICI olduğunda Bob ve Eve'deki SINR ifadeleri (59) ve (60)'ta verilmiştir.

$$SINR_{B,j} = \frac{S_{B,j}}{I_{B,j} + \sigma_{B,j}^2} \quad (59)$$

$$SINR_{E,j} = \frac{S_{E,j}}{I_{E,j} + N_j + \sigma_{E,j}^2} \quad (60)$$

Sinyal güçleri Bob için (61)'de ve Eve için (62)'de verilmiştir.

$$S_{B,j} = \sum_i \left(\gamma \beta \mathbf{P}_{rB,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T \right)^2, \text{ st. } i = j \quad (61)$$

$$S_{E,j} = \sum_i \left(\gamma \beta \mathbf{P}_{rE,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T \right)^2, \text{ st. } i = j \quad (62)$$

ICI güçleri Bob için (63)'te ve Eve için (64)'te verilmiştir.

$$I_{B,j} = \sum_i \left(\gamma \beta t_{ij} \mathbf{P}_{rB,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T \right)^2, \text{ st. } i \neq j \quad (63)$$

$$I_{E,j} = \sum_i \left(\gamma \beta t_{ij} \mathbf{P}_{rE,ij} (\hat{\mathbf{H}}_{B,ij})^T \right)^2, \text{ st. } i \neq j \quad (64)$$

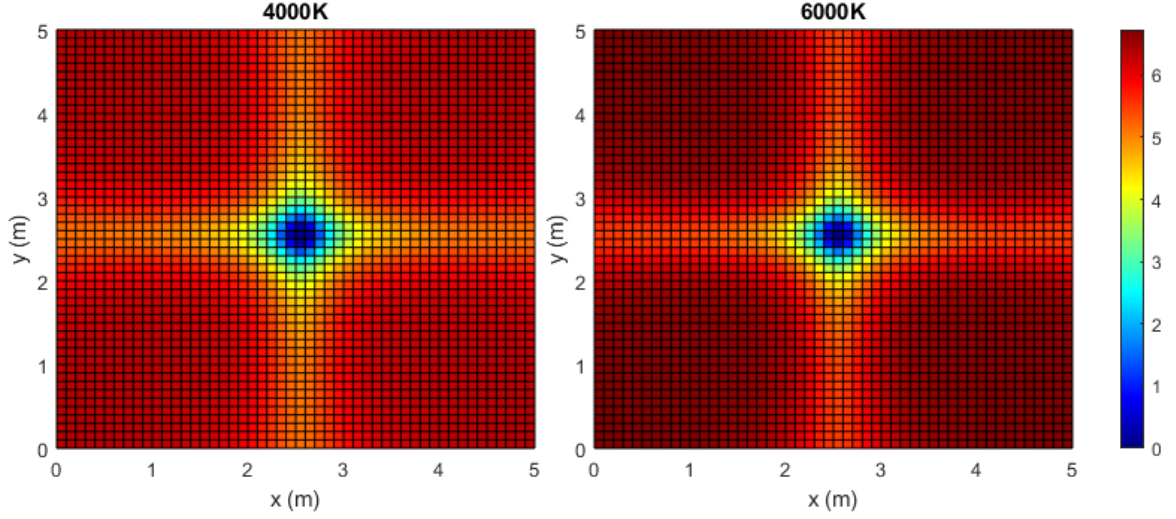
Eve'e gönderilen yapay gürültünün gücü ise (65)'te verilmiştir.

$$N_j = \sum_i (\gamma_N \beta t_{ij})^2 \sum_{l=1}^{N_a-1} (\mathbf{P}_{rE,ij} \hat{\Psi}_{Bl,ij})^2 \quad (65)$$

Gizlilik oranı hesabı (66)'da verilmiştir.

$$R_s = \sum_j \max \left\{ \frac{1}{2} \log \left(\frac{6SINR_{B,j} + 3\pi e}{\pi e SINR_{E,j} + 3\pi e} \right), 0 \right\} \quad (66)$$

4000K ve 6000K renk sıcaklıklarında ortam aydınlatması için gizlilik oranı sonuçları Şekil 20’de ve Tablo 13’te verilmiştir.



Şekil 20. MISO VLC’de ICI varken AN tekniği gizlilik oranı sonuçları

Tablo 13. MISO VLC’de AN tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olduğunda hesaplanan gizlilik oranları

Renk sıcaklığı	Gizlilik oranı (bit/kanal kullanımı)	
	Maksimum	Ortalama
4000K	6.3790	5.8102
6000K	6.7295	6.1769

AN tekniğinde Tablo 12 ve Tablo 13’teki sonuçlar kıyaslandığında maksimum gizlilik oranı her iki renk sıcaklığı için ICI olduğunda yaklaşık olarak 4 bit/kanal kullanımı düşmektedir.

2.2.3.2. MISO VLC'de NS Tekniği

Vericiden çıkan sinyal $\mathbf{x}_{ij}$ 'nin ifadesi (67)'de verilmektedir.

$$\mathbf{x}_{ij} = \beta \mathbf{w}_{ij} b_i \quad (67)$$

$\mathbf{w}_{ij}$ hüzmleme vektörünü ifade eder ve (68)'de verilmiştir.

$$\mathbf{w}_{ij} = t_{ij} \Psi_{E,ij} \Psi_{E,ij}^T \mathbf{H}_{B,ij} \quad (68)$$

$\Psi_{E,ij}$ Eve'in kanal kazanç vektörü $\mathbf{H}_{E,ij}$ 'nin ortonormal matrisini ifade etmektedir. $\mathbf{H}_{B,ij}$ ise Bob'un kanal kazanç vektörünü temsil etmektedir. t_{ij} ise $|\mathbf{w}_{ij}| \leq 1$ şartını sağlayan bir sabit sayıdır.

Bob ve Eve'de alınan sinyallerin ifadesi sırasıyla (69) ve (70)'te verilmiştir.

$$y_{B,j} = \beta \sum_i b_i \mathbf{P}_{r_{B,ij}}^T \mathbf{w}_{ij} + z_{B,j} \quad (69)$$

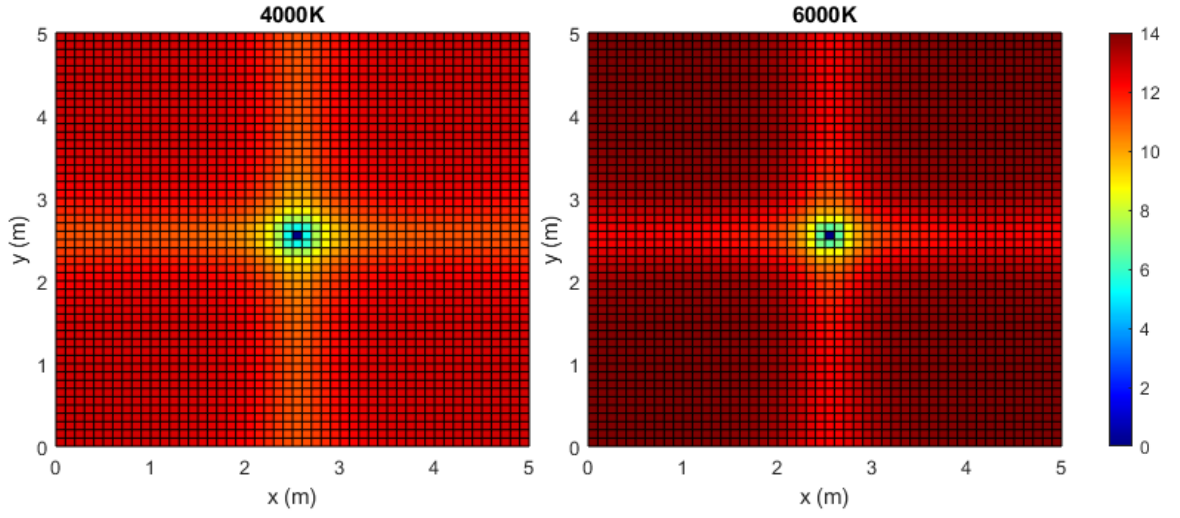
$$y_{E,j} = \beta \sum_i b_i \mathbf{P}_{r_{E,ij}}^T \mathbf{w}_{ij} + z_{E,j} \quad (70)$$

ICI olmadığında Bob ve Eve'deki SNR ifadeleri sırasıyla (71) ve (72)'de verilmiştir.

$$SNR_{B,j} = \frac{\sum_i \beta^2 (\mathbf{P}_{r_{B,ij}}^T \mathbf{w}_{ij})^2}{\sigma_{B,j}^2} \quad (71)$$

$$SNR_{E,j} = \frac{\sum_i \beta^2 (\mathbf{P}_{r_{E,ij}}^T \mathbf{w}_{ij})^2}{\sigma_{E,j}^2} \quad (72)$$

Gizlilik oranı (30) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Gizlilik oranı sonuçları Şekil 21'de ve Tablo 14'te verilmektedir.



Şekil 21. Çok renkli MISO VLC’de ICI yokken NS tekniği gizlilik oranı sonuçları

Tablo 14. Çok renkli MISO VLC’de NS tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olmadığında hesaplanan gizlilik oranları

Renk sıcaklığı	Gizlilik oranı (bit/kanal kullanımı)	
	Maksimum	Ortalama
4000K	12.8428	12.1948
6000K	14.0181	13.3683

NS tekniğinde, AN tekniğinde olduğu gibi gizlilik oranı sonuçları Bob ile Eve’in aynı konumda olduğu durumda, Şekil 21’den de görüleceği üzere, en düşük değerinde olmuştur. (2.5, 2.5, 0.85) konumunda Bob ve Eve aynı CSI’lara sahip olduğu için ortonormal matrisleri de $\Psi_{B,ij} = \Psi_{E,ij}$ olarak birbirine eşit olmuştur. (68)’de $w_{ij} = 0$ olacağı için bu konumda Bob ve Eve’e bilgi sinyali ulaşamamıştır. ICI olmadığında NS tekniğinde AN tekniğine göre gizlilik oranı yaklaşık olarak 3 bit/kanal kullanımı daha yüksek bulunmuştur.

ICI olduğunda Bob ve Eve’deki SINR ifadeleri sırasıyla (73) ve (74)’te verilmiştir.

$$SINR_{B,j} = \frac{S_{B,j}}{I_{B,j} + \sigma_{B,j}^2} \quad (73)$$

$$SINR_{E,j} = \frac{S_{E,i}}{I_{E,j} + \sigma_{E,j}^2} \quad (74)$$

Bob ve Eve'de sinyal güçleri (75) ve (76)'da verilmiştir.

$$S_{B,j} = \beta^2 (\mathbf{P}_{rB,ij}^T \mathbf{w}_{ij})^2, \text{ st. } i = j \quad (75)$$

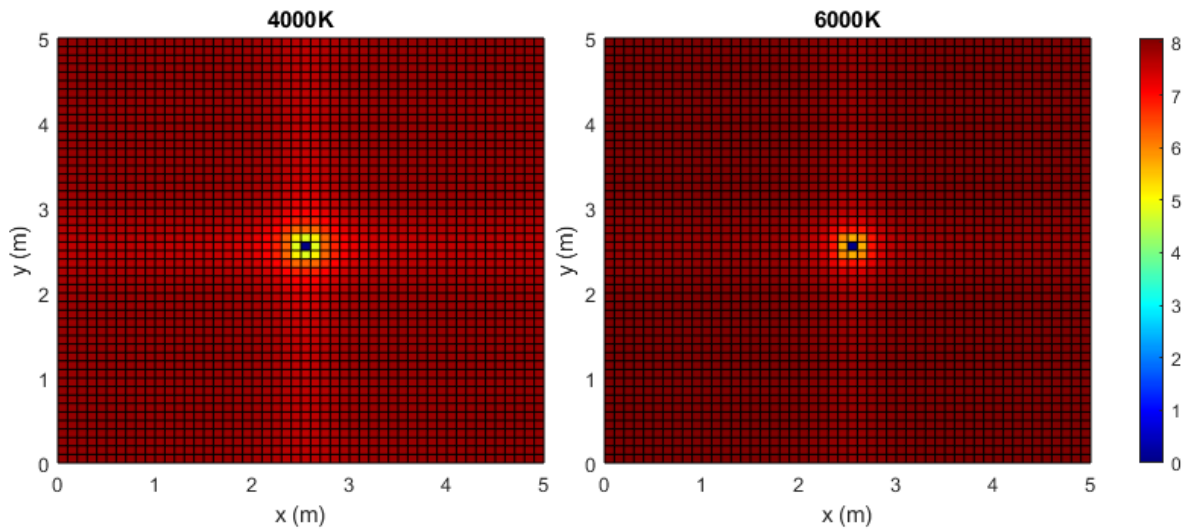
$$S_{E,j} = \beta^2 (\mathbf{P}_{rE,ij}^T \mathbf{w}_{ij})^2, \text{ st. } i = j \quad (76)$$

Bob ve Eve'de ICI güçleri (77) ve (78)'de verilmiştir.

$$I_{B,j} = \sum_i (\beta \mathbf{P}_{rB,ij}^T \mathbf{w}_{ij})^2, \text{ st. } i \neq j \quad (77)$$

$$I_{E,j} = \sum_i (\beta \mathbf{P}_{rE,ij}^T \mathbf{w}_{ij})^2, \text{ st. } i \neq j \quad (78)$$

Gizlilik oranı (66)'da verilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır. 4000K ve 6000K renk sıcaklığında oda aydınlatması için gizlilik oranı sonuçları Şekil 22'de ve Tablo 15'te verilmiştir.

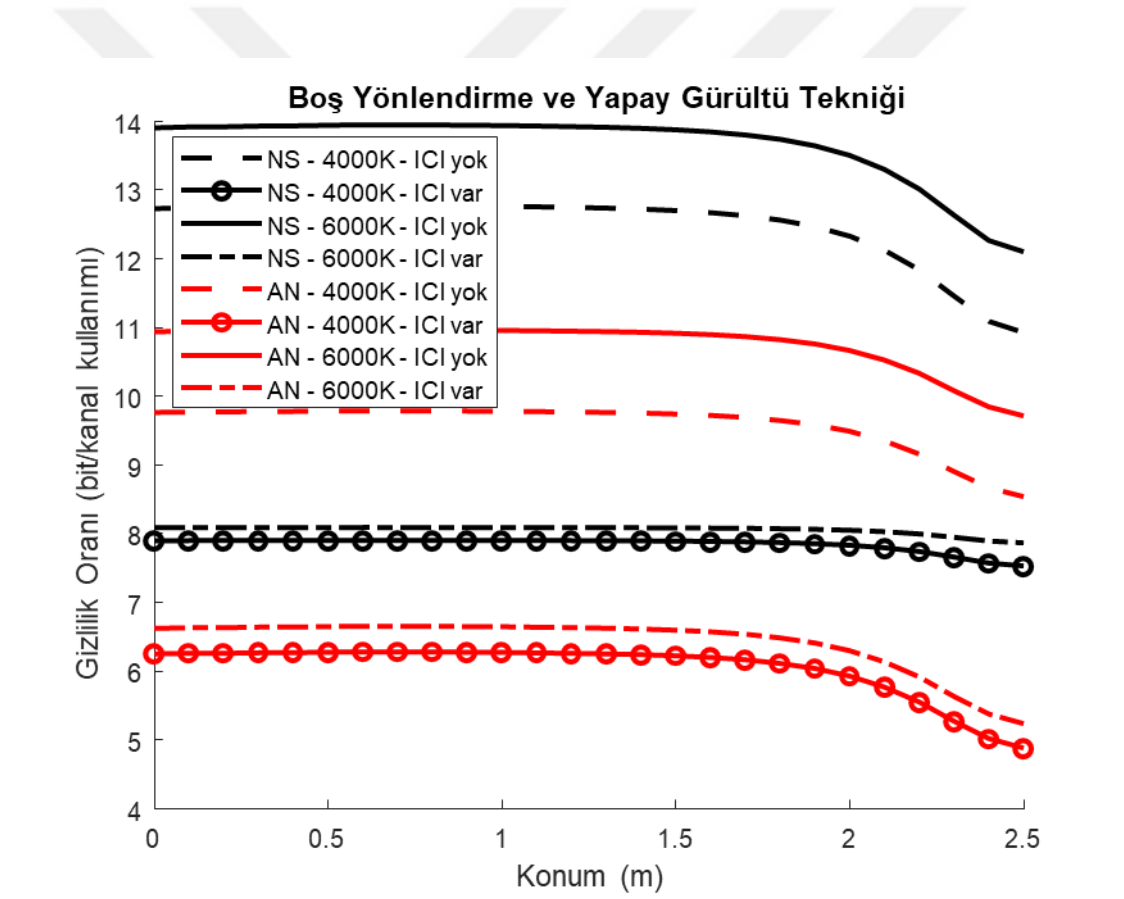


Şekil 22. Çok renkli MISO VLC'de ICI varken NS tekniği gizlilik oranı sonuçları

Tablo 15. Çok renkli MISO VLC’de NS tekniği uygulandığında ve ICI etkisi olduğunda hesaplanan gizlilik oranları

Renk sıcaklığı	Gizlilik oranı (bit/kanal kullanımı)	
	Maksimum	Ortalama
4000K	7.8977	7.7654
6000K	8.0859	8.0052

Tüm sonuçlar Şekil 23’te $x = 1.4m$ ve $y = 0:0.1:2.5m$ konum aralığı için iki boyutlu olarak çizdirilmiştir.



Şekil 23. Tüm gizlilik oranı sonuçları

Grafikte yatayda y konumu, dikeyde ise belirli konuma karşılık hesaplanan gizlilik oranı değeri bit/kanal kullanımı cinsinden gösterilmektedir. Siyah renkle gösterilen sonuçlar NS tekniğini, kırmızı renkle gösterilenler ise AN tekniğini temsil etmektedir. Burada

görülebileceği üzere, NS tekniğinde AN tekniğine kıyasla daha yüksek bir gizlilik oranı elde edilmektedir. Ortam aydınlatmasında ise, 6000K renk sıcaklığında, 4000K renk sıcaklığına oranla daha yüksek gizlilik oranı elde edilmektedir. ICI göz ardı edildiğinde her iki PLS tekniğinde de en yüksek gizlilik oranı sonuçlarına ulaşılmaktadır.



3. TARTIŞMA, SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tek renkli MISO VLC sistemde PLS tekniği olarak literatürde ilk olarak AN ve NS teknikleri kullanılmıştır [17]. Bu çalışmada, tek renkli ve çok renkli VLC sistemde verici ve alıcı denklemleri SISO ve MISO için verilmektedir. MISO VLC sistemde, AN ve NS tekniklerin kullanıldığı ve ICI etkisinin göz ardı edildiği VLC sistem için gizlilik oranı sonuçları hesaplanmış ve bildiri olarak sunulmuştur [42]. Çok renkli MISO VLC sistemlere ICI etkisi eklenerek gizli dinleyicinin her konumu için gizlilik oranı hesaplanmıştır. 4000K ortam aydınlatmasında AN tekniği MISO VLC sisteme uygulandığında; ortamda ICI yokken 9.5977 bit/kanal kullanımı olan maksimum gizlilik oranı, ICI etkisi eklendiğinde 6.3790 bit/kanal kullanımı olmuştur. 6000K ortam aydınlatmasında AN tekniği MISO VLC sisteme uygulandığında; ortamda ICI yokken 10.7484 bit/kanal kullanımı olan maksimum gizlilik oranı, ICI etkisi eklendiğinde 6.7295 bit/kanal kullanımı olmuştur. 4000K ortam aydınlatmasında NS tekniği MISO VLC sisteme uygulandığında; ortamda ICI yokken 12.8428 bit/kanal kullanımı olan maksimum gizlilik oranı, ICI etkisi eklendiğinde 7.8977 bit/kanal kullanımı olmuştur. 6000K ortam aydınlatmasında NS tekniği MISO VLC sisteme uygulandığında; ortamda ICI yokken 14.0181 bit/kanal kullanımı olan maksimum gizlilik oranı, ICI etkisi eklendiğinde 8.0859 bit/kanal kullanımı olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralandığı gibidir:

- ICI olmadığında yeşil renk optik filtreden geçerek PD’de alınan SNR, diğer PD’lerdeki SNR’lerden daha yüksek olarak hesaplanmıştır. ICI etkisi hesaplamalara dahil edildiğinde ise en yüksek SINR’ye mavi renk optik filtreden geçerek PD’de alınan sinyalde ulaşılmıştır.
- NS tekniğinde, AN tekniğine kıyasla daha yüksek gizlilik oranı elde edilmiştir. Ancak NS tekniğinin uygulanabilmesi için gizli dinleyicinin CSI’sının vericide bilinmesi gerekir.
- Gizlilik oranı, gizli dinleyicinin alıcıdan en uzakta olduğu oda köşelerinde en yüksek değerinde olmuştur. Gizli dinleyicinin merkezde yani alıcıya en yakın olduğu konumda ise gizlilik oranı en düşük değerinde bulunmuştur.
- NS ve AN tekniklerinde ICI etkisi olmadığında, olduğu duruma göre daha yüksek gizlilik oranı elde edilmiştir. Ancak, ICI etkisi, çok renkli VLC

sistemlerde kaçınılmaz bir durum olduğu için gizlilik hesaplamalarında göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, ICI'dan kaynaklanan gizlilik oranı kaybını azaltmak için alıcılarda kullanılan filtrelerde değışiklik yapılarak iyileştirme yapılması sağlanabilir.



4. KAYNAKLAR

1. Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., ve Zhang, J. C., What will 5G be?, IEEE Journal on selected areas in communications, 32,6 (2014) 1065-1082.
2. Pirinen, P., A brief overview of 5G research activities, 1. International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity, Kasım 2014, Levi, Finlandiya, 17-22.
3. Tsonev, D., Videv, S., ve Haas, H., Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network, Optics express, 23,2 (2015) 1627-1637.
4. Kishi, T., Tanaka, H., Umeda, Y., ve Takyu, O., A high-speed LED driver that sweeps out the remaining carriers for visible light communications, Journal of Lightwave Technology, 32,2 (2013) 239-249.
5. Lin, T. C., Chen, Y. T., Yin, Y. F., You, Z. X., Kao, H. Y., Huang, C. Y., ... ve Huang, J. J., Large-signal modulation performance of light-emitting diodes with photonic crystals for visible light communication, IEEE Transactions on Electron Devices, 65,10 (2018) 4375-4380.
6. Arfaoui, M. A., Soltani, M. D., Tavakkolnia, I., Ghrayeb, A., Safari, M., Assi, C. M., ve Haas, H., Physical layer security for visible light communication systems: A survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22,3 (2020) 1887-1908.
7. Liang, Y., Poor, H. V., ve Shamai, S., Physical layer security in broadcast networks, Security and Communication Networks, 2,3 (2009) 227-238.
8. Blinowski, G., Security issues in visible light communication systems, IFAC-PapersOnLine, 48,4 (2015) 234-239.
9. Classen, J., Chen, J., Steinmetzer, D., Hollick, M., ve Knightly, E., The spy next door: Eavesdropping on high throughput visible light communications, 2. International Workshop on Visible Light Communications Systems, Eylül 2015, New York, NY, Amerika Birleşik Devletleri, 9-14.
10. Rohner, C., Raza, S., Puccinelli, D., ve Voigt, T., Security in visible light communication: Novel challenges and opportunities, Sensors & Transducers Journal, 192,9 (2015) 9-15.
11. Yener, A., ve Ulukuş, S., Wireless physical-layer security: Lessons learned from information theory, Proceedings of the IEEE, 103,10 (2015) 1814-1825.
12. Yang, N., Wang, L., Geraci, G., El Kashlan, M., Yuan, J., ve Di Renzo, M., Safeguarding 5G wireless communication networks using physical layer security, IEEE Communications Magazine, 53,4 (2015) 20-27.

13. Bilski, T., New threats and innovative protection methods in wireless transmission systems, Journal of Telecommunications and Information Technology, 3 (2014), 26-33.
14. Wang, D., Bai, B., Zhao, W., ve Han, Z., A survey of optimization approaches for wireless physical layer security, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21,2 (2018) 1878-1911.
15. R. Shaaban ve S. Faruque, A survey of indoor visible light communication power distribution and color shift keying transmission, 2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), 2017, Lincoln, NE, Amerika Birleşik Devletleri, 149-153.
16. Elgala, H., Mesleh, R., ve Haas, H., An LED model for intensity-modulated optical communication systems, IEEE Photonics Technology Letters, 22,11 (2010) 835-837.
17. Mostafa, A., ve Lampe, L., Physical-layer security for indoor visible light communications, In 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), Haziran 2014, Sidney, Avustralya, 3342-3347.
18. Mostafa, A., ve Lampe, L., Securing visible light communications via friendly jamming, IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Aralık 2014, Austin, TX, Amerika Birleşik Devletleri, 524-529.
19. Le Minh, H., Pham, A. T., Ghassemlooy, Z., ve Burton, A., Secured communications-zone multiple input multiple output visible light communications, IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Aralık 2014, Austin, TX, Amerika Birleşik Devletleri, 505-511.
20. Mostafa, A., ve Lampe, L., Pattern synthesis of massive LED arrays for secure visible light communication links, IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), Haziran 2015, Londra, İngiltere, 1350-1355.
21. Chow, C. W., Liu, Y., Yeh, C. H., Chen, C. Y., Lin, C. N., ve Hsu, D. Z., Secure communication zone for white-light LED visible light communication, Optics Communications, 344 (2015) 81-85.
22. Yin, L., ve Haas, H., Physical-layer security in multiuser visible light communication networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 36,1 (2017) 162-174.
23. Yeşilkaya, A., Coğalan, T., Erküçük, S., Sadi, Y., Panayırıcı, E., Haas, H., ve Poor, H. V., Physical-layer security in visible light communications, 2. 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), Mart 2020, Porto, Portekiz, 1-5.
24. Su, N., Panayırıcı, E., Koca, M., Yeşilkaya, A., Poor, H. V., ve Haas, H., Physical layer security for multi-user MIMO visible light communication systems with generalized space shift keying, IEEE Transactions on Communications, 69,4 (2021) 2585-2598.

25. Wang, H., ve Kim, S., Novel Soft Decoding Algorithm of RLL Codes for Secure Physical-Layer Visible Light Communications, 3. International Conference on Future Internet of Things and Cloud, Ağustos 2015, Roma, İtalya, 760-764.
26. Lu, H., Zhang, L., Chen, W., ve Wu, Z., Design and analysis of physical layer security based on ill-posed theory for optical OFDM-based VLC system over real-valued visible light channel, IEEE Photonics Journal, 8,6 (2016) 1-19.
27. Mukherjee, A., Secret-key agreement for security in multi-emitter visible light communication systems, IEEE Communications Letters, 20,7 (2016) 1361-1364.
28. Shen, H., Deng, Y., Xu, W., ve Zhao, C., Secrecy-oriented transmitter optimization for visible light communication systems, IEEE Photonics Journal, 8,5 (2016) 1-14.
29. Shi, G., Li, Y., Cheng, W., Gao, X., ve Zhang, W., An artificial-noise-based approach for the secrecy rate maximization of MISO VLC wiretap channel with multi-eves, IEEE Access, 9 (2020) 651-659.
30. Ma, S., Dong, Z. L., Li, H., Lu, Z., ve Li, S., Optimal and robust secure beamformer for indoor MISO visible light communication, Journal of Lightwave Technology, 34,21 (2016) 4988-4998.
31. Liu, X., Wei, X., Guo, L., Liu, Y., ve Zhou, Y., A new eavesdropping-resilient framework for indoor visible light communication, IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Aralık 2016, Washington, DC, Amerika Birleşik Devletleri, 1-6.
32. Mostafa, A., ve Lampe, L., Optimal and robust beamforming for secure transmission in MISO visible-light communication links, IEEE Transactions on Signal Processing, 64,24 (2016) 6501-6516.
33. Liang, S., Fang, Z., Sun, G., ve Zhang, J., A physical layer security approach based on optical beamforming for indoor visible light communication, IEEE Communications Letters, 24,10 (2020) 2109-2113.
34. Zhao, X., ve Sun, J., Physical-layer security for mobile users in NOMA-enabled visible light communication networks, IEEE Access, 8 (2020) 205411-205423.
35. Qian, L., Chi, X., Zhao, L., ve Chaaban, A., Secure visible light communications via intelligent reflecting surfaces, ICC 2021-IEEE International Conference on Communications, Haziran 2021, 1-6.
36. Ding, J., Chih-Lin, I., Wang, J., Yang, H., ve Wang, L., Multiple Optical Beam Switching for Physical Layer Security of Visible Light Communications, IEEE Photonics Journal, 14,1 (2021) 1-9.
37. Saifaldeen, D. A., Ciftler, B. S., Abdallah, M. M., ve Qaraqe, K. A., DRL-Based IRS-Assisted Secure Visible Light Communications, IEEE Photonics Journal, 14,6 (2022) 1-9.

38. Chen, B., Zhang, L., ve Lu, H., High security differential chaos-based modulation with channel scrambling for WDM-aided VLC system, IEEE Photonics Journal, 8,5 (2016) 1-13.
39. Soderi, S., Enhancing security in 6G visible light communications, 2. 6G wireless summit (6G SUMMIT), Mart 2020, Levi, Finlandiya, 1-5.
40. Soderi, S., ve De Nicola, R., 6G Networks Physical Layer Security Using RGB Visible Light Communications, IEEE Access, 10 (2021) 5482-5496.
41. Soderi, S., Brighente, A., Turrin, F., ve Conti, M., VLC Physical Layer Security through RIS-aided Jamming Receiver for 6G Wireless Networks, arXiv preprint (2022).
42. Çetindere, B., Albayrak, C., ve Türk, K., Physical Layer Security For Indoor Multicolor Visible Light Communication, 30. Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mayıs 2022, Safranbolu, Türkiye, 1-4.
43. Roufs, J. A. J., ve Blommaert, F. J. J., Temporal impulse and step responses of the human eye obtained psychophysically by means of a drift-correcting perturbation technique, Vision Research, 21,8 (1981) 1203-1221.
44. Lee, K., Park, H., ve Barry, J. R., Indoor channel characteristics for visible light communications, IEEE communications letters, 15,2 (2011) 217-219.
45. URL-1, <https://apps.automeris.io/wpd/> 17 Ocak 2023.
46. URL-2, <https://andi-siess.de/rgb-to-color-temperature/> 17 Ocak 2023.
47. URL-3, <https://cree-led.com/media/documents/XLamp-XMLDCL.pdf> 17 Ocak 2023.
48. He, G., ve Zheng, L., A model for LED spectra at different drive currents, Chinese Optics Letters, 8,11 (2010) 1090-1094.
49. Ge, P., Liang, X., Wang, J., Zhao, C., Gao, X., ve Ding, Z., Optical filter designs for multi-color visible light communication, IEEE Transactions on Communications, 67,3 (2018) 2173-2187.
50. Wyner, A. D., The wire-tap channel, Bell system technical journal, 54,8 (1975) 1355-1387.
51. X. Chen, D. W. K. Ng, W. H. Gerstacker ve H. Chen, A Survey on Multiple-Antenna Techniques for Physical Layer Security, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19,2 (2017) 1027-1053.
52. Cho, S., Chen, G., ve Coon, J. P., Securing visible light communication systems by beamforming in the presence of randomly distributed eavesdroppers, IEEE Transactions on Wireless Communications, 17,5 (2018) 2918-2931.

ÖZGEÇMİŞ

Besra ÇETİNDERE, ilk ve orta öğrenimini Leyla Kahraman Sevim Ertenü İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Dr. İlhami Tankut Anadolu Lisesi ve Aldemir Atilla Konuk Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2019 yılında Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği lisans programından mezun oldu. 2019 yılında Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans programına başladı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans programına başladı. 2020 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

Bu tez çalışması süresince alınan sonuçlar ile hazırlanan “Kapalı Mekân Çok Renkli Görünür Işık Haberleşmesi İçin Fiziksel Katman Güvenliği” isimli bildiri 2022 yılında 30. SIU (30th Signal Processing and Communication Conference) konferansında çevrimiçi ortamda sözlü olarak sunulmuştur.