

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TRABZON**

**Bu belge güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.**

Doğrulama Kod: B1B9AABC-643D-4CF9-ABDD-6648ECC4BC1C

Doğrulama Adres: <https://www.turkiye.gov.tr/karadeniz-teknik-universitesi-ebys>





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**



## ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans programı kapsamında hazırlanan bu tezde, renk kaydırmalı anahtarlama modülasyonunun çok renkli görünür ışık haberleşmesinin sahip olduğu bozucu etkiler altındaki performansı ve bu etkilerin giderilmesine yönelik oluşturulan yapıların başarımları incelenmiştir.

Öncelikle sunulan tez çalışmasında danışmanlığımı üstlenen, her zaman elimden gelenin en iyisini yapmam konusunda beni teşvik eden, yardımını ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Kadir TÜRK'e teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca lisansüstü çalışmalarım boyunca bilgilerimi benimle paylaşarak çalışmalarına destek olan hocalarım Arş. Gör. Dr. Cenk ALBAYRAK, Arş. Gör. Hakan ERDÖL ve diğer tüm Haberleşme Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (HaTAL) ekibine teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Başta Oğuzhan BAŞER ve Serkan VELA olmak üzere Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında lisansüstü çalışmalarımı yürüten arkadaşlarıma gerek çalışmalarına verdiği katkılar gerekse güzel dostlukları ve hoş sohbetleri için teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta annem Ayşe, babam Embiya KÜÇÜK olmak üzere sevgili ablam Huri, ağabeylerim İsmail, Hamit, kardeşim Cemal KÜÇÜK ve akademik başarıları ile örnek aldığım amcam Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Ali KÜÇÜK

Trabzon 2021



## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kapalı Mekan Görünür Işık Haberleşmesi için Renk Kaydırmalı Anahtarlama Modülasyonunun İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. 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. 11/01/2021

Mehmet Ali KÜÇÜK



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa No</b>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. CSK Modülasyonu .....	4
1.2.1. Renk Kalibrasyonu Yöntemi .....	7
1.3. VLC Sistem Modeli.....	7
1.3.1. Vericiler .....	8
1.3.2. Optik Filtreler .....	10
1.3.3. Alıcılar .....	11
1.3.4. Kanal Modellenmesi.....	12
1.3.5. Kanalın Oluşturduğu Bozucu Etkiler .....	15
1.3.5.1. Isıl ve Atış Gürültüsü.....	15
1.3.5.2. Renk Kanalları Arasındaki Dengesizlik .....	16
1.3.5.3. Renk Kanalları Arasındaki Girişim .....	17
1.3.5.4. Çok Yolluluk .....	18
1.4. Filtre Bankası Yapısı .....	18
1.5. Denkleştiriciler .....	20
1.5.1. Denkleştirici Yapıları .....	21
1.5.1.1. Doğrusal Enine Denkleştirici .....	22
1.5.1.2. Karar Geri Beslemeli Enine Denkleştirici .....	22
1.5.2. Uyarlanır Denkleştirici Eğitim Algoritmaları.....	23
1.5.2.1. En Küçük Ortalama Kareler Algoritması .....	24



1.5.2.2. Özyinelemeli En Küçük Kareler Algoritması .....	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	27
2.1. Giriş .....	27
2.2. Simülasyon Çalışmalarında Kullanılan Kanal Modelleri .....	29
2.2.1. Tekli Verici LED Kanal Modeli .....	30
2.2.2. Çoklu Verici LED Kapalı Mekan Kanal Modeli .....	31
2.3. Önerilen Uyarlanır Denkleştirici Yapısı .....	37
2.4. AWGN Kanal İçin Sayısal Sonuçlar .....	38
2.5. Tekli Verici LED Kanal Modeli İçin Performans Analizleri .....	39
2.5.1. Maviye Kayma Özelliğinin Neden Olduğu Renk Girişimi Etkileri İçin Sayısal Sonuçlar .....	39
2.5.2. Filtre Bankası Yapısı İçin Sayısal Sonuçlar .....	42
2.5.3. Renk Kalibrasyonu ve Uyarlanır Denkleştirici Yöntemleri İçin Sayısal Sonuçlar .....	45
2.6. Çoklu Verici LED Kapalı Mekan Modeli İçin Performans Analizleri .....	47
2.6.1. Maviye Kayma Özelliğinin Toplamsal Etkileri İçin Sayısal Sonuçlar .....	48
2.6.2. Çok Yolluluk Etkileri İçin Sayısal Sonuçlar .....	53
2.6.3. Renk Seçici Ortamlar İçin Sayısal Sonuçlar .....	55
3. SONUÇLAR .....	58
4. ÖNERİLER .....	60
5. KAYNAKÇA .....	61
6. EKLER .....	65
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KAPALI MEKAN GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ İÇİN RENK KAYDIRMALI  
ANAHTARLAMA MODÜLASYONUNUN İNCELENMESİ

Mehmet Ali KÜÇÜK

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Kadir TÜRK  
2020, 66 Sayfa

Bu tez çalışmasında, optik filtrelerin maviye kayma özelliklerinin neden olduğu çoklu renk girişimi ve çok yolluluktan kaynaklı semboller arası girişim etkilerinin renk kaydırmalı anahtarlama modülasyonunun (Color Shift Keying, CSK) performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir ve bu etkilerin bastırılması için yeni bir uyarlanır denkleştirici yapısı önerilmiştir. Literatürde ve burada önerilen yöntemlerin BER performansları kapsamlı simülasyonlarla elde edilmiş, ardından önerilen yöntemin başarımının değerlendirilmesi için kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Yapılan simülasyon çalışmalarında ilk olarak optik filtrelerin geçiş bandının ve ışınların geliş açısının neden olduğu çok renkli görünür ışık kanalının yapısal değişkenliği CSK modülasyonu için incelenmiştir. Daha sonra IEEE 802.15.7 standardında tanımlanan renk kalibrasyonu, literatürde kullanılan filtre bankası yapısı ve bu çalışmada önerilen uyarlanır denkleştirici yapısı verici gücüne göre elde ettikleri ortalama BER performansı ve oluşturulan kapalı mekan modeli içerisinde elde ettikleri BER dağılımları açısından karşılaştırılmıştır. Son olarak CSK modülasyonunun başarımı yüksek anahtarlama hızları ve renk seçici ortamlarda incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Görünür ışık haberleşmesi, Renk kaydırmalı anahtarlama, Çoklu renk girişimi, Maviye kayma, Semboller arası karışım, Renk kalibrasyonu, Filtre bankası, Uyarlanır denkleştirici



Master Thesis

SUMMARY

ANALYSIS OF COLOR SHIFT KEYING MODULATION FOR INDOOR VISIBLE  
LIGHT COMMUNICATION

Mehmet Ali KÜÇÜK

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering Graduate Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir TÜRK

2020, 66 Pages

In this thesis, the effects of multi-color interference and inter-symbol interference on the performance of color shift keying modulation, caused by the blue shift properties of optical filters and multipath, were analyzed, and to suppress these effects, a novel adaptive equalizer structure was proposed. BER performances of the methods in the literature and the one proposed herein were obtained by extensive simulations, then comprehensive comparisons were drawn to evaluate the capability of the proposed method.

In the simulation studies, firstly, the structural variability in the multi-color visible light channel for CSK, caused by the passband edges of the optical filters and the receiver positions, was analyzed. Also, the Color Calibration method identified on IEEE 802.15.7 standard, the Filter Bank structure used in literature, and adaptive equalizer structure proposed in this study were compared in terms of the average BER performance according to transmitter power, and the BER distribution in the created indoor model. Finally, CSK capability was analyzed at high switching frequency and on color selective environment.

**Keywords:** Visible light communication, Color shift keying, Multi-color interference, Blue shift, Inter-symbol interference, Color calibration, Filter bank, Adaptive equalizer





## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Şekil 1.1. CSK modülasyonu blok diyagramı .....	5
Şekil 1.2. Standartta belirtilen (110, 001, 000) renk bandı kombinasyonu ve 4-CSK sembol noktaları.....	5
Şekil 1.3. 16-CSK modülasyonu sembol noktaları.....	6
Şekil 1.4. LED güç spektral yoğunluğu.....	8
Şekil 1.5. Lambert indeksine göre ışınma şekli.....	9
Şekil 1.6. Optik filtrelerin sahip olduğu maviye kayma etkisi .....	10
Şekil 1.7. Sarı boya için dalga boyu-yansıtıcılık değişimi [34] (solda), örnek bir odanın duvarlara yakın bir konumundaki kanal tepkeleri (sağda) .....	16
Şekil 1.8. Yüksek anahtarlama hızlarında çok renkli VLC kanalı .....	18
Şekil 1.9. Filtre bankası yapısı blok diyagramı .....	19
Şekil 1.10. Uyarlanırlar denkleştiricilerin sınıflandırılması [36].....	21
Şekil 1.11. Karar geri beslemeli denkleştirici yapısı .....	23
Şekil 1.12. LMS ve RLS algoritması MSE değişimleri .....	26
Şekil 2.1. Tek verici LED kullanılan model.....	30
Şekil 2.2. Çoklu verici LED kullanılan kapalı mekân modeli.....	31
Şekil 2.3. Kapalı mekan modelindeki LED ve PD konumları .....	32
Şekil 2.4. Örnek renk kanalı için 100 MHz anahtarlama hızında kanal tablalarına karşılık gelen alanlar.....	35
Şekil 2.5. Duvar boyalarının dalga boyuna göre yansıtıcılık değişimleri [34, 43].....	36
Şekil 2.6. Önerilen uyarlanırlar denkleştirici yapıları.....	37
Şekil 2.7. CSK modülasyonu SNR-BER performansı .....	38
Şekil 2.8. Optik filtrelerin farklı geliş açıları için 8-CSK performansı .....	41
Şekil 2.9. Filtre bankası yapısının farklı filtre sayıları için 8-CSK performansı.....	43



Şekil 2.10. Filtre bankası ve standart CSK yönteminin verici gücüne göre karşılaştırılması .....	44
Şekil 2.11. RLS denkleştirici ve renk kalibrasyonu yöntemlerinin 8 sembol uzunluğunda eğitim dizisi için SNR-BER değişimleri .....	46
Şekil 2.12. RLS denkleştirici ve renk kalibrasyonu yöntemlerinin 32 sembol uzunluğunda eğitim dizisi için SNR-BER değişimleri .....	47
Şekil 2.13. Renk kalibrasyonu ve RLS denkleştiricinin 18 dBm verici gücünde 4-CSK için elde ettikleri BER dağılımı .....	49
Şekil 2.14. Renk kalibrasyonu ve RLS denkleştiricinin 21,2 dBm verici gücünde 8-CSK için elde ettikleri BER dağılımı .....	50
Şekil 2.15. Renk kalibrasyonu ve RLS denkleştiricinin 26,7 dBm verici gücünde 16-CSK için elde ettikleri BER dağılımı .....	51
Şekil 2.16. Denkleştirici ve renk kalibrasyonu yöntemlerinin oda içerisindeki ortalama BER başarımları .....	52
Şekil 2.17. Farklı anahtarlama hızları için CSK modülasyonunun performansı .....	54
Şekil 2.18. Renk seçici ortam için 8-CSK performansı.....	55
Şekil 2.19. 160 MHz anahtarlama hızı için CSK modülasyonunun renk seçici ortamlardaki performansı .....	56



## TABLULAR DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Tablo 1.1. Renk kalibrasyonu için standartta belirtilen Walsh kodları [3].....	7
Tablo 2.1. LED Parametreleri [42].....	33
Tablo 2.2. Optik filtre parametreleri.....	33
Tablo 2.3. PD parametreleri .....	33
Tablo 2.4. Gürültü ile ilgili parametreler [41].....	34
Tablo 2.5. Denkleştirici parametreleri.....	37
Tablo 2.5. Kullanılan optik filtrelerin geçiş bandı sınırları .....	39
Tablo 2.6. Farklı geliş açıları ve optik filtreler için oluşan kanal matrisleri .....	40
Tablo 2.7. Farklı geliş açıları için filtre bankası yapısının kanal matrisleri .....	42
Ek Tablo 1. IEEE standartında tanımlanan renk bantları [3].....	65
Ek Tablo 2. Renk kalibrasyonu yöntemi için kullanılan 32 sembollük eğitim dizisi.....	65



## SEMBOLLER DİZİNİ

AWGN	: Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	: Bit Hata Oranı
$c$	: Işık Hızı
CSK	: Renk Kaydırmalı Anahtarlama
CIR	: Kanal Dürtü Yanıtı
DFE	: Karar Geri Beslemeli Denkleştirici
FDE	: Frekans Bölgesi Denkleştirici
FET	: Alan Etkili Transistör
FIR	: Sonlu Dürtü Yanıtı
fps	: Saniyedeki Çerçeve Sayısı
$h(t)$	: Birim Vuruş Tepkisi
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
IIR	: Sonsuz Dürtü Yanıtı
ISI	: Semboller Arası Girişim
$k$	: Boltzman Sabiti
LED	: Işık Yayan Diyot
LMS	: En Küçük Ortalama Kareler
LOS	: Görüş Hattı
$m$	: Lambert İndeksi
MSE	: Ortalama Karesel Hata
NLOS	: Görüş Hattı Dışında
OFDM	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
O-OFDM	: Optik Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
OOK	: Açma - Kapama Anahtarlama
PD	: Foto-dedektör
PSD	: Güç Spektral Yoğunluğu
RF	: Radyo Frekansı
RLS	: Özyinelemeli En Küçük Kareler
SER	: Sembol Hata Oranı
SINR	: Sinyal Girişim Artı Gürültü Oranı
VLC	: Görünür Işık Haberleşmesi



WDM : Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama

ZF : Sıfıra Zorlayıcı



# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Haberleşme genel olarak bilginin bir noktadan başka bir noktaya aktarılması olarak tanımlanabilir. İnsanlık geçmişten günümüze kadar haberleşmeye ihtiyaç duymuştur. Günün ihtiyaçlarına göre telgraf, radyo frekansında (Radio Frequency, RF) ve fiber optik hatlarda haberleşme gibi teknolojileri geliştiren insanlık, günümüzde çok sayıda kullanıcının yüksek hızlarda haberleşme ihtiyacını karşılayabilmek için farklı teknoloji arayışları içerisinde. Halihazırda kullanılan RF haberleşmesinde farklı amaçlar için ayrılarak lisanslanan frekans spektrumu yüksek miktarda kullanıcı için yetersiz kalmaktadır. Görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC) sahip olduğu lisanssız spektrum, elektromanyetik girişimden etkilenmeme, düşük maliyet ve aydınlatma ile haberleşmenin birlikte gerçekleştirilebilmesi gibi avantajları sayesinde RF haberleşmesi için güçlü bir tamamlayıcı ve alternatif teknoloji olarak öne çıkmaktadır [1-3].

VLC ışık kaynağının insan gözünün algılayamayacağı hızlarda anahtarlanarak aydınlatma ve bilgi aktarımının aynı anda gerçekleştirildiği sistemlere denir. İlk uygulamaları 20. yüzyılın sonlarına dayansa da [4] bu yıllarda yapılan çalışmalarda kullanılan floresan lambalarının anahtarlama hızlarının düşük olması nedeniyle yüksek haberleşme hızlarına ulaşılamamıştır. Işık yayan diyotlar (Light Emitting Diode, LED) yüksek hızlarda anahtarlanabilmesi, uzun kullanım ömrü, yüksek enerji verimliliği gibi özellikleri nedeniyle VLC için uygun elemanlar olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda LED teknolojisinde yaşanan gelişmeler ve LED'lerin aydınlatma sistemleri, araç farları gibi yerlerde kullanımının yaygınlaşması ile VLC'ye duyulan ilgi de büyük miktarda artış göstermiştir.

Aydınlatma sistemlerinde genellikle kullanılan beyaz ışık, LED'ler kullanılarak iki farklı yöntem ile üretilebilmektedir. Bunlarda ilki mavi LED'in üzerinde sarı fosfor tabakasının kaplanması yöntemidir. Bu yöntemde sarı fosfor tabakası mavi LED ışığını kırmızı ve yeşil ışığa dönüştürmektedir ve oluşan bu ışıklar mavi LED ışığı ile birleştiğinde beyaz ışık üretilmektedir. Düşük üretim maliyeti nedeniyle fosfor kaplamalı LED'ler ticari ürünlerde çoğunlukla kullanılırlar. Ancak fosfor etkisi nedeniyle bu tür LED'lerin anahtarlama hızları birkaç MHz ile sınırlı kalmaktadır [5]. Bir diğer yöntemde ise beyaz



ışığın üretilmesi için kırmızı, yeşil ve mavi ışık yayan LED'ler bir arada kullanılmaktadır. TriLED (TLED) olarak adlandırılan bu yapıda üretim maliyetinin artmasına rağmen anahtarlama hızı birkaç 10 MHz seviyesine çıkabilmektedir [6]. Anahtarlama hızlarının daha da arttırılmasına yönelik çalışmalarda ise mikro-LED adı verilen yapılar sayesinde 500 MHz anahtarlama hızlarına ulaşılmıştır [7, 8].

Anahtarlama hızlarındaki bu artış sayesinde [9] numaralı çalışmada açma-kapama anahtarlama (On-Off Keying, OOK) modülasyonu kullanılarak 1 Gbps gibi yüksek veri hızlarına ulaşılabilmektedir. Ancak yaklaşık 400 THz gibi oldukça geniş bir spektruma sahip olan VLC sistemlerinde tek renk ile haberleşme spektrumun verimsiz kullanılmasına neden olmaktadır. Spektrumun daha verimli kullanılabilmesi için çok renkli haberleşme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi olan dalga boyu bölmeli çoğullama (Wavelength Division Multiplexing, WDM) ile deneysel olarak [10] numaralı çalışmada 5.1 Gbps, [11] numaralı çalışmada ise 10 Gbps veri hızlarına ulaşılabilmektedir. Ancak bu yöntemde her bir renk bandı birbirinden bağımsız olarak modüle edildiğinden dolayı haberleşme sırasında renk kayması ve ışık titreşimi gibi problemler ortaya çıkmaktadır.

Diğer taraftan tek renkli haberleşmede LED'lerin anahtarlama hızlarının arttırılmasına yönelik yapılan çalışmalar her ne kadar haberleşme hızını arttırsa da çok yolluluktan kaynaklı semboller arası girişim (Inter Symbol Interference, ISI) etkilerinin de görülmesine neden olmaktadır. RF sistemlerinde bu problemin çözümüne yönelik dikgen frekans bölmeli çoğullama (Ortogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) ve denkleştirici yöntemleri geliştirilmiştir. OFDM yönteminde vericide gerçekleştirilen ters hızlı Fourier dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) nedeniyle gönderilecek semboller karmaşık değerde ve rastgele olmaktadır [12]. VLC sistemlerinde gönderilecek sembollerin gerçel ve pozitif değerli olma zorunluluğu nedeniyle OFDM yöntemi doğrudan bu sistemlere uygulanamaz. Gerçellik koşulunun sağlanması için Hermitian simetri yönteminin uygulandığı, pozitifliğin sağlanması için ise belirli bir DC seviyenin eklendiği DCO-OFDM gibi optik OFDM (O-OFDM) yöntemleri geliştirilmiştir [13]. Ancak O-OFDM yöntemlerinin çok renkli kanallarda paralel uygulanması sonucunda renk kayması gibi etkiler oluşmakta ve aydınlatma uygun şekilde gerçekleştirilememektedir. O-OFDM yöntemlerinin kullanılmadığı durumda ise kanalın oluşturduğu bozucu etkiler alıcıda oluşturulan filtre yapıları yardımıyla giderilmeye çalışılmaktadır [14, 15]. Denkleştirici olarak adlandırılan bu yapılar kanal dürtü yanıtının (Channel Impulse Response, CIR) tersini alacak şekilde oluştururlar.



Çok renkli görünür ışık haberleşmesinde aydınlatma kalitesinin korunabilmesi açısından IEEE 802.15.7 [3] standardında renk kaydırmalı anahtarlama (Color Shift Keying, CSK) modülasyonu tanımlanmıştır. Bu modülasyonda standartta belirtilen renk kanalları birbirine bağlı olacak şekilde modüle edilerek haberleşme esnasında ışık şiddeti ve renginin sabit olması sağlanmıştır. Bu açıdan çok renkli kapalı mekân haberleşme sistemleri için uygun bir modülasyon türü olarak görünen CSK'nın performans analizine ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir [16-18]. CSK modülasyonunu sembol hata oranının (Symbol Error Rate, SER) analitik olarak hesaplanmasına yönelik yapılan [16] numaralı ve CSK modülasyonunun QuadLED (QLED) kullanılarak gerçekleştirilmesine yönelik yapılan [17] numaralı çalışmalarda haberleşme kanalı toplanır beyaz Gauss gürültüsü (Additive White Gauss Noise, AWGN) olarak kabul edilmiştir. CSK sembol noktalarının optimizasyonuna yönelik yapılan [18] numaralı çalışmada ise haberleşme kanalı LED ve fotodetektör'ün (Photodetector, PD) karşılıklı olarak yerleştirildiği durumda alınan ölçüme göre 3x3 boyutunda bir matris olarak modellenmiştir. Ancak bu yöntemler çok renkli VLC kanalının sahip olduğu renk dengesizliği, renk girişimi ve özellikle optik filtrelerin sahip olduğu maviye kayma etkilerini temsil etmekte yetersiz kalmaktadır.

Maviye kayma optik filtrelerin geçiş bandının ışığın geliş açısının artışı ile alt dalga boyuna kayması olarak tanımlanabilir. [19] numaralı çalışmada maviye kayma etkilerinin çok renkli VLC uygulamalarındaki etkileri incelenerek farklı senaryolar için optik filtre sınırları optimize edilmiştir. Bu çalışmada optik filtrelerinin sınırlarının uygun olarak belirlenmesinin haberleşme performansı açısından önemli olduğu gösterilmiştir. Ancak oluşturulan senaryolar tek bir QLED ve PD ile gerçekleştirildiğinden dolayı pratik VLC uygulamalarını tam olarak temsil edememektedir. Yine maviye kayma etkilerinin giderilmesine yönelik yapılan [20] numaralı çalışmada alıcıda *Filtre bankası* olarak adlandırılan bir yapı oluşturulmuştur. Bu çalışmada alıcıda çok sayıda dar bantlı optik filtre ve PD kullanılmasını gerektiren filtre bankası yapısı sayesinde ışığın geliş açısına göre sinyal girişim artı gürültü oranının (Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR) sabit kaldığı gösterilmiştir. Ancak alıcı yapısı farklı olduğundan dolayı diğer sistemlerle karşılaştırılabilmesi için SINR yerine verici gücüne göre performans analizinin yapılması daha uygun olacaktır.

Literatürde VLC sistemlerinde denkleştirici kullanımına dair çalışmalar bulunmaktadır. [21] numaralı çalışmada farklı O-OFDM yöntemleri ile denkleştirici kullanımının farklı açılardan karşılaştırmaları gerçekleştirilmiş ve tek kutuplu M-PAM





modülasyonu ile kullanılan MMSE-DFE denkleştiricinin tüm OFDM yöntemlerine göre daha iyi optik güç verimliliğine sahip olduğu gösterilmiştir. VLC sistemlerinde ISI etkilerinin giderilmesine yönelik uyarlanır denkleştirici sistemlerinin incelendiği [22] numaralı çalışmada birkaç dal sayısına sahip basit denkleştiriciler kullanılarak bile 1 Gbps veri hızlarına ulaşılabileceği gösterilmiştir. Bu iki çalışmada tek renkli haberleşme için analizler gerçekleştirilmiştir. CSK modülasyonu için denkleştirici incelemesinin gerçekleştirildiği [23] numaralı çalışmada ise uyarlanır bir denkleştirici yapısı önerilerek sistemin SNR-SER analizi yapılmıştır. Ancak bu çalışmada optik filtrelerin maviye kayma etkileri ihmal edilerek sabit bir kanal matrisine göre incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada CSK modülasyonu için denkleştirici kullanımının uygun olduğu gösterilse de daha gerçekçi bir inceleme için haberleşme kanalının uygun şekilde modellenmesi önemlidir.

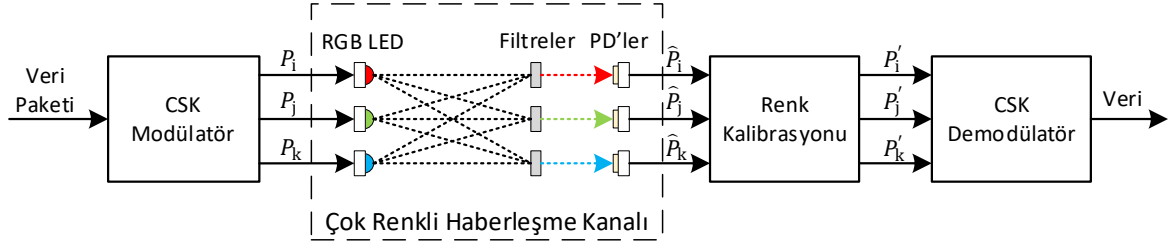
Bu çalışmada CSK modülasyonu için VLC kanalının oluşturduğu renk girişimi, renk dengesizliği, maviye kayma ve ISI etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Alıcı ile verici arasındaki geliş açısındaki farklılık, haberleşmenin gerçekleştirileceği kapalı mekânın duvar rengindeki farklılık ve anahtarlama hızındaki artış gibi farklı senaryolar için haberleşme simülasyonları gerçekleştirilerek CSK modülasyonun performansı elde edilmiştir. Ayrıca kanalın oluşturduğu bozucu etkilerin giderilmesine yönelik farklı yöntemlerin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi olan ve IEEE standardında tanımlanan renk kalibrasyonu yöntemi ile önerilen denkleştirici yapıları kanal kestirimi için kullanılan eğitim dizisi uzunluğuna göre, filtre bankası yöntemi ise alıcı yapısı farklı olduğundan dolayı verici gücüne göre elde ettiği başarımlar açısından diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır.

Bundan sonraki bölümlerde tez kapsamında yapılan çalışmaların anlaşılması açısından CSK modülasyonu, VLC kanal yapısı ve incelenen alıcı yapıları tanıtılmıştır.

## 1.2. CSK Modülasyonu

CSK, RGB LED'leri kullanarak aydınlatma sonucunda oluşan ışık şiddetinin ve renginin sabit olmasını garantileyen bir çok renkli VLC modülasyonudur. IEEE 802.15.7 standardında [3] tanımlanan CSK modülasyonunun blok diyagramı Şekil 1.1'de verilmiştir.

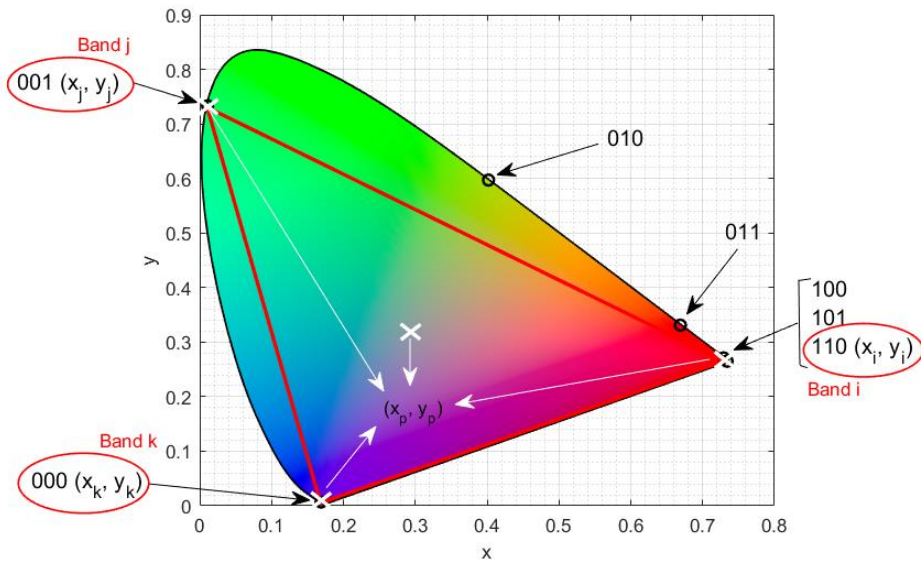




Şekil 1.1. CSK modülasyonu blok diyagramı

CSK modülasyonunun diğer çok renkli VLC modülasyonlarına göre en büyük avantajı daha önce belirtildiği gibi haberleşme esnasında aydınlatma şartlarını sağlayacak şekilde tasarlanmış olmasıdır. Bu şartların sağlanabilmesi için her bir LED'e gönderilecek işaret uygun olarak belirlenmeli, yani kullanılacak renk kanalları birbirine bağımlı olarak modüle edilmelidir.

Ek Tablo 1.1'de standartta tanımlanan 9 adet renk bandı verilmiştir. CSK modülasyonunda haberleşme sonucunda sabit renkli beyaz ışığın oluşturulabilmesi için bu renk bandları CIE 1931 renk uzayında bir üçgen oluşturacak şekilde seçilmeli ve sembol noktaları bu üçgenin içerisinde olacak şekilde yerleştirilmelidir. Buna göre seçilebilecek 7 adet renk bandı kombinasyonu bulunmaktadır ve bu farklı kombinasyonların seçimi sonucunda farklı sıcaklıklardaki beyaz ışık üretilebilmektedir. Şekil 1.2'de CSK modülasyonunda kullanılabilir örnek bir renk bandı kombinasyonu verilmiştir.



Şekil 1.2. Standartta belirtilen (110, 001, 000) renk bandı kombinasyonu ve 4-CSK sembol noktaları



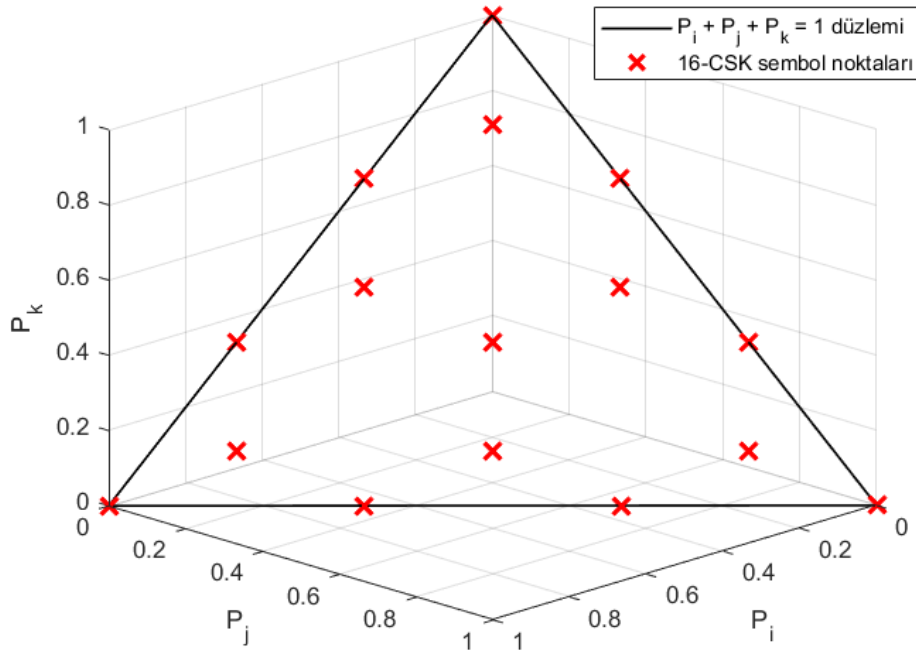
Kanal seçimi ve sembol noktaları CIE 1931 renk uzayında belirlendikten sonra (1.a), (1.b) ve (1.c) numaralı denklemler yardımıyla LED'lere gönderilecek ışık yoğunluğu bilgisi elde edilir.

$$x_p = P_i x_i + P_j x_j + P_k x_k \quad (1.a)$$

$$y_p = P_i y_i + P_j y_j + P_k y_k \quad (1.b)$$

$$1 = P_i + P_j + P_k \quad (1.c)$$

Burada  $x_p, y_p$  standartta belirlenen sembol noktalarının CIE 1931 renk uzayındaki koordinatlarını,  $x_{i,j,k}, y_{i,j,k}$  ise seçilen renk bandlarının merkez dalgaboyu koordinatlarını temsil etmektedir ve (1.c) bağıntısı yardımıyla haberleşme sonucunda oluşan ışık şiddetinin sabit olması sağlanır. Bu işlemler sonucunda LED'lere gönderilecek işaret  $\mathbf{s} = [P_i, P_j, P_k]^T$  olarak gösterilebilir. 16-CSK için sembol noktalarının ışık yoğunluğu uzayındaki konumları Şekil 1.3'te görselleştirilmiştir.



Şekil 1.3. 16-CSK modülasyonu sembol noktaları



### 1.2.1. Renk Kalibrasyonu Yöntemi

Çok renkli VLC uygulamalarında haberleşme kanalının renk dengesizliği ve renk girişimi gibi bozucu etkileri bulunmaktadır. Bu etkilerin giderilmesi için standartta renk kalibrasyonu yöntemi tanımlanmıştır. Bu yöntemde alıcıda kanal kestirimi yapılarak alınan işaret, kestirilmiş kanal matrisinin tersi ile çarpılır. Böylelikle kanalın bozucu etkilerin giderilmiş olur.

$$\mathbf{s}' = \mathbf{H}_{est}^{-1} \hat{\mathbf{s}} \quad (2)$$

Burada  $\hat{\mathbf{s}}$  alınan işareti,  $\mathbf{H}_{est}^{-1}$  kestirilen kanal matrisinin tersini,  $\mathbf{s}'$  ise kanalın bozucu etkilerinin giderildiği işareti temsil etmektedir.

CSK modülasyonunun performansı açısından kanal kestiriminin doğru yapılması kritik öneme sahiptir. Standartta bu işlem için belirtilen Walsh kod dizileri Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Renk kalibrasyonu için standartta belirtilen Walsh kodları [3].

Kanal	Walsh Kodu	Gönderilecek Eğitim Dizisi
Kanal i	W(1,4) = 1, -1, 1, -1	1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0
Kanal j	W(2,4) = 1, 1, -1, -1	1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0
Kanal k	W(3,4) = 1, -1, -1, 1	1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1

Burada görüldüğü gibi Walsh kodlarındaki her sembol iki defa gönderilmektedir. Alıcıda bu sembollerin ortalaması alındıktan sonra elde edilen işaret ile Walsh kodları çapraz ilinti (Cross-Correlation) işlemine tabii tutularak kanal kestirim işlemi gerçekleştirilir.

### 1.3. VLC Sistem Modeli

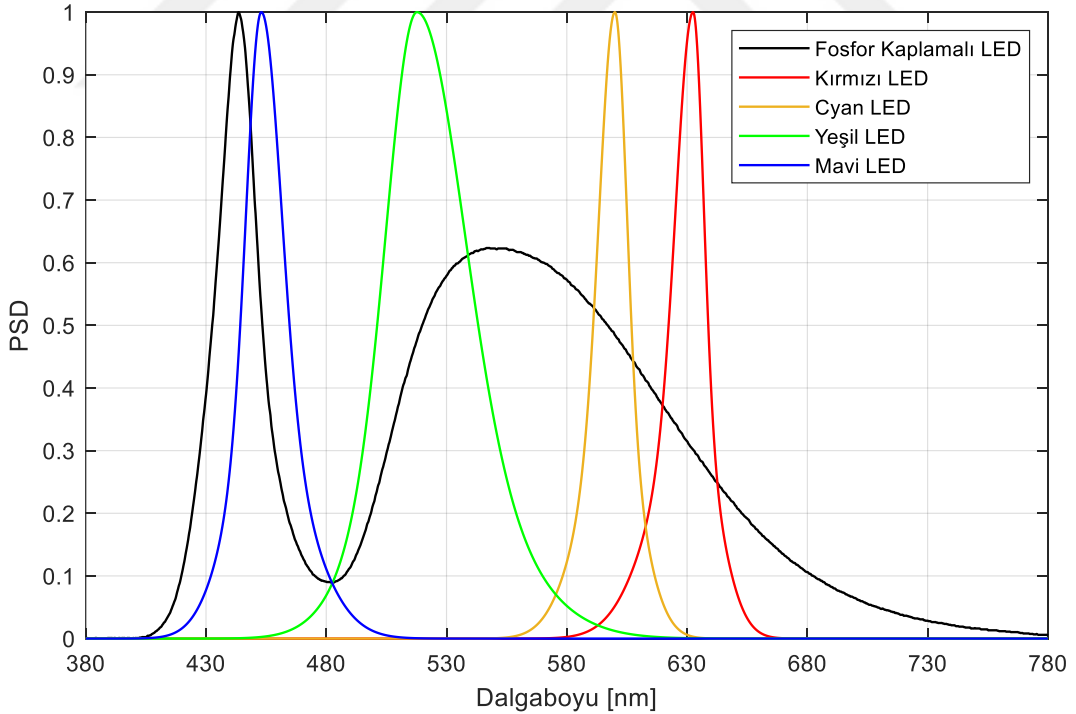
Bu bölümde Şekil 1.1'de görülen çok renkli görünür ışık haberleşmesi kanalı alt bileşenleri ile tanımlanmış ve kanalın oluşturabileceği bozucu etkiler ayrıntılı olarak anlatılmıştır.



### 1.3.1. Vericiler

Görünür ışık haberleşmesinde verici olarak kullanılacak ışık kaynağının hem haberleşme hızı hem de aydınlatmanın stabil olması açısından yüksek hızlarda anahtarlanabilmesi gerekmektedir. LED'ler bu özelliğinin yanı sıra yüksek enerji verimliliği ve uzun kullanım ömrüne sahip olması nedeniyle görünür ışık haberleşmesinde çoğunlukla tercih edilirler.

TLED veya QLED vericiler ile gerçekleştirilen çok renkli görünür ışık haberleşmesi sistemlerinde LED'lerin dalga boyuna göre yaptığı ışığa gücünün bilinmesi alıcıda kanalların uygun şekilde ayrıştırılabilmesi için gereklidir. Güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) olarak adlandırılan bu bilgi kullanılan malzemelerin türüne bağlı olduğundan dolayı genellikle ölçüm yapılarak veya ölçüme uygun modeller geliştirilerek elde edilir [24, 25]. Şekil 1.4'te farklı renklerdeki LED'lerin örnek PSD grafikleri verilmiştir.



Şekil 1.4. LED güç spektral yoğunluğu

Burada görüldüğü gibi farklı renkteki LED'lerin PSD'leri birbiri ile girişim halindedir. Bu nedenle alıcıda ideal filtreler kullanılsa dahi renk kanallar arası girişim var olacaktır.



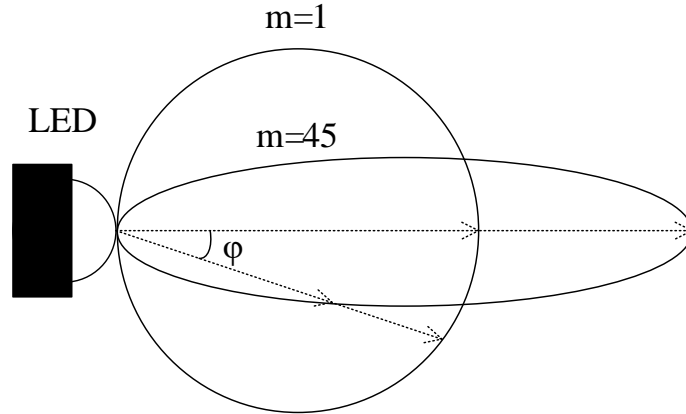
Güç spektral yoğunluğundan yararlanılarak LED'in hangi dalga boyu aralığında ne kadar ışığa yaptığı belirlenebilir. PSD'nin  $S(\lambda)$  ise temsil edildiği durum için LED'in yaydığı toplam optik güç (3) numaralı bağıntıda verildiği gibi hesaplanır.

$$P_t = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Dalga boyuna göre yapılan ışığa gücünün yanı sıra doğrultuya göre yapılan ışığa miktarının bilinmesi de LED'in doğru modellenmesi açısından dikkat edilmesi gereken bir konudur. Genellikle ışığa şekli Lambert yasasına göre modellenen LED'lerin ışığa yoğunluğu (4)'de verildiği gibi hesaplanabilir [26].

$$R(\varphi) = \frac{(m+1)}{2\pi} P_t \cos^m(\varphi) \quad (4)$$

Burada  $\varphi$  ışığın LED'den çıkış açısını,  $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$  ise LED'in görüş açısı ile ilişkili olan lambert indeksini temsil etmektedir. Şekil 1.5'te farklı lambert indekslerine sahip LED için ışığa paternleri görülmektedir.



Şekil 1.5. Lambert indeksine göre ışığa şekli

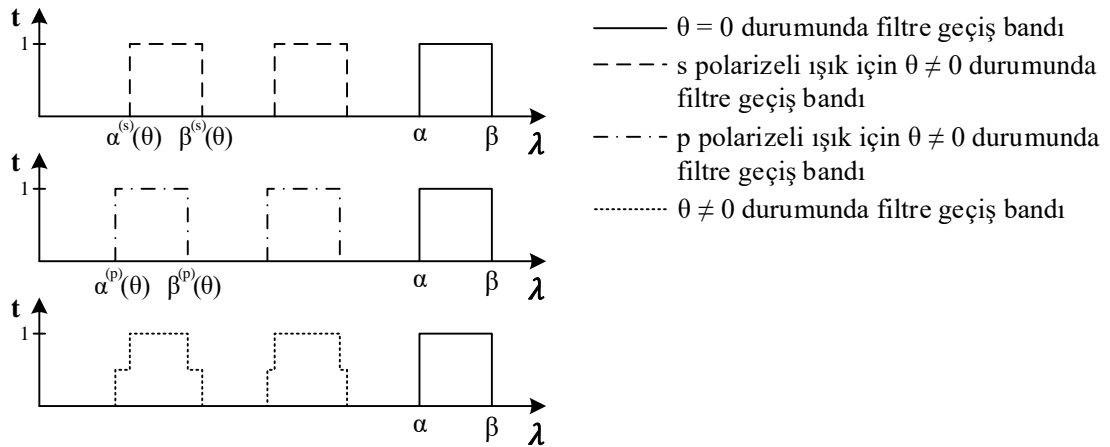
Görselden anlaşılacağı gibi yüksek lambert indeksi dar bir görüş alanı için yüksek güçte aydınlatma anlamına gelmektedir. Ancak böyle bir durumda aydınlatılacak yüzey içerisinde ışık seviyeleri arasında keskin geçişler oluşabilir. Bu nedenle daha yumuşak geçişlere sahip bir aydınlatmanın sağlanabilmesi için düşük lambert indeksi yani geniş görüş alanına sahip LED'lerin kullanılması uygun olacaktır.



### 1.3.2. Optik Filtreler

Çok renkli görünür ışık haberleşme sistemlerinde renk kanallarının birbirinden ayrılabilmesi için optik filtreler kullanılır. Kablosuz görünür ışık haberleşmesinde çoğunlukla iki tür filtre tercih edilmektedir. Bunlardan ilki olan renkli cam optik filtreler, cam yüzeyinin renkli madde ile kaplanması ile oluşturulmaktadır [27]. Bu filtreler düşük üretim maliyetine sahip olmasına rağmen geçiş bandının yeterince keskin üretilmemesi nedeniyle girişim miktarı istenildiği ölçüde düşürülememektedir. Çoğunlukla tercih edilen bir diğer filtre olan ince film optik filtreler, farklı etkin kırılma indeksine ve kalınlıklara sahip katmanların birleştirilmesi ile üretilmektedir [28]. Her bir katmanın etkin kırılma indeksi ve kalınlığı ayarlanarak geçiş bandı istenilen dalga boyu aralığında ve keskinlikte üretilmektedir. Bütün bu avantajlarına karşılık ince film optik filtreler yüksek üretim maliyetine sahiptirler.

Renk kanallarının birbirinden ayrıştırılması gibi kritik bir göreve sahip olan optik filtreler oluşturduğu bozucu etkiler açısından dikkatli bir şekilde incelenmelidir. Her ne kadar ince film optik filtreler yardımıyla ideale yakın filtreler oluşturulabilse de ışığın geliş açısındaki değişim geçiş bandının değişmesine neden olmaktadır. *Maviye kayma* olarak adlandırılan bu etki geliş açısının artması ile geçiş bandının filtrenin etkin kırılma indeksine bağlı olarak alt dalga boyuna kayması olarak tanımlanabilir. Bu etki daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 1.6'da görselleştirilmiştir.



Şekil 1.6. Optik filtrelerin sahip olduğu maviye kayma etkisi



Burada  $\theta$  ışığın optik filtreye geliş açısını temsil etmektedir. Görüldüğü gibi gelen ışığın polarizasyonuna göre de optik filtre sınırları farklı oranlarda alt dalga boyuna doğru kaymaktadır. Bu nedenle optik filtrenin toplamda oluşan geçiş bandı geliş açısı ile hem alt dalga boyuna kaymakta hem de şeklinde bozulma olmaktadır. Geliş açısının  $0^\circ$  olduğu durum için optik filtrenin alt ve üst sınırlarının sırasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$  ile temsil edildiğinde maviye kayma etkisinin neden olduğu yeni sınırlar (5) numaralı bağıntıda verildiği gibidir [19].

$$\left(\alpha^{(s)}(\theta), \beta^{(s)}(\theta)\right) = \mu^{(s)}(\alpha, \beta) \quad (5.a)$$

$$\left(\alpha^{(p)}(\theta), \beta^{(p)}(\theta)\right) = \mu^{(p)}(\alpha, \beta) \quad (5.b)$$

Burada  $(.)^{(s)}$  ve  $(.)^{(p)}$  sırasıyla gelen ışığın yatay ve dikey polarizeli olma durumunu temsil etmektedir. Kayma miktarını belirleyen  $\mu^{(\cdot)}$  ise (6) verildiği gibi hesaplanır [19].

$$\mu^{(s)} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{n^{(s)2}}, \quad \mu^{(p)} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{n^{(p)2}} \quad (6)$$

Burada  $n^{(\cdot)}$  optik filtrenin etkin kırılma indeksini temsil etmektedir. Bağıntıdan anlaşılacağı üzere etkin kırılma indeksi 1'den büyük olduğu sürece geçiş bandı alt dalga boyu yönünde kayacaktır.

Maviye kayma haberleşme açısından incelendiğinde ise verici ile alıcı arasında açı olduğu durumda renk kanalları arasındaki girişimi arttırıcı etki gösterecektir. Bu nedenle haberleşme sistemi tasarlanırken maviye kayma etkisini dikkate almak önemlidir.

### 1.3.3. Alıcılar

VLC sistemlerinde foto-dedektörler veya halihazırda mobil cihazlarda bulunan kameralar alıcı olarak kullanılabilir [29]. PD'ler optik gücü elektrik akımına dönüştüren elemanlardır. Bu dönüştürme miktarı PD'nin yüzey alanı, duyarlılığı ve ışığın geliş açısı gibi parametrelere bağlıdır. PD'ye ulaşan optik gücün  $P_r$  ile gösterildiği durum için oluşan elektrik akımı (7) numaralı bağıntıda verildiği gibi hesaplanabilir.





$$I(\theta) = RA_{PD} \cos(\theta) P_r \quad (7)$$

Burada  $R$  ve  $A_{PD}$  sırasıyla PD'nin duyarlılığı ve yüzey alanını,  $\theta$  ise ışığın PD'ye geliş açısını temsil etmektedir.

Halihazırda bulunan ticari PD'lerin bile birkaç 10 MHz seviyesinde band genişliği olmasına rağmen kamera sistemleri için durum daha farklıdır. Algıladığı görüntü çözünürlüğü ile ilişkili olarak içerisinde foto-dedektör bulunduran kameraların tüm PD'leri okuması için gereken süre oldukça yüksektir. Normal çekim modu için genellikle saniyede 30 kare (30 fps) yakalayabilen kameralar, yeni geliştirilen ağır çekim modları sayesinde 120-240 fps seviyelerine çıkmasına rağmen yüksek hızlı iletişim için hala yetersizdir.

Bu değerlerin düşük olmasının nedeni kameralarda bulunan çok sayıda PD'nin paralel olarak okunmasının zorluğudur. Mevcut sistemlerde kameraların içerisindeki PD matrisi sütunlar halinde okunarak görüntü oluşturulmaktadır. Rolling Shutter olarak adlandırılan bu özellik sayesinde haberleşme hızının artırılmasına yönelik çalışmaları bulunmaktadır. [30] numaralı çalışmada bu etki kullanılarak veri hızının artırılabilceği gösterilmiştir.

Her ne kadar kameralar yaygın olarak kullanılsa da yüksek hızlı VLC uygulamaları için PD kullanımı şimdilik en uygun seçenek olarak görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada alıcı olarak PD kullanılmıştır.

#### 1.3.4. Kanal Modellenmesi

Literatürde VLC kanalının modellenmesine yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır [31, 32]. Lee ve arkadaşlarının yaptığı [31] numaralı çalışmada ışın izleme yöntemi kullanılarak kanal modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde göre her bir vericiden çıkan ışınların alıcıya ulaşana kadar izleyebileceği bütün yollar ve bu yoldaki cisimlerin zayıflatma etkileri hesaplanarak kanal tepkisi oluşturulmaktadır. Işın izleme yönteminde yansıma sayısına göre gerekli olan işlem sayısı ciddi oranda artmasına rağmen, yüksek doğrulukta kanal tepkisi elde edilebilmektedir. Buna göre çoklu LED ve çoklu yansıma durumları için kanal tepkisi (8) numaralı bağıntıda verildiği gibi hesaplanır [31].

$$h(t) = \sum_{n=1}^{N_{LED}} \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)}(t, S_n) \quad (8)$$



Burada  $N_{LED}$  LED sayısını,  $h^{(k)}$  ise k adet yansıma durumunda oluşan kanal tepkesini temsil etmekte ve (9)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [31].

$$h^{(k)}(t, S_n) = \int_S \left[ L_1 L_2 \dots L_{k+1} \Gamma_n^{(k)} \text{rect} \left( \frac{\theta_{k+1}}{FOV} \right) \times \delta \left( t - \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_{k+1}}{c} \right) \right] dA_{ref}, \quad k \geq 1 \quad (9)$$

Burada  $L_k$  ışık kaynağı ile k. yansıma arasındaki yol kaybını,  $\theta_{k+1}$  ışının PD'ye geliş açısını,  $FOV$  PD'nin görüş alanını,  $d_k$  ışık kaynağı ile k. yansıma noktası arasındaki mesafeyi,  $A_{ref}$  ise yansıma yüzey alanını temsil etmektedir. Yol kaybı hesaplamalarında ışığın mesafeye göre zayıflamasının yanı sıra LED'in çıkış doğrultusuna göre yaptığı ışıma gücü ve geliş açısına göre yüzeyin yansıtma özellikleri dikkate alınmalıdır. Bunlar dikkate alındığında yansıma durumlarındaki yol kayıpları (10)'de verildiği gibi hesaplanır [31].

$$L_1 = \frac{A_{ref} (m+1) \cos^m \varphi_1 \cos \theta_1}{2\pi d_1^2},$$

$$L_2 = \frac{A_{ref} \cos \varphi_2 \cos \theta_2}{\pi d_2^2}, \dots,$$

$$L_{k+1} = \frac{A_{PD} \cos \varphi_{k+1} \cos \theta_{k+1}}{\pi d_{k+1}^2} \quad (10)$$

Burada  $\varphi_k$  ve  $\theta_k$  sırasıyla ışıma ve geliş açısını,  $A_{PD}$  ise PD'nin yüzey alanını temsil etmektedir. Yol kayıplarının yanı sıra yansıma elemanlarının veya optik filtrelerin dalga boyuna göre yaptığı zayıflatma miktarının temsil edildiği  $\Gamma_n^{(k)}$  ise (11) numaralı bağıntıda verildiği gibi hesaplanır.

$$\Gamma_n^{(k)} = \int_{\lambda} S_n(\lambda) \rho_1(\lambda) \rho_2(\lambda) \dots \rho_k(\lambda) \rho_f(\lambda, \theta_{k+1}) d\lambda \quad (11)$$



Burada  $\rho_k(\lambda)$  yansıma yüzeylerinin dalga boyuna göre yansıtma karakteristiklerini,  $\rho_f(\lambda, \theta_{k+1})$  ise kullanılması durumunda optik filtrenin dalga boyuna göre iletim karakteristiğini temsil etmektedir.

Gelen ışının PD'nin görüş alanından daha büyük bir açı ile geldiğinde hesaba katılmasının önüne geçmek için  $rect(\cdot)$  fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonun koşulu (12)'de verildiği gibidir.

$$rect(k) = \begin{cases} 1, & |k| \leq 1 \\ 0, & |k| > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Delta fonksiyonu yardımıyla ise gelen ışınların hangi zamanda alıcıya ulaştığı belirlenmektedir. Böylelikle zamana bağlı olarak kanal tepkesi elde edilebilmektedir. Buraya kadar yansıma durumlarında oluşan kanal tepkeleri hesaplanmıştır. Son olarak (13) numaralı bağıntıda verilen doğrudan görüş (Line of Sight, LOS) durumunun kanal tepkesi hesaplanarak toplam tepke elde edilebilir [31].

$$h^{(0)}(t, S_n) = L_0 \Gamma_n^{(0)} rect\left(\frac{\theta_0}{FOV}\right) \times \delta\left(t - \frac{d_0}{c}\right) \quad (13)$$

LOS durumunda yansıma etkisi olmadığı için tek renkli haberleşmede  $\Gamma_n^{(0)}$  kullanılan LED'in gücüne, çok renkli haberleşmede ise optik filtreden geçen toplam güce eşit olmaktadır. Yol kaybını temsil eden  $L_0$  ise (14)'de verildiği gibidir [31].

$$L_0 = \frac{A_{PD}(m+1) \cos^m \varphi_0 \cos \theta_0}{2\pi d_0^2} \quad (14)$$

Çok renkli haberleşme sistemlerinde ise VLC kanalı, N adet renkli LED ve M adet optik filtre kullanıldığı durum için (15)'de verildiği gibi NxM boyutunda matris olarak davranmaktadır.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (15)$$



Burada kanal matrisinin elemanları olan  $h_{nm} = \int h_{nm}(t)dt$  düşük anahtarlama hızları için çok yolluluk etkisi gözlemlenmediğinden dolayı n. LED ve m. optik filtre kullanılarak yapılan kanal tepkisi hesabının zamana göre toplamı olarak belirlenir.

### 1.3.5. Kanalin Oluşturduğu Bozucu Etkiler

Bu bölümde bileşenleri tanıtilan ve modellenmesi gerçekleştirilen görünür ışık haberleşmesi kanalının oluşturduğu bozucu etkiler anlatılmıştır.

#### 1.3.5.1. Isıl ve Atış Gürültüsü

VLC sistemlerinde diğer bütün sistemlerde bulunan ısı gürültüye ek olarak PD'nin üzerinde düşen ışık gücü ile ilişkili olarak oluşan atış gürültüsü de bulunmaktadır. Alıcı tarafta alan etkili transistörlü (Field Effect Transistor, FET) yükselteç kullanıldığı durum için oluşan ısı ve atış gürültülerinin varyansları (16) ve (17) numaralı bağıntılarda verildiği gibidir.

$$\sigma_{\text{ısı}}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G} C_P A_{PD} I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_k \Gamma_F}{g_m} C_P^2 A_{PD}^2 I_3 B^3 \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{atış}}^2 = 2q R P_r B + 2q I_{bg} B \quad (17)$$

Burada  $k$  Boltzman sabitini,  $T_k$  mutlak sıcaklığı,  $G$  açık çevrim gerilim kazancını,  $C_P$  birim alanın sabit kapasitesini,  $I_2$  ve  $I_3$  gürültü-band genişliği faktörünü,  $B$  anahtarlama band genişliğini,  $\Gamma_F$  FET'in kanal gürültü faktörünü,  $g_m$  FET'in geçiş iletkenliğini,  $q$  elektrik yükünü ve  $I_{bg}$  ise ortam ışığından kaynaklı arka plan akımını temsil etmektedir. Buna göre VLC sistemleri için gönderilen işarete toplamsal olarak etki eden beyaz Gauss gürültünün varyansı  $\sigma_n^2 = \sigma_{\text{ısı}}^2 + \sigma_{\text{atış}}^2$  olarak hesaplanır ve sadece bu etki göz önüne alındığında alıcıda oluşan işaret (18)'de verildiği gibi hesaplanır.

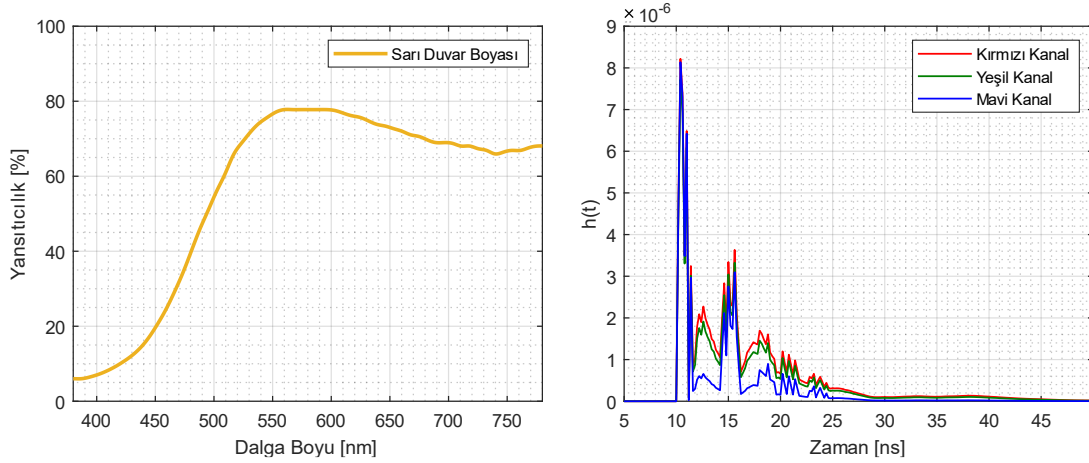
$$\mathbf{y}_i = L\mathbf{x}_i + \mathbf{n} \quad (18)$$



Burada  $x_i$  ve  $y_i$  sırasıyla gönderilen ve alınan  $i$ . sembolü,  $L$  kanalın zayıflatma miktarını,  $\mathbf{n}$  ise varyansı  $\sigma_n^2$  olan Gauss gürültüsünü temsil eder. AWGN kanalı olarak adlandırılan bu modelde, çok renkli haberleşme için tüm kanalların aynı oranda zayıfladığı ve yine tüm kanallara aynı oranda gürültü dahil olduğu kabulü yapılmaktadır. Literatürde çoğunlukla kullanılan ve analiz açısından kolaylık sağlayan bu kanal modeli ilerleyen bölümlerde göreceğimiz gibi VLC kanalının etkilerini temsil etmekte yetersiz kalmaktadır.

### 1.3.5.2. Renk Kanalları Arasındaki Dengesizlik

Çok renkli haberleşme sistemlerinde haberleşmenin gerçekleştirileceği ortam renk kanallarına karşı farklı etki gösterebilir. Örneğin kapalı mekân görünür ışık haberleşmesi için duvar rengi belirli kanalların diğerlerine göre daha fazla zayıflamasına neden olabilmektedir [33]. Yaptığımız [33] numaralı çalışmada bu kanallar arası dengesizlik etkisinin yansıtıcı cismin yakınlarında daha belirgin bir şekilde görüldüğü sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 1.7’de sarı renkli duvarın dalga boyuna göre yansıtma miktarı ve duvarları bu renk ile boyalı olan odanın belirli bir noktasındaki kanal tepkeleri görülmektedir.



Şekil 1.7. Sarı boya için dalga boyu-yansıtıcılık değişimi [34] (solda), örnek bir odanın duvarlara yakın bir konumundaki kanal tepkeleri (sağda)

Buradan anlaşılabilirdiği gibi sarı duvar rengi mavi haberleşme kanalını, kırmızı ve yeşil kanallara göre daha fazla zayıflatmaktadır. Bu etki dikkate alındığında alıcıda oluşan işaret (19) numaralı bağıntıda verildiği gibi hesaplanmalıdır.



$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H} \circ \mathbf{x}_i + \mathbf{n} \quad (19)$$

Burada  $\mathbf{H} = [H_1, H_2, \dots, H_m]^T$  renk kanallarının tepke vektörünü,  $\circ$  operatörü ise Hadamard çarpımını temsil etmektedir. Hadamard çarpımı aynı uzunluktaki iki vektörün elemanlarını çarparak aynı boyutta bir vektör oluşturmaktadır.

### 1.3.5.3. Renk Kanalları Arasındaki Girişim

Çok renkli haberleşme sistemlerinde farklı renkte LED'ler kullanılarak görünür ışık spektrumunun daha verimli kullanılması hedeflenmektedir. Ancak bu hedefe ulaşılabilmesi için VLC kanalının iyi bir şekilde analiz edilerek haberleşme sisteminin kanalın bozucu etkilerin giderecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Literatürde CSK modülasyonu için yapılan çalışmalarda VLC kanalının AWGN [17] veya sabit bir kanal matrisi [18] olarak modellendiği çalışmalar bulunmaktadır. Ancak Bölüm 1.3.2'de anlatıldığı gibi optik filtrelerin sahip olduğu maviye kayma etkisi hem renk kanalları arasındaki girişimi arttırmakta hem de geliş açısına bağlı olarak kanal yapısının değişken olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle örneğin bir oda içerisinde gerçekleştirilecek çok renkli VLC uygulamasında alıcı konumuna göre kanal yapısı ve girişim etkileri farklılık gösterecektir.

Bu etki göz önüne alındığında CSK gibi modülasyon türlerinin analizlerinin pratik uygulamalar ile uyumlu olabilmesi için tek bir kanal yapısının dikkate alınması yetersiz olacaktır. Genellikle LED ile gerçekleştirilen aydınlatma sistemlerinde birden fazla verici kullanıldığından dolayı VLC kanalı alıcı konumuna bağlı olacak şekilde modellenmelidir.

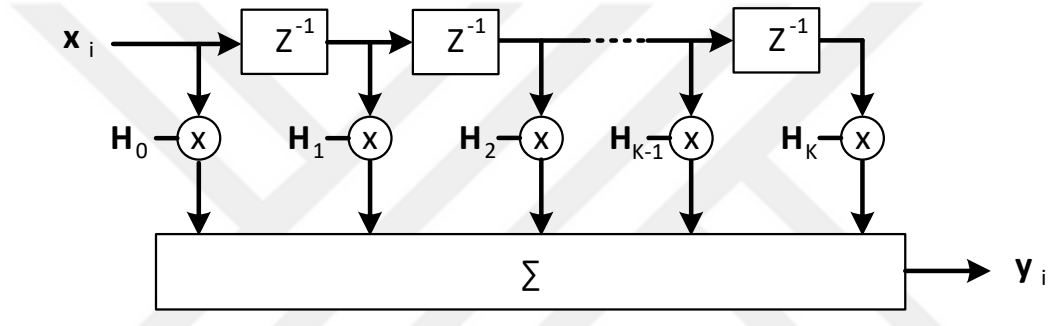
$$H(x, y, z) = \begin{bmatrix} h_{11}(x, y, z) & h_{12}(x, y, z) & \dots & h_{1M}(x, y, z) \\ h_{21}(x, y, z) & h_{22}(x, y, z) & \dots & h_{2M}(x, y, z) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1}(x, y, z) & h_{N2}(x, y, z) & \dots & h_{NM}(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Tabii ki alıcı konumları değiştiği durum için de kanal yapısı değişecektir. Bu nedenle pratik uygulamaların gerçek anlamda başarımının elde edilebilmesi için kapalı mekân içerisinde homojen aydınlatma dağılımına sahip bir oda modelinde inceleme yapılmalıdır. Böylelikle oda boyutları ve verici sayısından kısmen bağımsız olarak genel bir analiz gerçekleştirilebilir.



### 1.3.5.4. Çok Yolluluk

Literatürde LED anahtarlama hızlarının artırılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır [7, 8]. Anahtarlama hızlarındaki bu artış sembollerin daha kısa periyotlarda gönderilebilmesini sağlamasına rağmen alıcı ile verici arasında işaretin gidebileceği birden fazla yol olması nedeniyle oluşan zamanda yayılma etkisi yüksek anahtarlama hızları için ISI'ya neden olacaktır. Bu nedenle yüksek hızlarda haberleşme kanalının doğrusal filtre olarak modellenmesi gerekmektedir. Renk girişimi etkileri de düşünüldüğünde çok renkli VLC kanalı Şekil 1.8'de görüldüğü gibi davranacaktır.



Şekil 1.8. Yüksek anahtarlama hızlarında çok renkli VLC kanalı

Burada  $Z^{-1}$  bir sembol süresi gecikmeyi temsil etmektedir ve bu yapıya göre çıkış işareti (21) numaralı bağıntıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$y_i = \sum_{k=0}^K H_k \times x_{i-k} \quad (21)$$

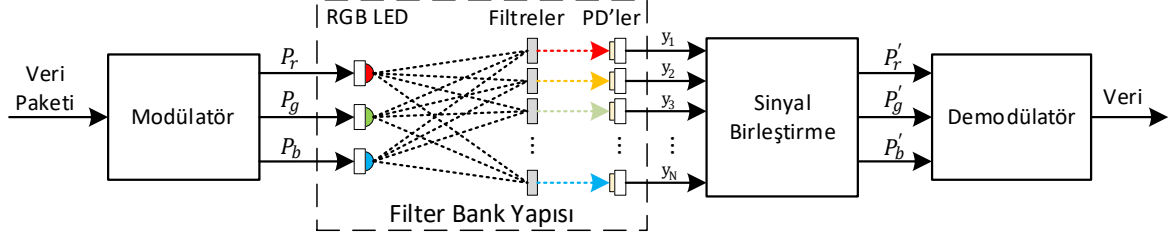
Burada  $H_k$  NxM boyutunda kanal matrisi katsayılarını,  $x_i$  ise Mx1 boyutunda i. giriş vektörünü ve  $\times$  operatörü ise matris çarpımı işlemini temsil etmektedir.

### 1.4. Filtre Bankası Yapısı

Optik filtrelerin sahip olduğu maviye kayma etkilerinin giderilebilmesi için [20] numaralı çalışmada filtre bankası alıcı yapısı önerilmiştir. Bu yapıya göre alıcıda önünde eşit band genişliğine sahip optik filtrelerin bulunduğu N adet PD kullanılarak renk girişimi ve



maviye kayma etkileri giderilmeye çalışılmaktadır. Şekil 1.9’da filtre bankası yapısının blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.9. Filtre bankası yapısı blok diyagramı

Görüldüğü gibi filtre bankası yapısında vericide üç adet farklı renkte LED kullanılmasına rağmen alıcıda daha fazla PD kullanılmaktadır. Bu yapı sayesinde optik filtrelerin geçiş bandında kayma olsa dahi optik filtre sayısı ve sınırları uygun şekilde belirlenerek bozucu etkilerin geliş açısına göre tamamen giderilebileceği [20] numaralı çalışmada gösterilmiştir.

Bu nedenle filtre bankası sisteminde ilk yapılması gereken işlem kullanılacak optik filtre sayısı ve sınırlarının belirlenmesidir. Kullanılan görünür ışık spektrumunun  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$  aralığında olduğu durum için N adet optik filtreden i. optik filtrenin sınırları (22) numaralı bağıntı yardımıyla hesaplanabilir [20].

$$\alpha_i = \lambda_{min} + \frac{i - i\gamma + \gamma - 1}{N - N\gamma + \gamma} (\lambda_{max} - \lambda_{min}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (22.a)$$

$$\beta_i = \lambda_{min} + \frac{i - i\gamma + \gamma}{N - N\gamma + \gamma} (\lambda_{max} - \lambda_{min}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (22.b)$$

Burada  $\gamma = \Delta/BW$  optik filtrenin girişim miktarının band genişliğine oranı olarak tanımlanır.

Kanalın oluşturduğu bozucu etkilerin tersine çevrilmesinde sinyal birleştirme katsayılarının uygun olarak belirlenmesi önemlidir. [20] numaralı çalışmada bu katsayıların SINR değerini maksimum yapacak şekilde belirlenmesi önerilmiştir. SINR değeri j numaralı kanal için (23) numaralı bağıntı kullanılarak hesaplanabilir.





$$SINR_j = \frac{\mathbf{w}_j^T (\mathbf{h}_j p_j^2 \mathbf{h}_j^T) \mathbf{w}_j}{\mathbf{w}_j^T [(\sum_{j' \neq j} \mathbf{h}_{j'} p_{j'}^2 \mathbf{h}_{j'}^T) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N] \mathbf{w}_j} \quad (23)$$

Burada  $\mathbf{w}_j$  j. renk kanalının sinyal birleştirme katsayı vektörünü,  $\mathbf{h}_j$  kanal matrisinin j. sütun vektörünü,  $p_j$  ise iletilen sinyalin ölçekleme faktörünü temsil etmektedir. CSK modülasyonu için ölçekleme işlemi yapılmayacağı için bu değer “1” dir.

$SINR_j$  bağıntısı incelendiğinde Rayleigh bölümünün  $\frac{\mathbf{w}^T \mathbf{A} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \mathbf{B} \mathbf{w}}$  genel formu ile uyumlu olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak  $SINR_j$  değerini maksimum yapan  $\mathbf{w}_j$  vektörü,  $\mathbf{B}$  tersi alınabilir bir matris olduğu durumda  $\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}$  matrisinin en büyük özdeğerine karşılık gelen öz vektörüdür. Bu durum için  $\mathbf{Q} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}$  matrisi (24)'de verildiği gibidir.

$$\mathbf{Q}_j = \left[ \left( \sum_{j' \neq j} \mathbf{h}_{j'} p_{j'}^2 \mathbf{h}_{j'}^T \right) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N \right]^{-1} \mathbf{h}_j p_j^2 \mathbf{h}_j^T \quad (24)$$

Buna göre  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_M]^T$  olduğu durumda düzenlenmiş işaret (25)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$\mathbf{s}' = \mathbf{W} \mathbf{y} \quad (25)$$

Bu işlem sonucunda kanal etkileri giderildiğinden dolayı yapılan modülasyon işlemine göre demodülasyon işlemi gerçekleştirilebilir.

## 1.5. Denkleştiriciler

Denkleştiriciler, haberleşme kanalının oluşturduğu bozucu etkilerin alıcıda kullanılan yapılar yardımıyla giderilmesine çalışılan sistemlerdir. Haberleşme kanalı bir sistem olarak düşünüldüğünde denkleştiriciler kanalın tersi olacak şekilde oluşturulmalıdır. Teorik olarak kaskat bağlı olan bir sistem ve o sistemin tersi yapısında çıkış işareti, giriş işaretine eşit olacaktır. Kanalın bozucu etkilerinin alıcıda giderilmeye çalışıldığından dolayı daha önce belirtildiği gibi CSK modülasyonu için denkleştiriciler uygun bir yöntemdir. Bu bölümde

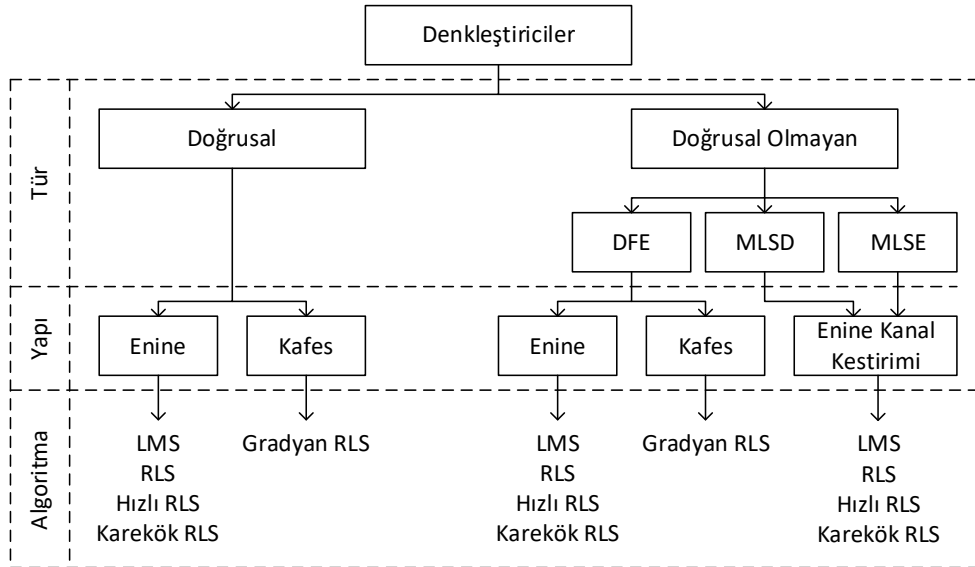


denkleştirici yapıları ve denkleştirici katsayılarının belirlenmesi için kullanılan eğitim algoritmaları anlatılmıştır.

### 1.5.1. Denkleştirici Yapıları

Denkleştirici yapıları doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Doğrusal denkleştiriciler sadece alınan sembollere göre kanal etkilerini gidermeye çalışırken, doğrusal olmayan denkleştiriciler alıcıda gönderilen bir sembolün doğru olarak kestirilmesi durumunda kanal tepkisi bilgisi ile birlikte o sembolün sebep olacağı ISI'ın hesaplanabilmesi ve giderilebilmesi düşüncesine göre çalışırlar [14].

Bu iki grup denkleştirici enine ve kafes olmak üzere iki farklı yapıda oluşturulabilirler. Enine denkleştirici yapısı basit olarak alınan işaretin tek bir gecikme hattı boyunca ilerlerken belirli katsayılarla çarpılıp toplanması sonucunda çıkış elde edilir. Kafes yapısı ise her bir dal kendisinden önceki geciktirilmiş tüm sembollerin bilgisini kullanacak şekilde tasarlanır [35]. Kafes yapısına sahip denkleştiriciler hızlı eğitim ve kararlılık açısından avantajlı olsalar da enine denkleştiricilere göre daha karmaşıktır ve eğitim için de farklı algoritmalara ihtiyaç duyarlar. Bu bilgilere göre Şekil 1.10'da denkleştiricilerin tür, yapı ve eğitim algoritmalarına göre sınıflandırmaları görselleştirilmiştir [36].



Şekil 1.10. Uyarlanır denkleştiricilerin sınıflandırılması [36].



VLC kanalları için birkaç dal sayısına sahip denkleştiricilerin kanal etkilerini giderebildiği [22] numaralı çalışmada gösterilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada enine yapıya sahip doğrusal ve karar geri beslemeli (Decision Feedback Equalizer, DFE) denkleştiricilerin CSK performansı incelenmiştir.

### 1.5.1.1. Doğrusal Enine Denkleştirici

Çok yollu kanallar Şekil 1.7’de görüldüğü gibi sayısal bir filtre olarak modellenenmektedir. Buna göre haberleşme kanalının transfer fonksiyonunun tersine sahip bir filtre yardımıyla teorik olarak bozucu etkileri giderilebilir. Bu düşünceye göre doğrusal enine denkleştiriciler bir sayısal filtre türü olan sonlu dürtü yanıtı (Finite Impulse Response, FIR) filtre yapısına göre oluşturulmuştur. Genel bir FIR filtre için giriş ile çıkış arasındaki ilişki (26)’de verildiği gibidir.

$$y'_i = \sum_{k=0}^N c_i y_{i-k} \quad (26)$$

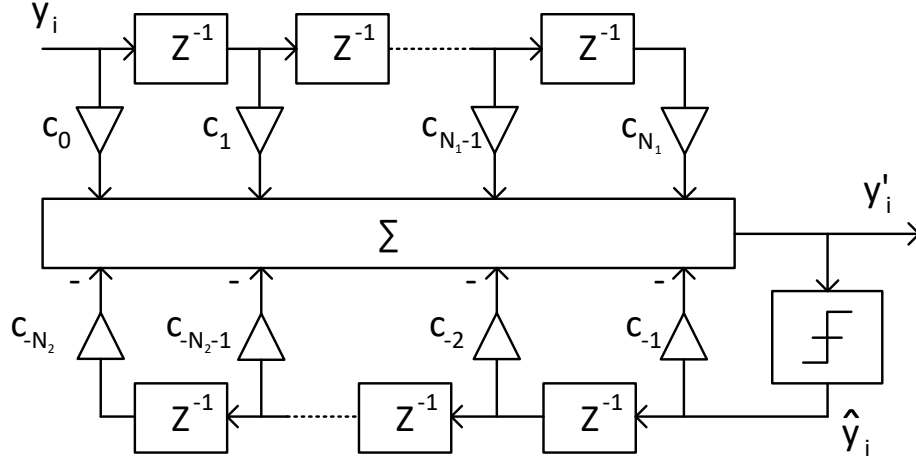
Burada  $N + 1$  denkleştiricinin dal sayısını,  $c_i$  denkleştirici katsayılarını,  $x_i$  giriş işaretinin  $i$ . terimini,  $x'_i$  ise denkleştirici çıkışını temsil etmektedir.

Doğrusal enine denkleştiriciler diğer yöntemlere göre basit yapısı sayesinde düşük işlem yükü avantajına sahiptir. Ancak daha yüksek karmaşıklığa sahip doğrusal olmayan denkleştiriciler bozucu etkilerin giderilmesinde doğrusal denkleştiricilere göre daha başarılı olmaktadır.

### 1.5.1.2. Karar Geri Beslemeli Enine Denkleştirici

Doğrusal olmayan denkleştiricilerin bir türü olan DFE’ler algılanan işaretlerin sonraki semboller üzerindeki etkisi hesaplanarak giderilmesi düşüncesine göre oluşturulmuştur. Giriş işaretinden ve kestirimi gerçekleştirilen işareten çıkışa doğru olmak üzere iki adet doğrusal filtrenin birleştirilmesi ile oluşturulan DFE’ler sonsuz dürtü yanıtı (Infinite Impulse Response, IIR) filtreler benzemektedir. Genel bir DFE yapısının Şekil 1.11’de görselleştirilmiştir.





Şekil 1.11. Karar geri beslemeli denkleştirici yapısı

Burada şeklin üst bölümü ileri yön filtreye, alt bölümü ise geri yön filtreye karşılık gelmektedir. DFE'lerin girişi ile çıkışı arasındaki ilişki ise (27) numaralı bağıntıda verilmiştir.

$$y'_i = \sum_{k=0}^{N_1} c_k y_{i-k} + \sum_{k=-N_2}^{-1} c_k \hat{y}_{i-k} \quad (27)$$

Burada  $N_1 + 1$  denkleştiricinin ileri yön dal sayısını,  $N_2$  geri yön dal sayısını,  $\hat{x}_i$  ise kestirilen işareti temsil etmektedir.

Denkleştirici yapılarının birbirine göre üstünlükleri bulunsa da katsayıların uygun olarak belirlenmesi daha önemli bir konudur. Katsayı belirleme işlemi kanal matrisinin analitik olarak tersinin alınması şeklinde gerçekleştirilen sıfıra zorlayıcı (Zero Forcing, ZF) yöntemi veya kanaldan eğitim dizisi gönderilerek adaptif olarak gerçekleştirilebilir.

### 1.5.2. Uyarlanırlı Denkleştirici Eğitim Algoritmaları

Uyarlanırlı eğitim algoritmaları kanalın değişken olduğu durumda katsayıları güncelleyerek ZF yöntemine göre avantaj sağlamaktadır. Bu eğitim işleminin gerçekleştirilebilmesi için pek çok algoritma geliştirilmiştir.



Geliştirilen algoritmaların karşılaştırılması için önemli bir parametre eğitim esnasındaki ortalama karesel hatanın (Mean Square Error, MSE) değişimidir. MSE değişiminin ne kadar hızlı azaldığı ve ulaştığı minimum değer algoritmaların katsayıları ne kadar hızlı ve doğru şekilde belirlendiği ile doğrudan ilişkilidir. MSE değeri (28) numaralı bağıntıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$MSE = E \left\{ \sqrt{(y_i - \hat{y}_i)^2} \right\} \quad (28)$$

Burada  $E\{\cdot\}$  beklenen değer operatörüdür.

Bunun dışında eğitim algoritmaları hesaplama karmaşıklığı ve kararlılık gibi özelliklerine göre de değerlendirilebilirler. Bu bölümde denkleştirici eğitiminde çoğunlukla kullanılan en küçük ortalama kareler (Least Mean Squares, LMS) ve özyinelemeli en küçük kareler (Recursive Least Squares, RLS) algoritmaları tanıtılmıştır.

### 1.5.2.1. En Küçük Ortalama Kareler Algoritması

LMS algoritması 1960 yılında Widrow ve Hoff tarafından geliştirilmiştir [37]. Basit bir yapıya sahip olan LMS algoritması işaret işleme ve sistem parametrelerinin kestirimi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu algoritmaya göre denkleştirici katsayıları (29) numaralı bağıntıda görüldüğü gibi doğrusal olarak güncellenmektedir.

$$C_N(n+1) = C_N(n) + \mu e_i^* V_N(n) \quad (29)$$

Burada  $C_N(n) = [c_0, c_1, \dots, c_N]$  denkleştirici katsayı vektörünün  $n$ . iterasyondaki değerini,  $\mu$  algoritmanın hızını ve kararlılığını etkileyen adım büyüklüğünü,  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  denkleştirici çıkışındaki kestirim hatasını ve  $V_N(n) = [y_0, y_1, \dots, y_N]$  denkleştiricinin  $n$ . iterasyondaki giriş vektörünü temsil etmektedir.

LMS algoritması her ne kadar  $N$  dal sayısına sahip bir denkleştirici için bir iterasyonda  $2N + 1$  gibi düşük bir işlem karmaşıklığına sahip olsa da bu eğitim için gerekli dizi uzunluğunun artmasına ve dolayısıyla hızlı değişen kanalların takibinin yapılamamasına neden olmaktadır.



### 1.5.2.2. Özyinelemeli En Küçük Kareler Algoritması

Rastlantısal Newton algoritması olarak da yorumlanabilen RLS algoritması LMS'e göre daha yüksek işlem karmaşıklığına sahip olmasına rağmen çok daha hızlı bir şekilde eğitim işlemini gerçekleştirmektedir [38]. Bu özelliği nedeniyle hızlı değişen kanallar için çoğunlukla tercih edilmektedir. Hesaplama karmaşıklığının düşürülmesine yönelik geliştirilen hızlı kalman RLS ve karekök RLS gibi türleri bulunmasına rağmen kalman RLS algoritması kararlılık açısından diğer türlere üstünlük sağlamaktadır. Bu algoritma için katsayı güncelleme bağıntısı (30)'de verildiği gibidir.

$$C_N(n+1) = C_N(n) + k(n)e_i^* \quad (30)$$

Burada  $k(n)$  kalman katsayısı olarak adlandırılmakta ve (31) numaralı denklem takımı ile hesaplanmaktadır.

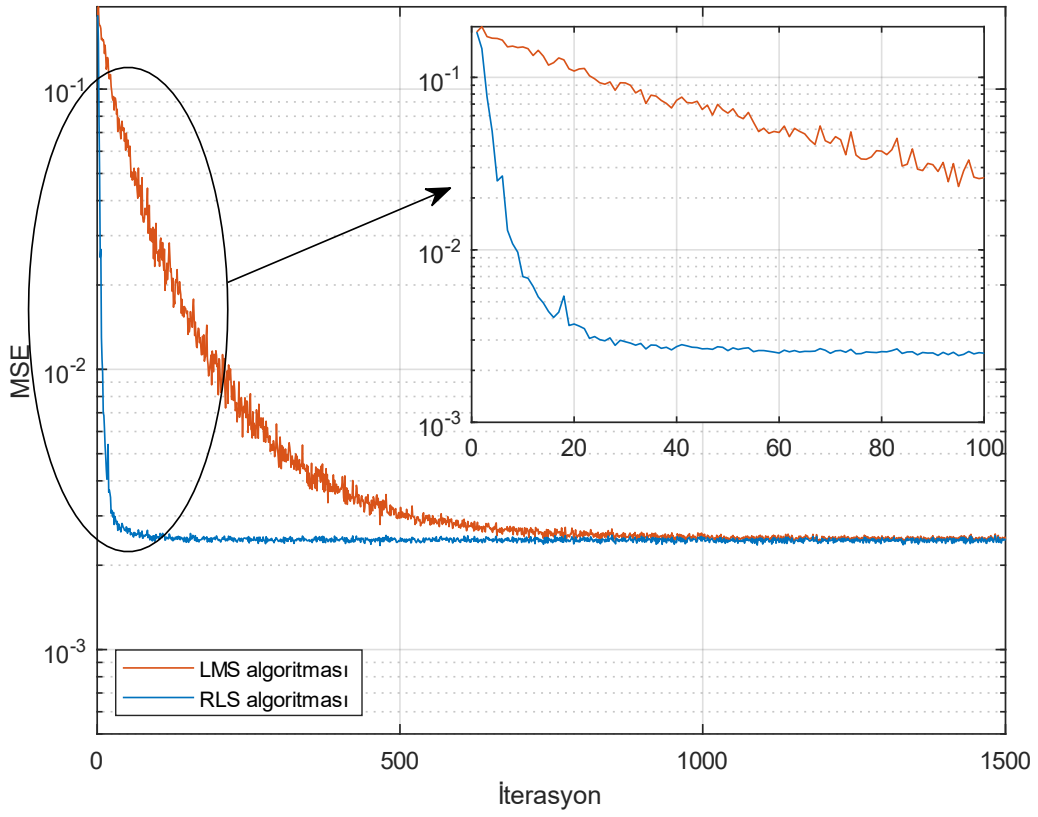
$$k(n) = \frac{R^{-1}(n-1)V_N(n)}{\omega + V_N^T(n)R^{-1}(n-1)V_N(n)} \quad (31.a)$$

$$R^{-1}(n) = \frac{R^{-1}(n-1) - k(n)V_N^T(n)R^{-1}(n-1)}{\omega} \quad (31.b)$$

Burada verilen  $\omega$  kanal takip hızını belirleyen unutma faktörüdür. Kanal değişim hızına göre  $[0,8; 1]$  aralığında seçilebilen bu parametre hızlı değişen kanallarda 0,8, yavaş değişen veya zamanla değişmeyen kanallarda ise 1'e yakın seçilmelidir.

LMS ve RLS algoritmalarının karşılaştırılması açısından Şekil 1.12'de örnek bir uygulamadaki MSE değişimleri verilmiştir.





Şekil 1.12. LMS ve RLS algoritması MSE değişimleri

Görüldüğü gibi eğitim sonunda iki algoritma da aynı hata değerine ulaşmasına rağmen RLS algoritması çok daha kısa sürede eğitimi tamamlamaktadır.



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Giriş

CSK modülasyonu için literatürde yapılan çalışmalarda çok renkli VLC kanalı farklı şekillerde modellenmektedir. Örneğin [16, 39] numaralı çalışmalarda teorik bit hata oranları elde edilen çalışmalarda zamanda kayma ve renkler arası girişim ihmal edilerek AWGN olarak modellenirken, [40] numaralı çalışmada tüm renk kanallarının zamanda üstel olarak azalan kanal tepkesine sahip olduğu kabul edilmiş, [18] numaralı çalışmada ise renk girişimi etkileri dikkate alınarak haberleşme kanalı deneysel olarak alınana ölçümlere göre tek taplı 3x3 boyutunda bir matris olarak modellenmiştir. Alıcı ile verici konumunun sabit olduğu durumda bu kabuller büyük oranda uygun olmasına rağmen, [19] numaralı çalışmada gösterildiği gibi optik filtrelerin maviye kayma özelliği nedeniyle ışığın alıcıya geliş açısındaki artış çok renkli VLC kanalı için renkler arasındaki girişimi arttırıcı etki gösterebilmektedir. Bu durum sistem başarımını oldukça etkilemektedir. Bu nedenle kapalı mekan kablosuz VLC uygulamaları için tasarlanan CSK modülasyonunda alıcı ile verici arasındaki görüş açısının farklı olması veya alıcının hareketli olması gibi durumlarda maviye kayma etkileri dikkate alınarak incelemelerin gerçekleştirilmesi önemlidir.

IEEE standardında CSK modülasyonu için çok renkli VLC kanalının sahip olduğu çoklu renk girişimi ve renk dengesizliği gibi problemlerin önüne geçilebilmesi için renk kalibrasyonu yöntemi tanımlanmıştır. Ancak literatürde bu yöntemin maviye kayma etkileri altındaki performansının incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bunun dışında [20] numaralı çalışmada maviye kayma etkileri dikkate alınarak çok renkli VLC kanalı için filtre bankası alıcı yapısı önerilmiş ve mevcut sistemler ile farklı geliş açıları için elde ettikleri SINR-BER performansı açısından karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada filtre bankası yapısı CSK modülasyonuna uygulanarak incelenmiştir. Her ne kadar [19, 20] numaralı çalışmalar maviye kayma etkileri açısından literatüre önemli katkılar sağlasa da performans karşılaştırılması yaparken sistemlerin farklı büyüklüklerde fotodetektör alıcı alanlarına sahip olması adil bir karşılaştırma olmayıp yanıltıcı sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır. Ayrıca birden fazla verici LED kullanıldığı durumdaki analizin ve mevcut sistemlerle verici gücüne göre karşılaştırmanın yapılmaması gibi eksiklikleri bulunmaktadır.





Bunlara ek olarak gelişen LED teknolojisi ile anahtarlama hızlarındaki artış VLC uygulamalarında çok yolluluktan kaynaklı ISI etkilerinin görülmesine yol açacaktır [21, 22, 33, 41]. Bu etkilerin tek renkli VLC uygulamalarında çözümüne yönelik yapılan [21] numaralı çalışmada MMSE-DFE kullanımının optik güç verimliliği açısından diğer tüm O-OFDM yöntemlerinden daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Ancak çok yolluluk özellikle çok renkli VLC uygulamaları için her bir renk kanalının ortamın özelliklerine göre farklılık göstereceğinden dolayı, tek renkli VLC'ye göre daha çok bozucu etki oluşturacaktır. Bu durum göz önünde bulundurularak özellikle CSK gibi verici sembollerinin düzenlenemeyeceği modülasyon türleri için alıcıda uygun denkleştirici sistemi oluşturularak kanalın etkileri giderilmelidir.

Bu çalışmada öncelikle çok renkli VLC uygulamalarında genellikle göz ardı edilen maviye kayma etkileri dikkate alınarak CSK modülasyonunun performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz iki farklı şekilde yapılmıştır. Bunlardan ilki tek bir verici LED kullanıldığı durumda ışığın alıcıya geliş açısına göre kanal yapısının ne ölçüde değiştiği ve farklı geçiş bandına sahip optik filtreler kullanıldığında bu değişimin BER başarımı üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Bu analiz maviye kaymanın modülasyon türü üzerindeki etkisinin belirlenmesi açısından önemlidir. İkinci incelemede ise birden fazla verici LED kullanıldığı durumda oluşan toplamsal etkilerin haberleşme üzerindeki baskınlığının incelenmesi için bir laboratuvar ortamı modellenerek CSK modülasyonunun başarımı incelenmiştir. Genellikle aydınlatma sistemlerinde birden fazla LED kullanıldığından dolayı bu inceleme ile pratik VLC uygulamalarında CSK modülasyonunun performansı elde edilmiştir.

Çalışmanın devamında maviye kayma etkilerinin giderilmesine yönelik oluşturulan filtre bankası alıcı yapısı CSK modülasyonuna uygulanarak mevcut yapı ile karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Filtre bankası yapısında renk kanalı sayısından daha fazla optik filtre ve PD kullanıldığından dolayı mevcut CSK yapısı ile karşılaştırılırken toplam PD yüzey alanlarının eşitlenerek verici gücüne göre elde edilen BER başarımları incelenmiştir. Bu incelemede filtre bankası yapısının maviye kayma etkilerini giderebilmesi için çok sayıda PD'ye ihtiyacı olduğu ve bu durumda mevcut sistemler ile aynı BER başarımına ulaşabilmesi için daha fazla verici gücüne ihtiyaç duyduğu gösterilmiştir.

Daha sonra maviye kayma özelliğinin standartta belirtilen renk kalibrasyonu yönteminin kanal kestirim başarımını ne düzeyde etkilediği incelenerek bu çalışmada önerilen uyarlanır denkleştirici yapısı ile karşılaştırılmıştır. İki yöntem öncelikle maviye



kaymanın baskınlığının incelenmesi açısından, tekli verici LED kanal modelinde geliş açılarının değiştiği durumlarda aynı eğitim dizisi uzunluğu için elde ettikleri BER başarımlarına göre karşılaştırılmıştır. Burada uyarlanır denkleştirici yapısının düşük uzunlukta eğitim dizisi için renk kalibrasyonuna göre daha iyi kanal kestirimi gerçekleştirdiği ve genel olarak gürültüden daha az etkilenen kararlı bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Uzun eğitim dizisi kullanıldığında ise iki yöntemin yaklaşık aynı BER performansına ulaştığı görülmüştür. Pratik uygulamalar ile uygun olması için oluşturulan çoklu LED kapalı mekan modelinde ise bu iki yöntemin belirli verici güçlerine göre ortam içerisinde elde ettikleri BER dağılımları karşılaştırılmış ve uyarlanır denkleştiricinin bu durumda da daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Bu çalışmada son olarak çok yolluluk ve ortamın yansıtıcılık özelliklerinin CSK performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüksek anahtarlama hızlarında VLC kanalının NLOS bileşeni önem kazandığı için bu simülasyon çalışmalarında bir ve iki yansıma durumları dikkate alınarak kanal tepkisi elde edilmiştir. Daha sonra çoklu LED kapalı mekan modelinde ortam duvarlarının beyaz renkli olduğu durumda 20, 80 ve 160 MHz anahtarlama hızları için CSK modülasyonu ile ulaşılan ortalama sembol hata oranları elde edilmiştir. Burada anahtarlama hızındaki artışın CSK performansını ciddi oranda düşürdüğü ve uyarlanır denkleştirici yapıları kullanılarak bu etkilerin düzeltilebileceği gösterilmiştir. Ortamın yansıtıcılık özelliklerinin incelenmesi için ise kapalı mekan modelinin duvar renkleri değiştirilerek ortamın renk seçici olması sağlanmış ve simülasyonlar bu durumda tekrarlanmıştır. Burada elde edilen sonuçlarda ise renk seçici ortamın oluşturduğu kanallar arası dengesizlik ve çok yolluluk etkileri birlikte olduğu durumda haberleşme performansını ciddi oranda olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu durumda önerilen yeni adaptif denkleştirici yapısı ile en iyi sonuca ulaşılmıştır.

## 2.2. Simülasyon Çalışmalarında Kullanılan Kanal Modelleri

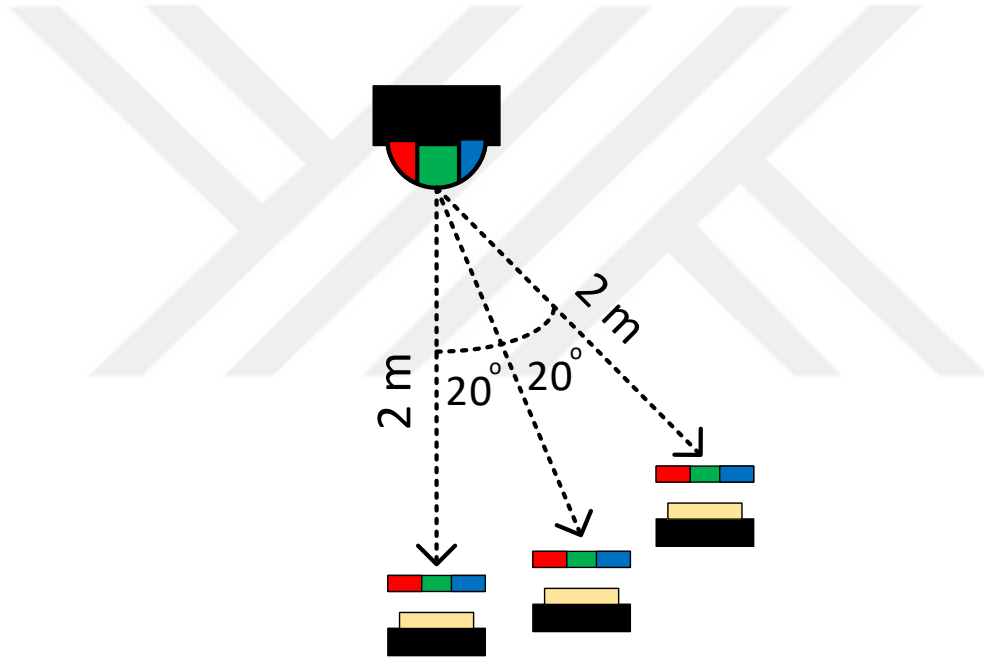
Haberleşme sistemlerinde performans analizinin simülasyon ortamında gerçekleştirilebilmesi için fiziksel sistemin uygun şekilde modellenmesi kritik öneme sahiptir. Fiziksel haberleşme ortamının tamamen sanal ortamda modellenmesi mümkün olmadığından bazı kabuller yapılarak sistem temsil edilebilir, ancak yapılan tüm kabuller gerçek sistem ile simülasyon arasında bir miktar farka neden olur ve dikkatli olunmazsa fiziksel sistem yeterince iyi incelenemez. Bu nedenle haberleşme sisteminin tüm bileşenleri,



oluşturacağı bozucu etkiler açısından incelenmelidir. Bu bölümde yapılan çalışmalarda, biri teorik inceleme diğeri ise günlük hayattaki uygulamalar ile uyumluluk açısından oluşturulan iki farklı haberleşme ortamı tanıtılmıştır.

### 2.2.1. Tekli Verici LED Kanal Modeli

Bu bölümde optik filtrelerin maviye kayma özelliklerinin haberleşme üzerindeki etkisinin incelenmesi açısından bir verici LED ve farklı açılarda konumlandırılmış alıcılar olmak üzere oluşturulan basit bir VLC sistemi anlatılmıştır. Bu sistem Şekil 2.1’de görselleştirildiği gibidir.



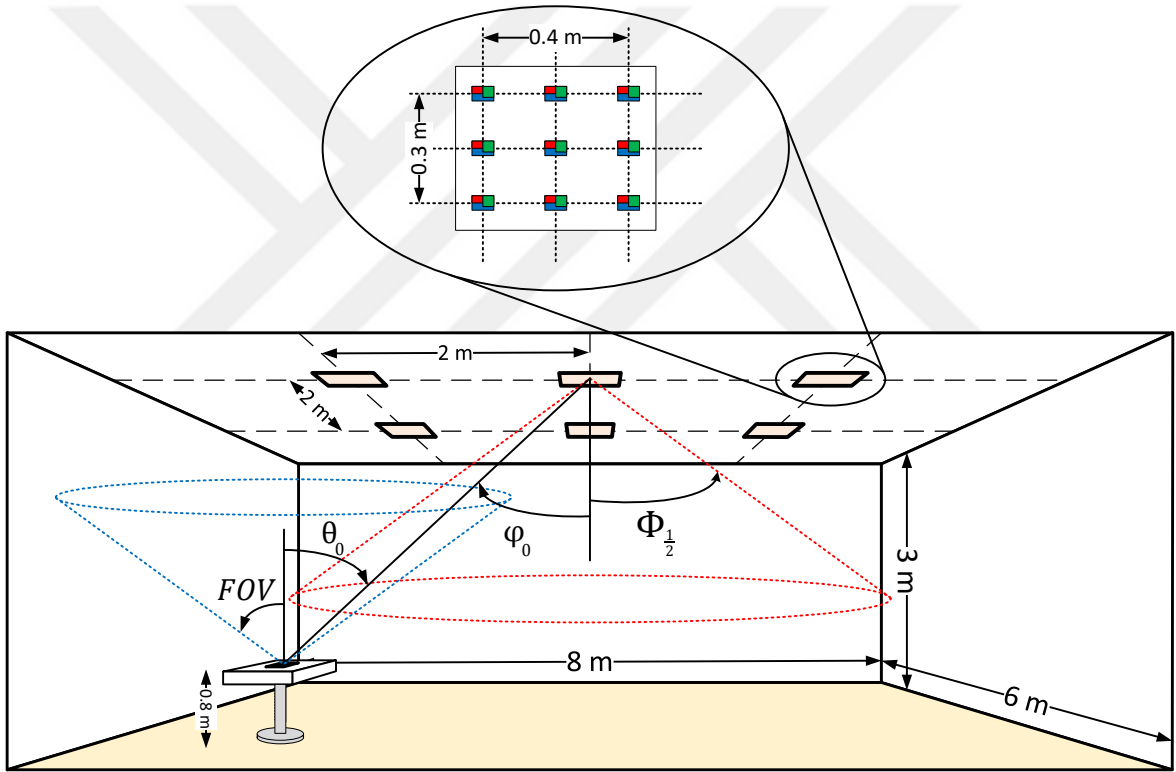
Şekil 2.1. Tek verici LED kullanılan model

Burada RGB LED’in kırmızı, yeşil ve mavi bileşeni ile her bir renk kanalı için kullanılması gereken PD’lerin noktasal olduğu kabul edilmiştir. Bilindiği gibi maviye kayma özelliği geliş açısı ile ilişkili olduğundan dolayı 0°, 20° ve 40° görüş açıları için VLC kanalı hesaplanarak haberleşme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm açılarda PD ile LED arasındaki mesafe 2 m olarak seçilerek verici gücüne göre karşılaştırma gerçekleştirildiğinde yol kayıplarının her durumda yaklaşık aynı olması sağlanmıştır.



### 2.2.2. Çoklu Verici LED Kapalı Mekan Kanal Modeli

Tekli verici LED modeli maviye kayma özelliğinin haberleşme üzerindeki etkisi ve elde edilebilecek teorik başarımlar gibi önemli bilgileri elde etmemizi sağlamaktadır. Ancak pratikte gerçekleştirilen VLC uygulamalarında genellikle farklı noktalara yerleştirilmiş birden fazla verici LED kullanılarak haberleşme ve aydınlatma işlemi gerçekleştirilir. Yapılan incelemelerin pratik uygulamalar ile uyumlu olması ve maviye kayma özelliğinin birden fazla LED ile oluşturduğu toplamsal etkinin incelenmesi açısından oluşturulan ortam modeli Şekil 2.2’de görselleştirilmiştir [41].

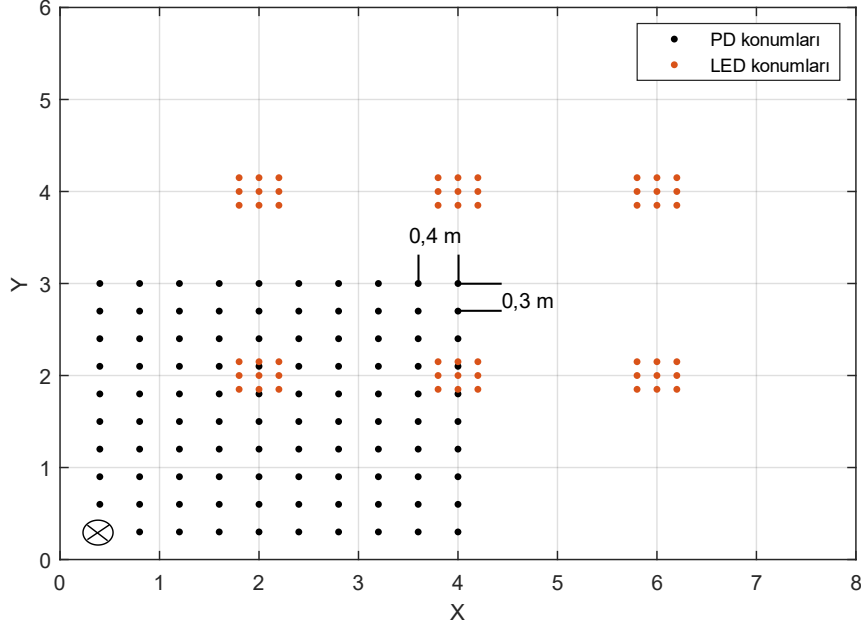


Şekil 2.2. Çoklu verici LED kullanılan kapalı mekân modeli

Burada görüldüğü gibi 8x6x3 m boyutlarındaki oda için 6 adet armatür genel aydınlatma sistemlerini temsil etmesi açısından ortam içerisinde homojen bir aydınlatma oluşacak şekilde konumlandırılmıştır. Kanal hesaplamalarında armatür içerisindeki RGB LED’ler Şekil 2.2’de verildiği gibi konumlandırılmıştır, ancak RGB LED’lerin renk bileşenleri noktasal kabul edilmiştir. Alıcı ise ortalama bir masa yüksekliği olan 0,8 m sabit yükseklikte tutularak yatay ekseninde oda genişliğinin performansını verecek konumlara



yerleştirilmiştir. Burada yine renk kanalları için kullanılan optik filtre ve PD'ler noktasal olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Oluşturulan kapalı mekan boş ve simetrik olduğundan dolayı ortamdaki performans dağılımının elde edilmesi için Şekil 2.3'te verilen alıcı konumlarında kanal hesaplamaları yapılarak haberleşme simülasyonlarının gerçekleştirilmesi yeterli olacaktır.



Şekil 2.3. Kapalı mekan modelindeki LED ve PD konumları

Bu çalışmada yapıldığı gibi çoklu ışık kaynağının kullanıldığı VLC uygulamalarında kanalın sadece LOS bileşeninin hesaplanması yeterlidir [31]. Bu nedenle bu çalışmada yüksek anahtarlama hızlarına çıkılmadığı incelemelerde sadece LOS bileşeni dikkate alınarak haberleşme kanalının birim dürtü yanıtı hesaplanmıştır. Ancak bu durumda  $FOV$  açısı  $45^\circ$  seçildiğinden dolayı  $(0,4; 0,3)$  konumuna yeterli güçte ışın ulaşmamaktadır. Bu nedenle CSK modülasyonunun oda modelindeki ortalama performansına bu nokta dahil edilmemiştir.

Oluşturulan kanal modellerinden kullanılan elemanların parametrelerinin gerçek dünya ile uyumlu olması açısından ticari olarak satılan ürünler üzerinden veya üretilmesi mümkün olacak ürünlere göre seçilmesi önemlidir. Bu nedenle oluşturulan iki model için de verici olarak Cree® firması tarafından üretilen ve satışa sunulan XLamp® XM-L Color [42] LED'i seçilmiştir. Bu LED'in kanal için önemli parametreleri Tablo 2.1'de verildiği gibidir.



Tablo 2.1. LED Parametreleri [42].

Sembol	Açıklama	Değer
$\Phi_{1/2}$	LED görüş yarı açısı	65°
$P_t$	LED gücü	10 [W]
$\gamma$	Elektro optik verimliliği	111 [lm/W]

Optik filtre seçiminde geçiş bandı sınırları çalışmalarda yapılan hesaplamalar sonucunda elde edildiğinden dolayı bu değerlere uygun ürün bulmak oldukça zordur. Bu nedenle kullanılan optik filtre parametreleri Tablo 2.2’de verildiği gibi ideal geçiş bandına yakın filtrelerin üretilmesine olanak tanıyan, çok katmanlı ince film yapısına uygun olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 2.2. Optik filtre parametreleri

Sembol	Açıklama	Değer
$t$	Filtre kazancı	1,0
$n^{(s)}$	S polarizeli ışık için etkin kırılma indeksi	2,1
$n^{(p)}$	P polarizeli ışık için etkin kırılma indeksi	1,9

Fotodedektörler ise yüzey alanları gibi alıcıda oluşan gücü doğrudan etkileyen önemli parametrelere sahiptir. Bu nedenle filtre bankası gibi farklı sayılarda PD’nin bulunduğu alıcı yapılarının mevcut sistemlerle karşılaştırılırken, iki yöntemin de toplam PD yüzey alanlarının eşit olacak şekilde belirlenmesi önemlidir. Buna göre filtre bankası yapısında kullanılan alıcı sayısı  $M$  olmak üzere kullanılan PD parametreleri Tablo 2.3’te verilmiştir.

Tablo 2.3. PD parametreleri

Sembol	Açıklama	Değer
$R$	PD’nin duyarlılığı	0,54 [A/W]
$A_{PD1}$	Mevcut sistemler için PD yüzey alanı	1,0 [cm <sup>2</sup> ]
$A_{PD2}$	Filtre bankası yapısı için PD yüzey alanı	3/ $M$ [cm <sup>2</sup> ]
$FOV$	PD’nin görüş alanı	45°

Bunların dışında alıcıda FET’li yükselteç yapısının kullanıldığı düşünülerek oluşacak ısı ve atış gürültülerinin parametreleri seçilmiştir. Bu seçimler literatürde yapılan



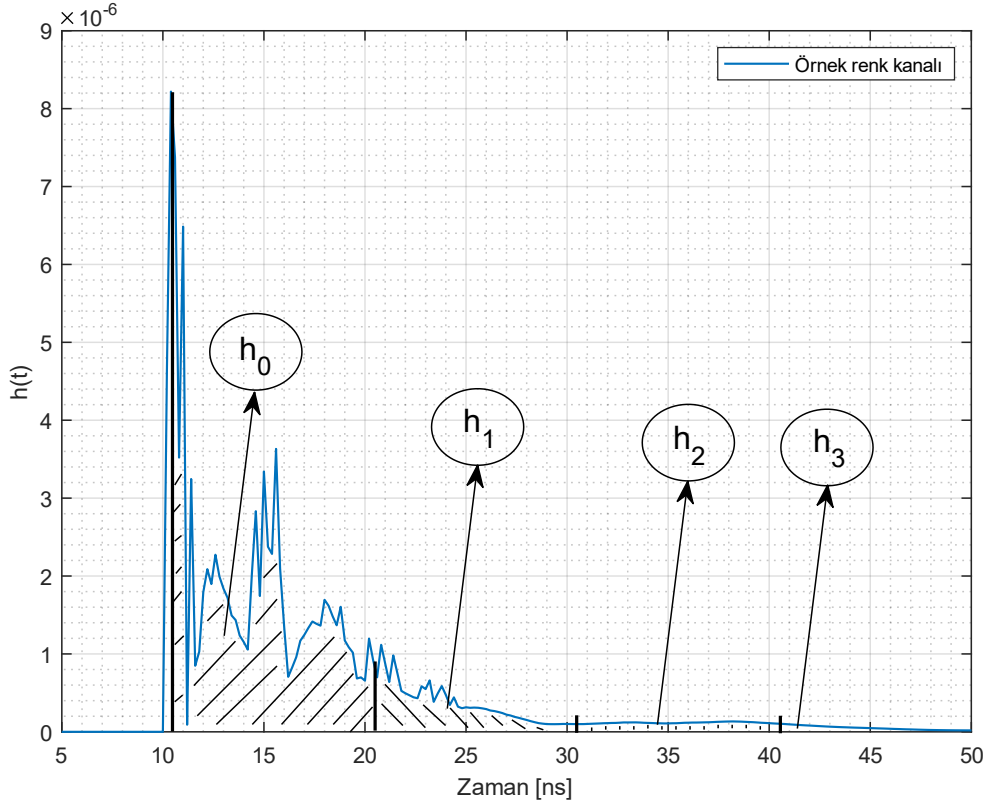
çalışmalarla uyumlu olması açısından [41] numaralı çalışmada kullanılan değerlere göre belirlenmiştir.

Tablo 2.4. Gürültü ile ilgili parametreler [41].

Sembol	Açıklama	Değer
$k$	Boltzman sabiti	$1,38 \times 10^{-23} [J/K]$
$T_k$	Mutlak sıcaklık	298 [K]
$G$	Açık çevrim gerilim kazancı	10
$I_2$	Gürültü band genişliği faktörü	0,562
$I_3$	Gürültü band genişliği faktörü	0,0868
$I_{bg}$	Arka plan akımı	5100 [ $\mu A$ ]
$C_p$	Sabit kapasite	112 [ $pF/cm^2$ ]
$\Gamma_F$	FET kanal gürültü faktörü	1,5
$g_m$	FET'in geçiş iletkenliği	30 [ $mS$ ]
$q$	Elektrik yükü	$1,602 \times 10^{-19} [C]$
$B$	Anahtarlama band genişliği	20, 80, 160 [MHZ]

Çalışmanın renk girişimi etkilerinin incelendiği bölümlerinde 20 MHz anahtarlama hızı seçilerek çok yolluluk etkileri göz ardı edilmiş ve kanal hesaplamalarında sadece LOS bileşeni dikkate alınmıştır. Son bölümde ise anahtarlama hızlarındaki artışın neden olduğu semboller arası girişim etkilerinin incelenmesi için bir yansımanın olduğu NLOS bileşeni dikkate alınarak kanal hesaplamaları Bölüm 1.3.4'te anlatıldığı gibi yapılmıştır. Bu işlemler gerçekleştirilerek kanal tepkesi zamana bağlı olarak elde edildikten sonra kanal tablaları integral al-ve-dök sezici yapısına göre belirlenmiştir. Bunun için zaman gecikmesi göz ardı edilerek kanal tepkesinin başlangıcından itibaren anahtarlama periyotları boyunca tepkenin altında kalan alanlar hesaplanmıştır. Bu şekilde tüm renk kanalları için kanal tablaları elde edildikten sonra Bölüm 1.3.4.5'te anlatıldığı gibi gönderilen işaret kanal tepkesi ile konvolüsyon işlemine tabii tutularak alıcıda oluşan işaret elde edilebilir. Şekil 2.4'de örnek bir kanal tepkesi için kanal tablalarının karşılık geldiği alanlar görselleştirilmiştir.





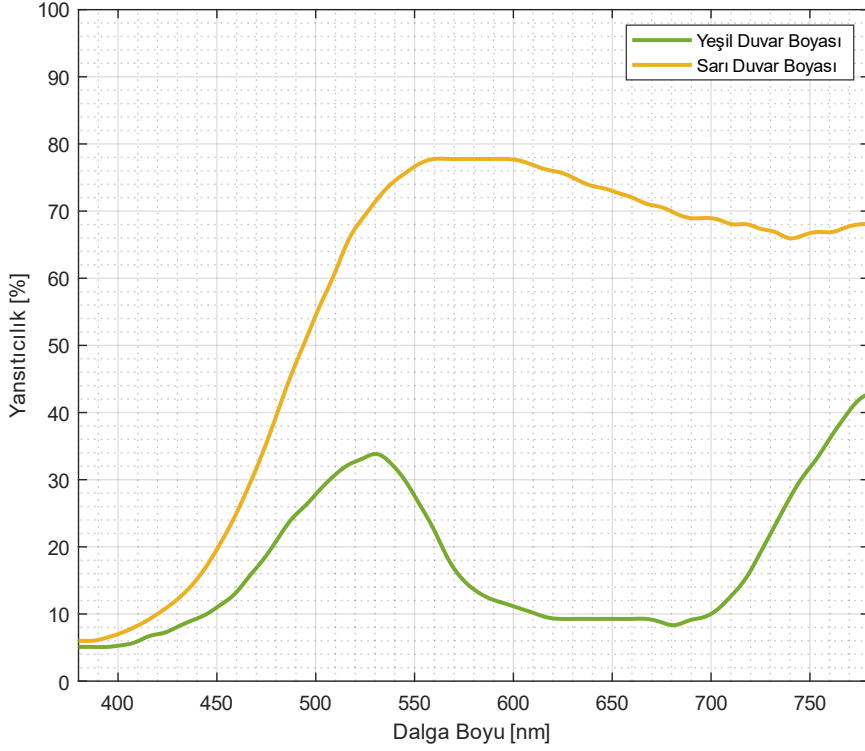
Şekil 2.4. Örnek renk kanalı için 100 MHz anahtarlama hızında kanal tablarına karşılık gelen alanlar

Burada görüldüğü gibi oluşturulan kapalı mekan modeli için kanal tepkeleri genellikle 40 ns genişliğinde olmaktadır. Bu genişlikten sonra alınan işaret gürültü seviyesinin altında kaldığından dolayı yapılan simülasyon çalışmalarında haberleşme kanalının ilk 4 tabı dikkate alınmıştır.

Ortamın yansıtıcılık özellikleri VLC uygulamalarında renk kanalları arasında dengesizliğe neden olabilir. Renk seçici cisim olarak adlandırılan, görünür ışık spektrumunun bir bölümünü yansıtıp başka bir bölümünü soğuran cisimlerin ortam içerisindeki yoğunluğuna veya yansıtıcılık karakteristiğine göre bu etkilerin önemi değişkenlik gösterebilir. Örneğin mavi renkli bir cisim genel olarak görünür ışığın mavi dalga boyundaki bölgeleri yansıtırken, sarı renkli cisim ise kırmızı ve yeşil renkli bölümleri yansıtmaktadır. Bu nedenle çalışmanın son bölümünde CSK modülasyonu için renk seçici cisimlerin neden olduğu renk dengesizliği etkileri de incelenmiştir. Bunun için oluşturulan kapalı mekan modelinin duvarları farklı renklerde seçilerek haberleşme performansındaki değişim analiz edilmiştir. Şekil 2.5'te seçilen duvar renklerinin dalga boyuna göre yansıtıcılık yüzdesi verilmiştir [34, 43].







Şekil 2.5. Duvar boyalarının dalga boyuna göre yansıtıcılık değişimleri [34, 43]

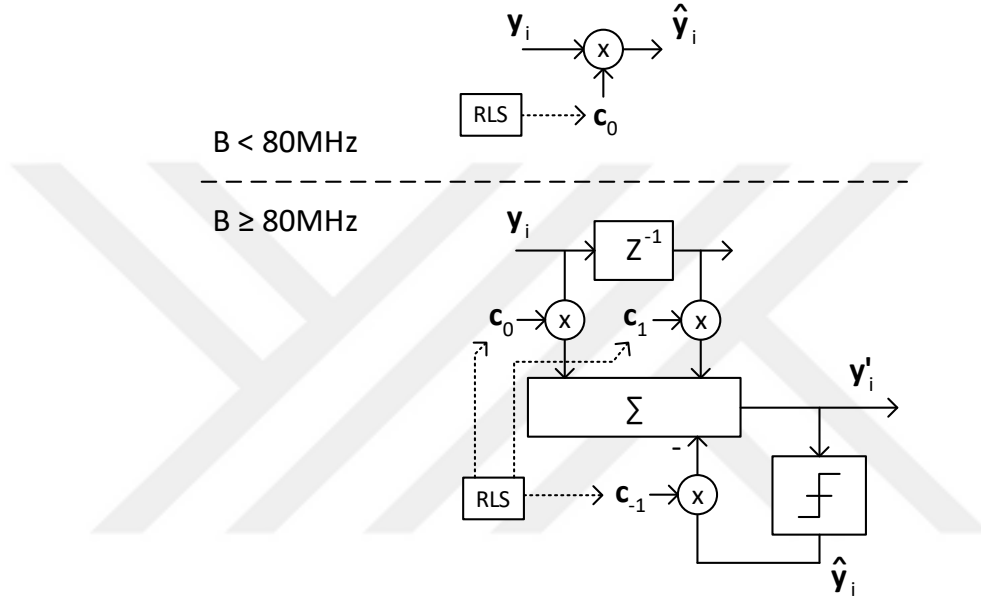
Burada görüldüğü gibi sarı duvar boyası genel olarak görünür ışık spektrumunun yeşil ve kırmızı bölümünü yansıtırken, yeşil duvar boyası ise sadece yeşil dalga boylarını yansıtmaktadır. Bu renk seçimlerinin bir diğer nedeni de sarı rengin CSK modülasyonunda sadece bir renk kanalını sönmülerken, yeşil rengin iki renk kanalını zayıflatmasıdır. Böylelikle farklı kanal dengesizliği durumları için incelemeler gerçekleştirilmiş olacaktır.

Çalışmanın devamında bu bölümde anlatılan kanal yapıları ve senaryolar için yapılan incelemeler ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Karşılaştırmaların yapılacağı referans durum için öncelikle CSK modülasyonunun AWGN kanalı altındaki performansı elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla tekli verici LED modeli kullanılarak maviye kayma özelliğinin CSK modülasyonu üzerindeki baskınlığı incelenmiş ve filtre bankası yapısı ile mevcut sistemlerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Devamında ise kapalı mekan modeli kullanılarak kanalın oluşturduğu bozucu etkilerin giderilmesi için standartta tanımlanan renk kalibrasyonu yöntemi ile bu çalışmada önerilen uyarlanabilir denkleştirici yapısı farklı durumlar için karşılaştırılmış, son bölümde ise çok yolluluk ve renk seçici cisimleri oluşturduğu bozucu etkiler incelenmiştir.



### 2.3. Önerilen Uyarlanırlı Denkleştirici Yapısı

VLC kanalının yapısı haberleşme hızına göre çok taplı olarak davranabilmektedir. Bu nedenle önerilen denkleştirici yapısı anahtarlama hızına göre farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.6’da simülasyon çalışmalarında kullanılan denkleştirici yapıları görselleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Önerilen uyarlanırlı denkleştirici yapıları

Burada her  $c_n$  denkleştirici katsayısı  $3 \times 3$  boyutunda bir matristir. Görüldüğü gibi anahtarlama hızının 80 MHz’nin altında olduğu durum için tek taplı bir denkleştirici önerilirken, üzerindeki anahtarlama hızlarında ikisi ileri biri geri yön olmak üzere üç taplı DFE yapısı önerilmektedir. Yapılan simülasyonlarda kullanılan denkleştirici parametreleri Tablo 2.5’te verilmiştir.

Tablo 2.5. Denkleştirici parametreleri

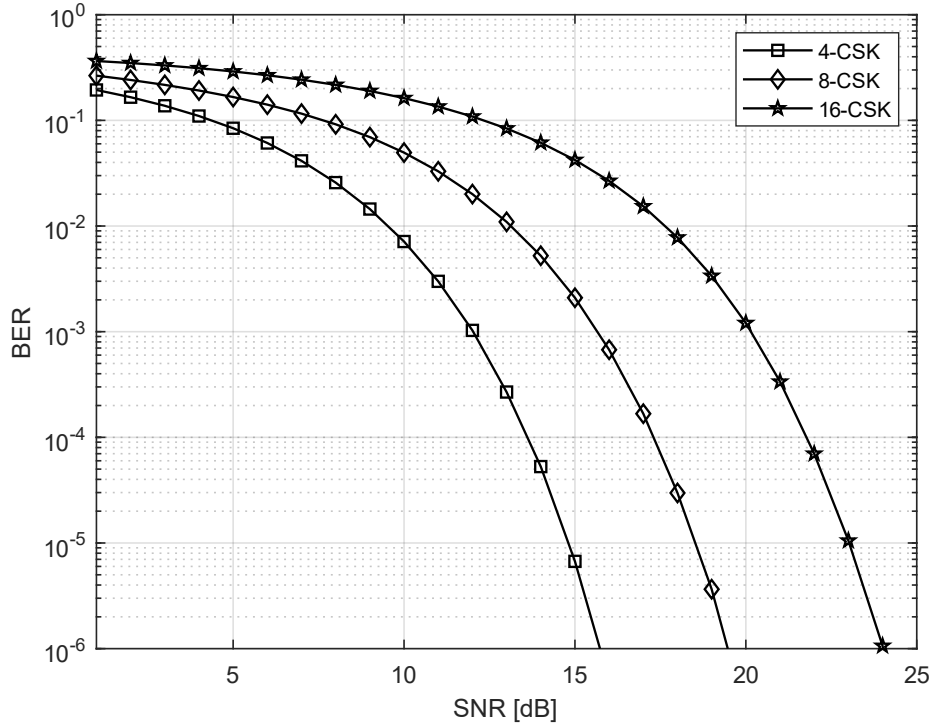
Sembol	Açıklama	Değer
$\omega$	Unutma faktörü	0,999
$c_n(0)$	Denkleştirici katsayılarının başlangıç değeri	$\begin{bmatrix} 1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 1 \end{bmatrix}$



## 2.4. AWGN Kanal İçin Sayısal Sonuçlar

AWGN kanal performansı genel olarak modülasyon türlerinin teorik başarımını incelemek için gerçekleştirilen analizlerden bir tanesidir. Bu çalışmada CSK modülasyonunda VLC kanalının oluşturduğu bozucu etkiler, AWGN kanal performansı referans alınarak değerlendirilecektir.

Haberleşme sistemlerinin tasarımında verici gücünün uygun olarak seçilmesi güç tüketimi açısından önemlidir. Verici gücünün belirlenmesinde haberleşmenin gerçekleştirileceği ortam gürültüsü önemli bir parametredir. Bu nedenle sinyal gürültü gücü oranına (Signal to Noise Ratio, SNR) göre BER olasılığının değişimi haberleşme sisteminin analizi açısından önemli bilgiler içermektedir. Bu çalışmada ilk olarak sadece VLC kanalının oluşturduğu ısı ve atış gürültüleri dikkate alınarak 4, 8, 16-CSK için SNR-BER başarımları Şekil 2.7’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 2.7. CSK modülasyonu SNR-BER performansı

Burada, beklenildiği gibi modülasyon seviyesi arttıkça düşük modülasyon seviyesine göre aynı BER başarımını elde edebilmek için daha yüksek SNR değerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.



## 2.5. Tekli Verici LED Kanal Modeli İçin Performans Analizleri

Bölüm 1.3.5'te anlatıldığı gibi VLC kanalı haberleşme açısından pek çok bozucu etki oluşturmaktadır. Bu bölümde Şekil 2.1'de görselleştirilen tekli verici LED kanal modeli kullanılarak, renk girişimini arttırıcı yönde etkileyen optik filtrelerin maviye kayma özelliğinin CSK modülasyonu üzerindeki baskınlığı incelenmiştir. Ayrıca maviye kayma etkilerinin giderilmesi için oluşturulan filtre bankası yapısı CSK modülasyonuna uygulanarak mevcut sistemler ile performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

### 2.5.1. Maviye Kayma Özelliğinin Neden Olduğu Renk Girişimi Etkileri İçin Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde renk girişimi etkileri incelendiğinden dolayı AWGN kanaldaki durumun aksine renk kanalları arasındaki girişim ile doğrudan ilişkili olan optik filtrelerin geçiş bandları dikkate alınarak kanal hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle ilk olarak optik filtre sınırlarının öneminin gösterilmesi için üç farklı filtre için kanal yapısı ve CSK başarımları elde edilmiştir. Bunlardan ilki LED'lerin merkez dalga boylarından yarı gücü kapsayacak şekilde belirlenen yarı güç filtre, [19] numaralı çalışmada farklı koşullara göre optimize edilen Fixed AoI ve Statistically Robust filtreleridir. Tablo 2.5'te seçilen filtrelerin geçiş bandı sınırları verilmiştir.

Tablo 2.5. Kullanılan optik filtrelerin geçiş bandı sınırları

Filtreler	Filtre Sınırları [nm]		
	Kırmızı Kanal	Yeşil Kanal	Mavi Kanal
Yarı Güç Filtre	(624; 640)	(508; 550)	(448; 468)
Fixed AoI [19]	(587; 718)	(471; 609)	(380; 489)
Statistically Robust [19]	(592; 764)	(479; 615)	(380; 497)

Bu filtre seçimleri için renk kanalları arasındaki girişim miktarının ve maviye kayma özelliğinin kanallara arası girişimi arttırma miktarının gözlemlenebilmesi için Tablo 2.6'da 0° ve 40° açılara üç filtre için elde edilen kanal matrisleri verilmiştir.



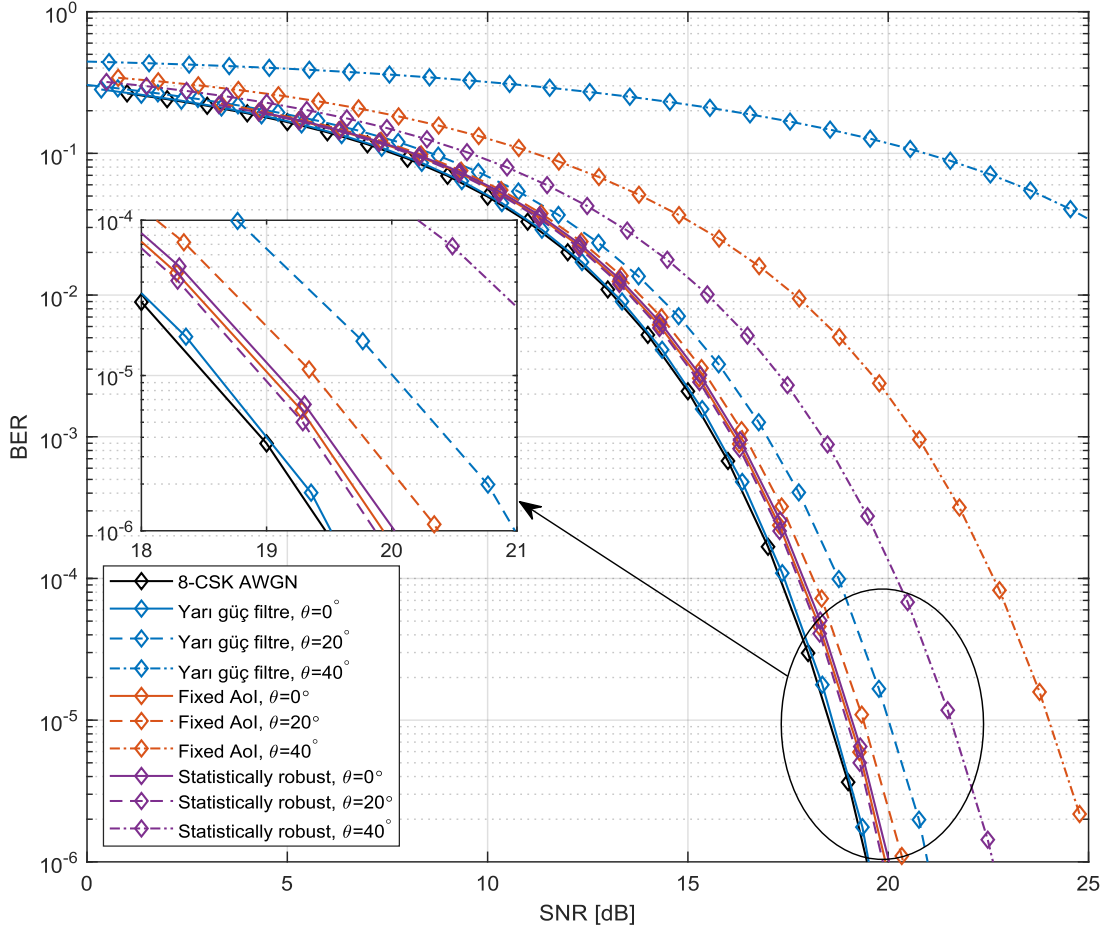
Tablo 2.6. Farklı geliş açıları ve optik filtreler için oluşan kanal matrisleri

Filtreler	Geliş Açısı					
	0°			40°		
Yarı Güç Filtre	$\begin{bmatrix} 0,445 & 0 & 0 \\ 0 & 0,489 & 0 \\ 0 & 0,002 & 0,443 \end{bmatrix} \times 10^{-5}$			$\begin{bmatrix} 0,016 & 0,002 & 0 \\ 0 & 0,194 & 0,017 \\ 0 & 0 & 0,054 \end{bmatrix} \times 10^{-5}$		
Fixed AoI [19]	$\begin{bmatrix} 0,716 & 0,006 & 0 \\ 0,040 & 0,714 & 0,074 \\ 0 & 0,024 & 0,708 \end{bmatrix} \times 10^{-5}$			$\begin{bmatrix} 0,443 & 0,036 & 0 \\ 0 & 0,435 & 0,359 \\ 0 & 0 & 0,335 \end{bmatrix} \times 10^{-5}$		
Statistically Robust [19]	$\begin{bmatrix} 0,714 & 0,004 & 0 \\ 0,075 & 0,709 & 0,032 \\ 0 & 0,054 & 0,714 \end{bmatrix} \times 10^{-5}$			$\begin{bmatrix} 0,443 & 0,026 & 0 \\ 0 & 0,438 & 0,247 \\ 0 & 0,002 & 0,393 \end{bmatrix} \times 10^{-5}$		

Bu tabloya göre geliş açısının 0° olduğu durumda yarı güç optik filtrenin kanal matrisi, birim matrise oldukça yakındır, ancak geçiş bandı dar olduğundan dolayı diğer filtreler göre daha az güç almaktadır. Geliş açısının 40° olduğu durumda ise maviye kayma özelliğinden dolayı alt dalga boyundaki kanalların üst dalga boyuna girişim miktarlarının arttığı ve alınan güçte düşüş yaşandığı görülmektedir. Güçte yaşanan bu düşüşün bir nedeni LED'lerin lambert indeksinden dolayı o doğrultuda daha az ışımaya yapması, diğer nedeni ise maviye kayma özelliğinden dolayı optik filtrelerin geçiş bandının, LED'lerin ışımaya yapmadığı dalga boyuna kaymasıdır.

Kanal yapısında yaşana bu değişimin CSK modülasyonunun performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi için 8-CSK'nın 0°, 20° ve 40° geliş açıları için SNR-BER eğrileri yapılan simülasyonlarla elde edilerek AWGN kanalındaki başarımları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında her bir konum için 2 milyon CSK sembolü gönderilmiş ve kanal matrisinin alıcıda bilindiği kabul edilerek alınan işaret kanal matrisinin tersi ile çarpılmıştır. Bu işlem 50 Monte Carlo döngüsü ile tekrarlanmış ve elde edilen ortalama sonuçlar Şekil 2.8'de verilmiştir.





Şekil 2.8. Optik filtrelerin farklı geliş açıları için 8-CSK performansı

Bu sonuçlara göre geliş açısının  $0^\circ$  olduğu durumda beklenildiği en iyi BER başarımına, kanal yapısı birim matrise en yakın olan yarı güç filtre ulaşmıştır. Ancak geliş açısının artışı ile tüm filtrelerin başarımında düşüş yaşanmasına rağmen en çok etkilenen filtre yine yarı güç filtre olmuştur. Örneğin bu filtre 20 dB SNR değeri için geliş açısının  $0^\circ$  olduğu durumda  $10^{-6}$  altında bir BER başarımına ulaşırken,  $40^\circ$  durumunda 0,1'in üzerinde BER değerine kadar ulaşabilmiştir. Bu değer yaklaşık 10 bittin bir tanesinin hatalı algılandığı anlamına gelmektedir ve yüksek hızda haberleşme yapılması istenilen CSK modülasyonu için oldukça kötü bir durumdur.

Maviye kayma etkilerine göre optimize edilen Fixed AoI ve Statistically Robust filtrelerinin ise geliş açısındaki artıştan daha az etkilendiği ve ortalamada statistically robust filtrenin en iyi BER başarımına ulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçlara göre optik filtre sınırlarının ve ışığın geliş açısının CSK performansı ile doğrudan ilişkili olduğu



söylenbilir. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde standart CSK yapısı için ortalamada en iyi sonucu veren Statistically Robust filtre kullanılmıştır.

### 2.5.2. Filtre Bankası Yapısı İçin Sayısal Sonuçlar

Çok renkli VLC uygulamalarında maviye kaymanın neden olduğu renk girişimi etkilerinin giderilmesine yönelik [20] numaralı çalışmada filtre bankası alıcı yapısı önerilmiştir. Bu yapıda Bölüm 1.4’te anlatıldığı gibi alıcıda çok sayıda dar bandlı optik filtre kullanılarak görünür ışık spektrumu küçük parçalara ayırmakta ve böylelikle maviye kayma etkileri giderilmektedir. Bu durumun incelenebilmesi için Tablo 2.7’de CSK modülasyonuna uygulanan filtre bankası yapısının farklı geliş açılarına göre oluşan kanal matrisleri verilmiştir.

Tablo 2.7. Farklı geliş açıları için filtre bankası yapısının kanal matrisleri

Filtre Bankası Yapısı	Geliş Açısı					
	0°			40°		
$M = 8, \gamma = 0,5$	0	0	0,234	0	0	0,024
	0	0,081	0,267	0	0,004	0,162
	0	0,249	0,034	0	0,099	0,142
	0,006	0,186	0	0	0,157	0,003
	0,259	0,018	0	0,013	0,066	0
	0,262	0	0	0,164	0,005	0
	0,009	0	0	0,152	0	0
	0	0	0	0,01	0	0

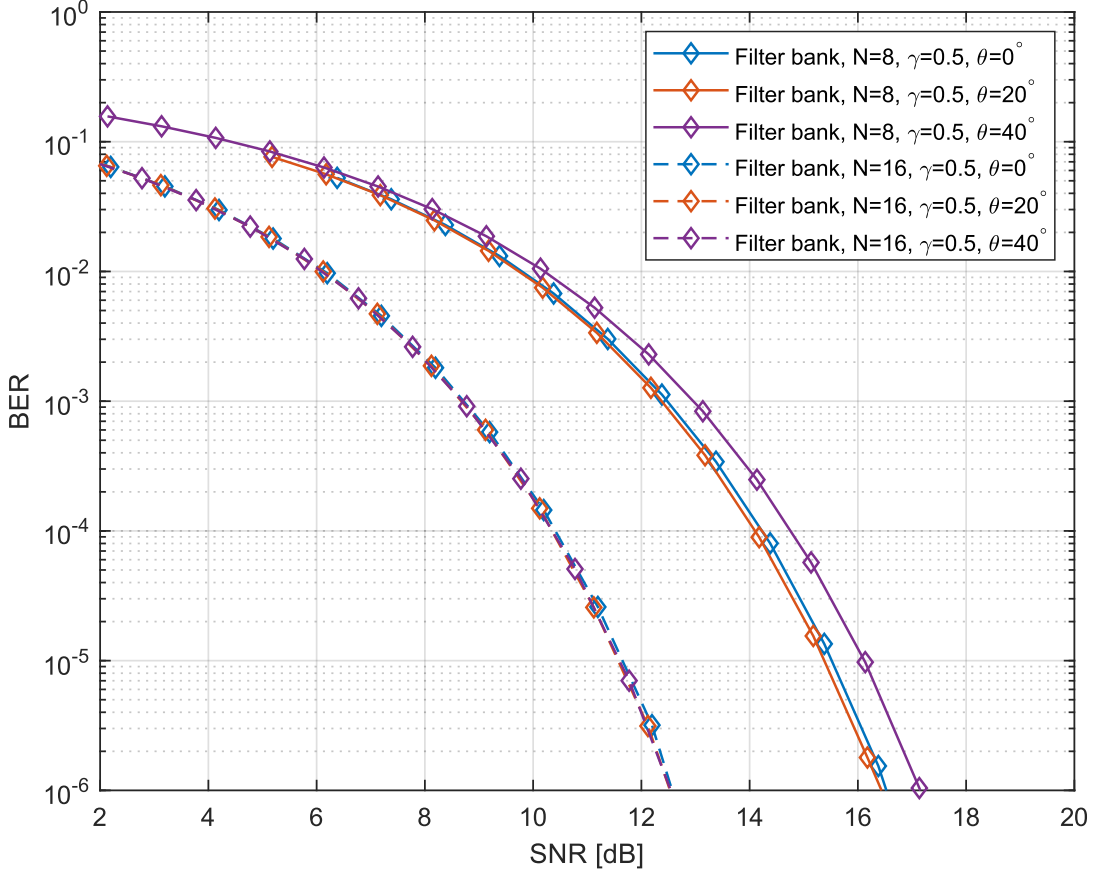
$\times 10^{-5}$

Tabloda görüldüğü gibi filtre bankası yapısında geliş açısının değişmesi ile sadece renk kanallarının algılandığı PD grubu değişmektedir. Örneğin kırmızı renk kanalı geliş açısının 0° olduğu durumda çoğunlukla 5 ve 6 numaralı PD’lerde algılanırken, 40° olduğu durumda 6 ve 7 numaralı PD’lerde algılanmaktadır. Böylelikle PD sayısındaki artış ile çok renkli VLC kanalının geliş açısından bağımsız olması sağlanabilir.

Bu durumun CSK modülasyonunun BER performansı üzerinde gözlemlenmesi için farklı filtre sayısına sahip filtre bankası yapıları için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tekli verici LED kanal modelindeki her bir konum için 2 milyon CSK sembolü gönderilen simülasyonlarda, alıcıda kanal matrisinin bilindiği kabul edilerek hatalı



algılanan bitlere göre SNR-BER eğrileri elde edilmiştir. Bu işlemler yine 50 Monte Carlo döngüsü ile tekrarlanmış ve elde edilen ortalama sonuçlar Şekil 2.9’da verilmiştir.



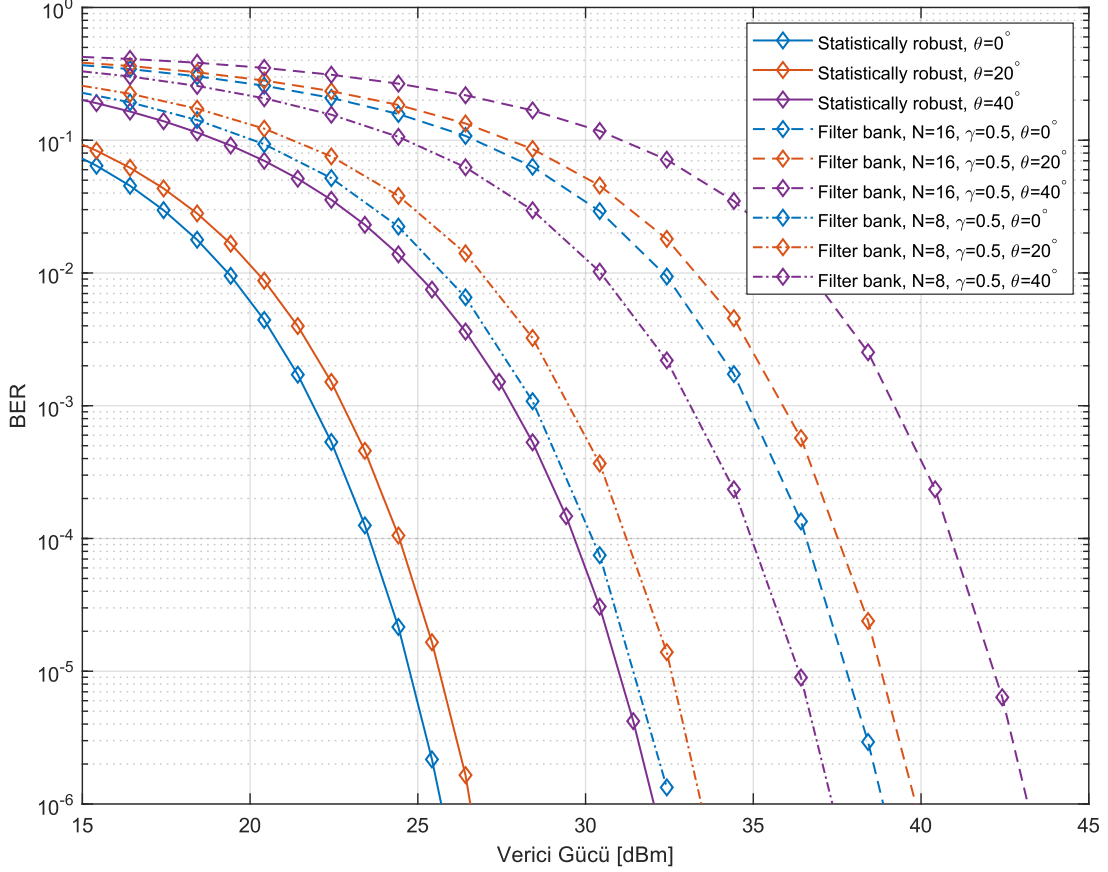
Şekil 2.9. Filtre bankası yapısının farklı filtre sayıları için 8-CSK performansı

Burada görüldüğü gibi filtre bankası yapısında optik filtre sayısı arttıkça geliş açısına göre BER başarımında herhangi bir değişim olmamakta, yani filtre bankası yapısı maviye kayma etkilerini tamamen gidererek CSK modülasyonunun geliş açısından bağımsız olmasını sağlamaktadır. Yine sonuçlarda görüldüğü gibi çok sayıda filtre kullanıldığı durumda filtre bankası yapısının düşük SNR değerlerinde daha iyi BER başarımı elde ettiği sonucuna ulaşılabilir, ancak bu durum PD’lerde algılanan sinyal ve gürültü gücünün optik filtrelerin geçiş bandı ile doğrudan ilişkili olduğu için yanıtıcı olabilmektedir. Farklı sayılarda kanala sahip olan filtre bankası yapısının hem kendi arasında hem de mevcut CSK sistemi ile daha doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için verici gücüne göre elde edilen BER başarımlarının dikkate alınması daha uygun olacaktır.





Bu nedenle Şekil 2.10'da aynı simülasyon parametreleri için 8 ve 16 PD sayısına sahip filtre bankası ve standart CSK yapılarının farklı geliş açıları için elde ettiği Verici Gücü-BER grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.10. Filtre bankası ve standart CSK yönteminin verici gücüne göre karşılaştırılması

Burada görüldüğü gibi her ne kadar filtre bankası yapısı maviye kayma etkilerini gidererek modülasyonun, sinyalin geliş açısından bağımsız olmasını sağlasa da standart CSK yöntemi ile aynı BER başarımına ulaşabilmesi için daha fazla verici gücüne ihtiyaç duymaktadır. Örneğin standart CSK, 8 ve 16 PD sayısına sahip filtre bankası yapıları geliş açısının  $0^\circ$  olduğu durum için  $10^{-6}$  BER değerine sırasıyla yaklaşık 26 dBm, 32,5 dBm ve 38 dBm verici gücünde ulaşabilmektedir. Bu nedenle filtre bankası yapısı kanal etkilerinin giderilmesi açısından CSK modülasyonu için uygun bir yöntem olmadığı söylenebilir.



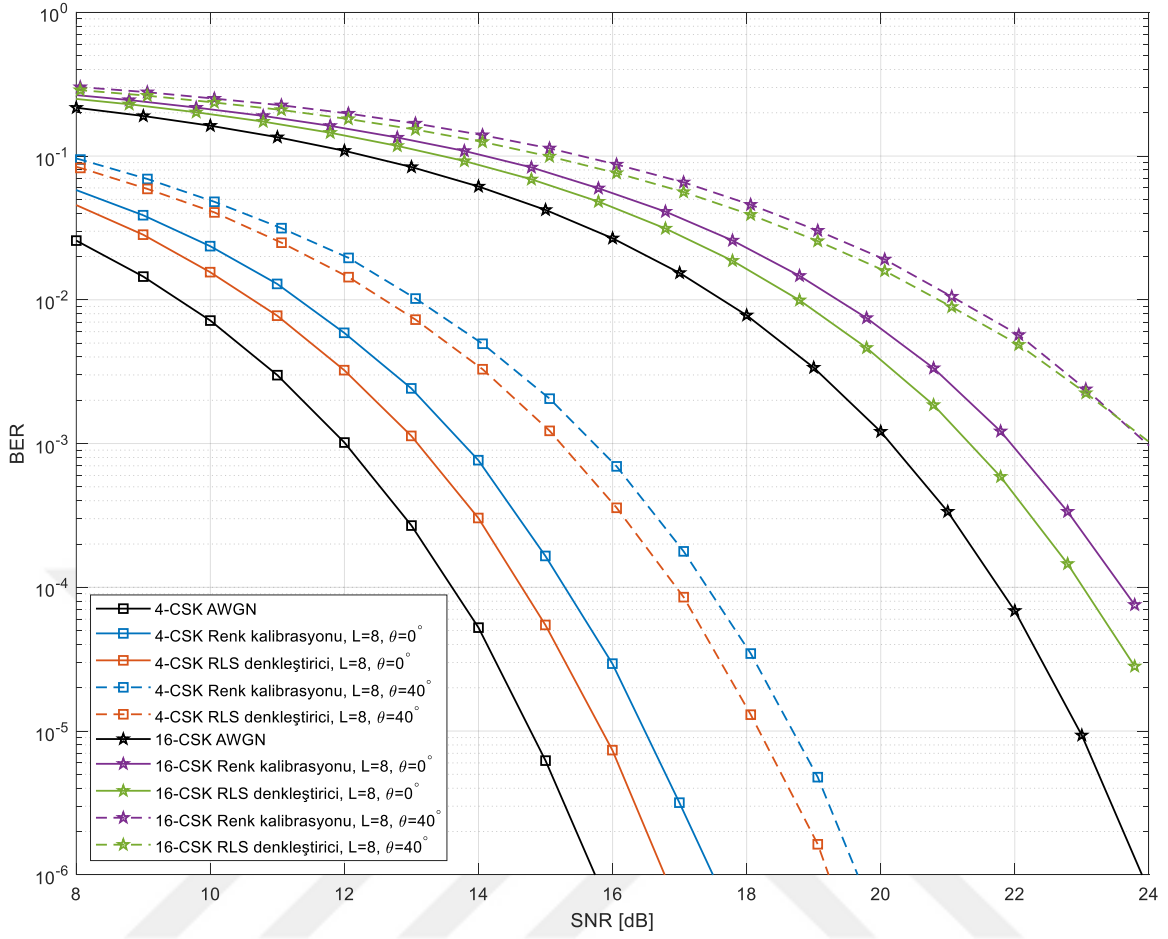
### 2.5.3. Renk Kalibrasyonu ve Uyarlanır Denkleştirici Yöntemleri İçin Sayısal Sonuçlar

Bu bölüme kadar alıcıda kanal bilgisinin bilindiği kabul edilerek işlemler gerçekleştirilmiştir, ancak haberleşme sistemlerinde çoğunlukla alıcıda kanal kestirim işlemi gerçekleştirilerek bozucu etkiler giderilmeye çalışılır. IEEE standardında [3] CSK modülasyonu için Bölüm 1.2.1’de anlatılan renk kalibrasyonu yöntemi tanımlanmıştır. Bu yöntem her ne kadar düşük anahtarlama hızları ve renk girişimi için yeterli görünse de LED teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ile anahtarlama hızlarında yaşan artış ve maviye kayma özelliğinin neden olacağı yüksek miktardaki renk girişimi gibi bozucu etkiler açısından incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada daha önce belirtildiği gibi özellikle çok yolluluk etkilerinin alıcıda giderilmesi zorunluluğu nedeniyle CSK modülasyonu için uyarlanır denkleştirici kullanılması önerilmektedir. Bu nedenle bu ve sonraki bölümlerde bu iki yöntemin öğrenme hızları, oluşturulan kapalı mekân içerisindeki belirli bir verici gücü için elde edilen BER dağılımı, verici güçlerine göre kapalı mekân içerisinde elde edilen ortalama BER başarımı ve farklı anahtarlama hızları için elde ettikleri performans açısından karşılaştırmaları yer almaktadır.

Bu bölümde çok yolluluk etkileri göz ardı edilerek renk kalibrasyonu ve RLS denkleştirici yöntemlerinin aynı uzunluklardaki eğitim dizileri için kanal kestirim yetenekleri karşılaştırılmıştır. Eğitim dizisi olarak 8 ve 32 sembol olmak üzere iki farklı uzunluk seçimi yapılmıştır. 8 sembol uzunluğundaki dizi standartta tanımlanan ve Tablo 1.1’de verilen Walsh dizileridir. 32 sembol uzunluğundaki dizi ise standartta bulunan yapıya bağlı kalınarak oluşturulmuş ve Ek Tablo 2’de verilmiştir.

Bu bilgilere göre yapılan simülasyon çalışmalarında 4-CSK ve 16-CSK modülasyonları için RLS denkleştirici ve renk kalibrasyonu yöntemlerinin 8 sembol uzunluğundaki eğitim dizisi ile elde ettikleri SNR-BER değişimleri Şekil 2.11’de verildiği gibidir. Bu simülasyon çalışmalarında her bir konum için 100 bin sembol gönderilmiş ve 1000 Monte Carlo döngüsü ile elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.



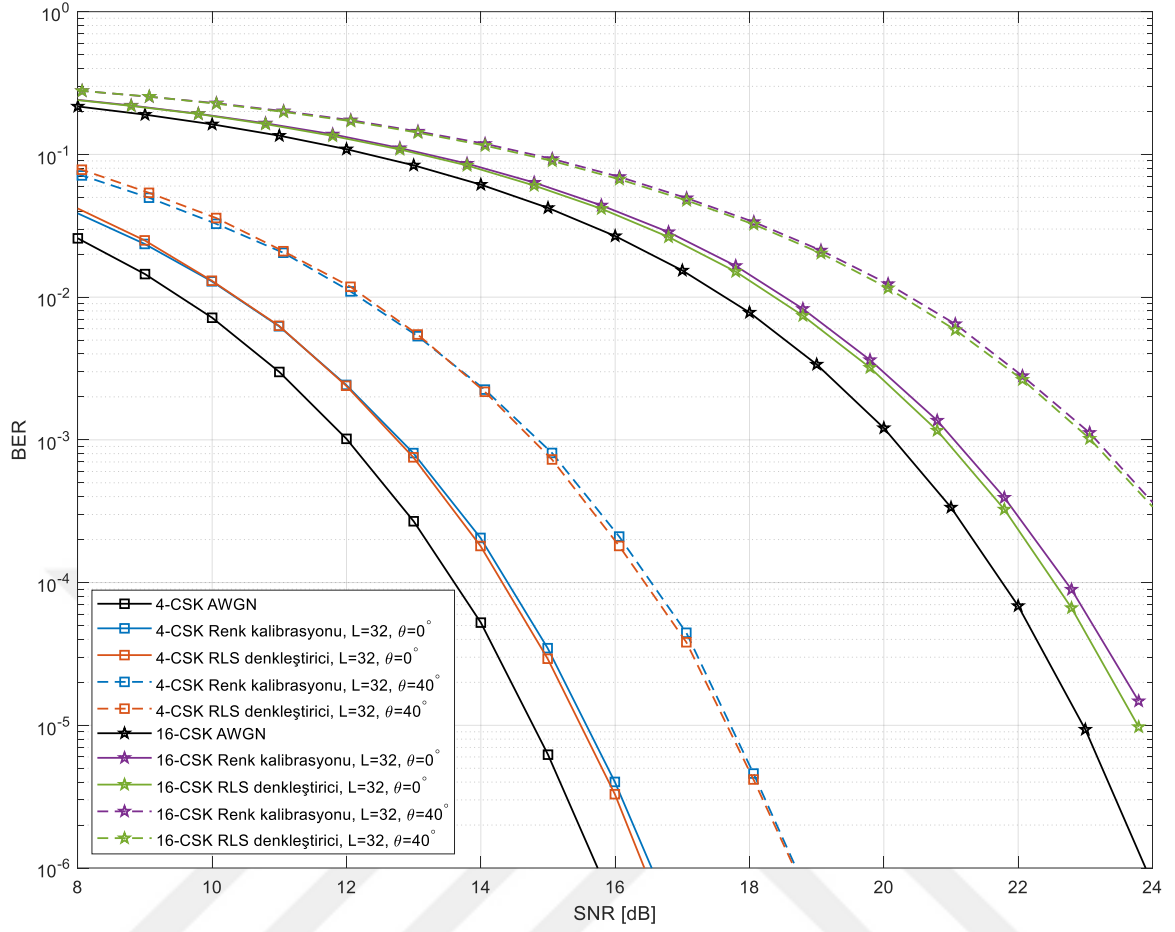


Şekil 2.11. RLS denkleştirici ve renk kalibrasyonu yöntemlerinin 8 sembol uzunluğunda eğitim dizisi için SNR-BER değişimleri

Burada  $L$  eğitim dizisi uzunluğunu temsil etmektedir. Sonuçlara göre RLS denkleştirici, renk kalibrasyonu yöntemine göre geliş açısının  $0^\circ$ , SNR değerinin 16 dB olduğu durum için 4-CSK modülasyonunda yaklaşık 6 dB, 16-CSK modülasyonunda ise 23 dB SNR değeri için yaklaşık 4 dB BER kazancı sağlamıştır. Geliş açısı  $40^\circ$  olduğu durumda ise sonuçlar birbirine bir miktar yakın olsa da yine RLS denkleştirici yöntemi daha iyi BER başarımına ulaşmıştır. Bu verilere göre 8 sembol uzunluğunda eğitim dizisi için RLS denkleştirici kullanımının haberleşme açısından daha uygun olduğu net bir şekilde görülmektedir.

Bu sonuçların 32 sembollük eğitim dizisi kullanıldığı durumda nasıl değişeceğinin incelenmesi için aynı sayıda sembol ve Monte Carlo döngüsü kullanılarak simülasyonlar tekrarlanmış ve elde edilen SNR-BER değişimleri Şekil 2.12’de verilmiştir.





Şekil 2.12. RLS denkleştirici ve renk kalibrasyonu yöntemlerinin 32 sembol uzunluğunda eğitim dizisi için SNR-BER değişimleri

Bu sonuçlara göre 32 sembol uzunluğundaki eğitim dizisi için de RLS denkleştiricinin az miktarda da olsa AWGN kanal performansına yaklaşarak daha iyi BER başarımına ulaştığı görülmektedir. Bu incelemelere göre renk kalibrasyonu yönteminin standartta belirtildiği biçimiyle yetersiz olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Haberleşme açısından daha iyi performans elde edilebilmesi için 8 sembol eğitim dizisi ile RLS denkleştirici kullanılabilir veya 32 sembol uzunluğunda eğitim dizisi seçiminin ile her iki yöntem tercih edilebilir.

## 2.6. Çoklu Verici LED Kapalı Mekan Modeli İçin Performans Analizleri

Çalışmanın bu bölümüne kadar tekli verici LED modeli kullanılarak maviye kayma özelliğinin ideal koşullardaki CSK modülasyonu üzerindeki etkileri incelendi. Bu bölümden



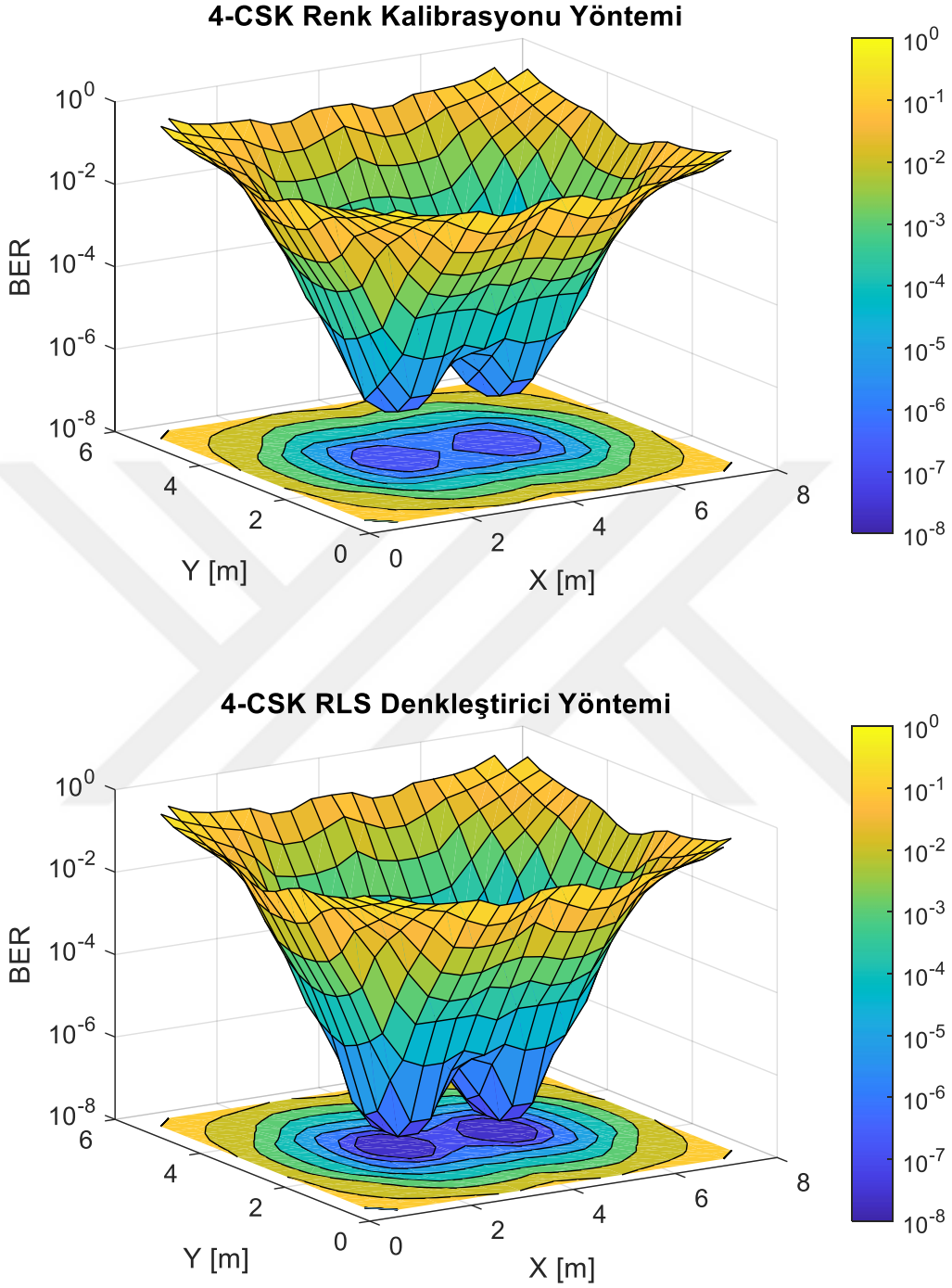
itibaren ise oluşturulan çoklu verici LED kapalı mekan modeli kullanılarak VLC kanalının oluşturduğu bozucu etkilerin pratik uygulamalardaki baskınlığı yapılan simülasyon çalışmaları yardımıyla elde edilmiştir. Bu nedende öncelikle düşük anahtarlama hızlarında maviye kayma özelliğinin toplamsal etkilerin incelenmiş, daha sonra ise anahtarlama hızları ve ortamın yansıtıcılık özellikleri değiştirilerek CSK modülasyonunun elde ettiği başarımlar karşılaştırılmıştır.

### 2.6.1. Maviye Kayma Özelliğinin Toplamsal Etkileri İçin Sayısal Sonuçlar

Önceki bölümlerde maviye kayma etkilerinin tekli verici LED için yüksek miktarda bozucu etki oluşturabileceği gösterilmiştir. Ancak haberleşme sisteminde birden fazla verici LED bulunduğu durumda, ki genellikle pratik VLC uygulamalarında bu şekilde olur, bu özelliğin ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Bunun nedeni örneğin iki adet verici LED kullanıldığı senaryoda, alıcı bir LED ile  $0^\circ$  görüş açısına sahipken diğer LED ile  $40^\circ$  açığa sahip olabilir. Oluşan bu toplamsal etkilerin incelenmesi için bu bölümde Şekil 2.2’de aydınlatma sistemlerine uygun olarak oluşturulan kapalı mekan içerisinde CSK modülasyonunun konuma göre elde ettiği BER dağılımı ve verici gücüne göre ortam içerisinde elde ettiği ortalama BER başarımı açısından incelenmiştir.

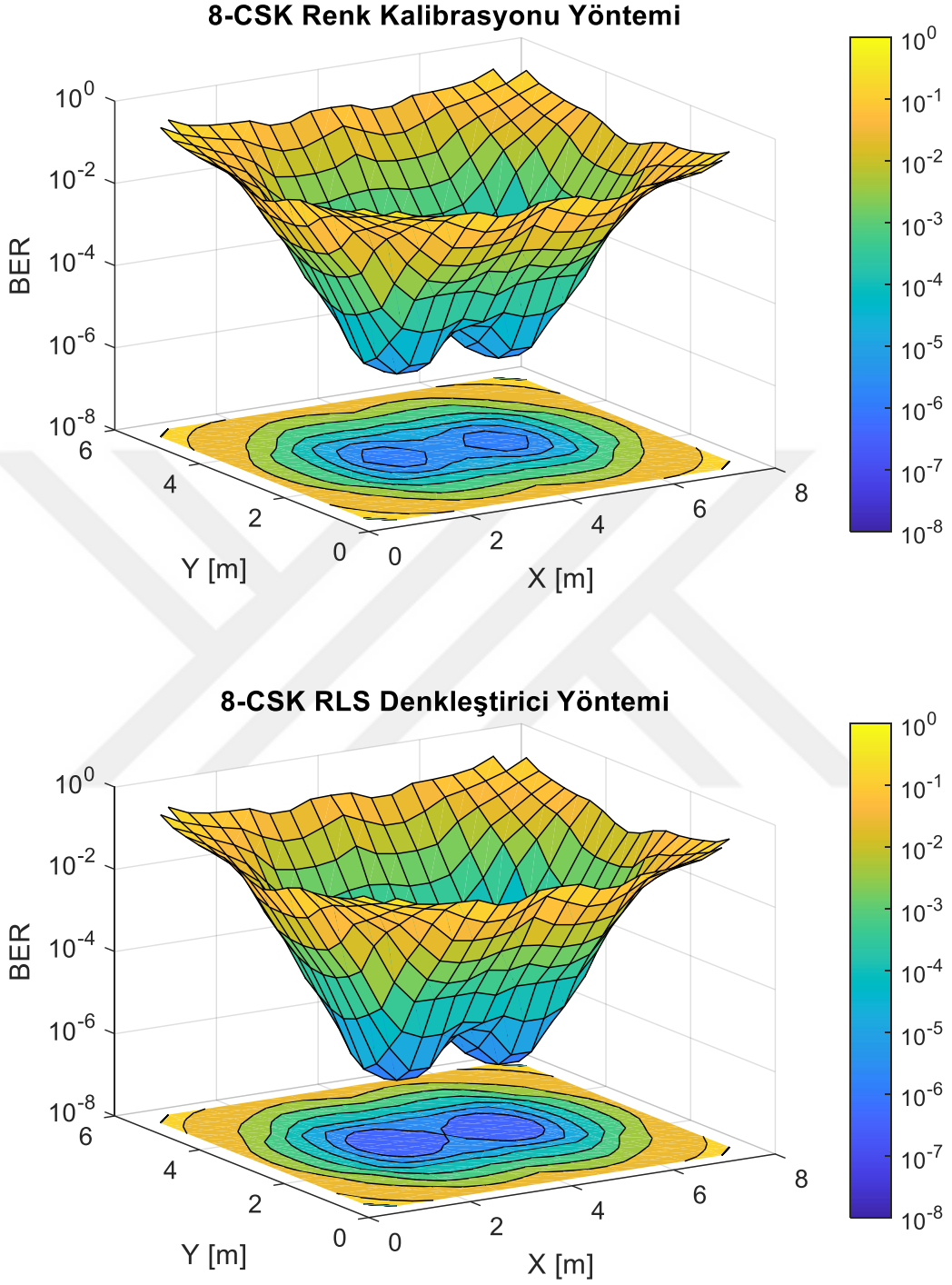
Yapılan simülasyon çalışmalarında ilk olarak önceki bölümlerde üstünlüğü net olarak gösterilen RLS denkleştirici ile renk kalibrasyonu yöntemlerinin 8 sembol uzunluğundaki eğitim dizisi ve belirli verici güçleri için kapalı mekân içerisindeki elde ettikleri BER dağılımları elde edilmiştir. Buna göre Şekil 2.13, 2.14 ve 2.15’te sırasıyla 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK için elde edilen dağılımlar verilmiştir. Bu simülasyon çalışmalarında kapalı mekan içerisindeki her bir konum için 20 bin sembol gönderilmiş ve 1000 Monte Carlo döngüsü ile elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.





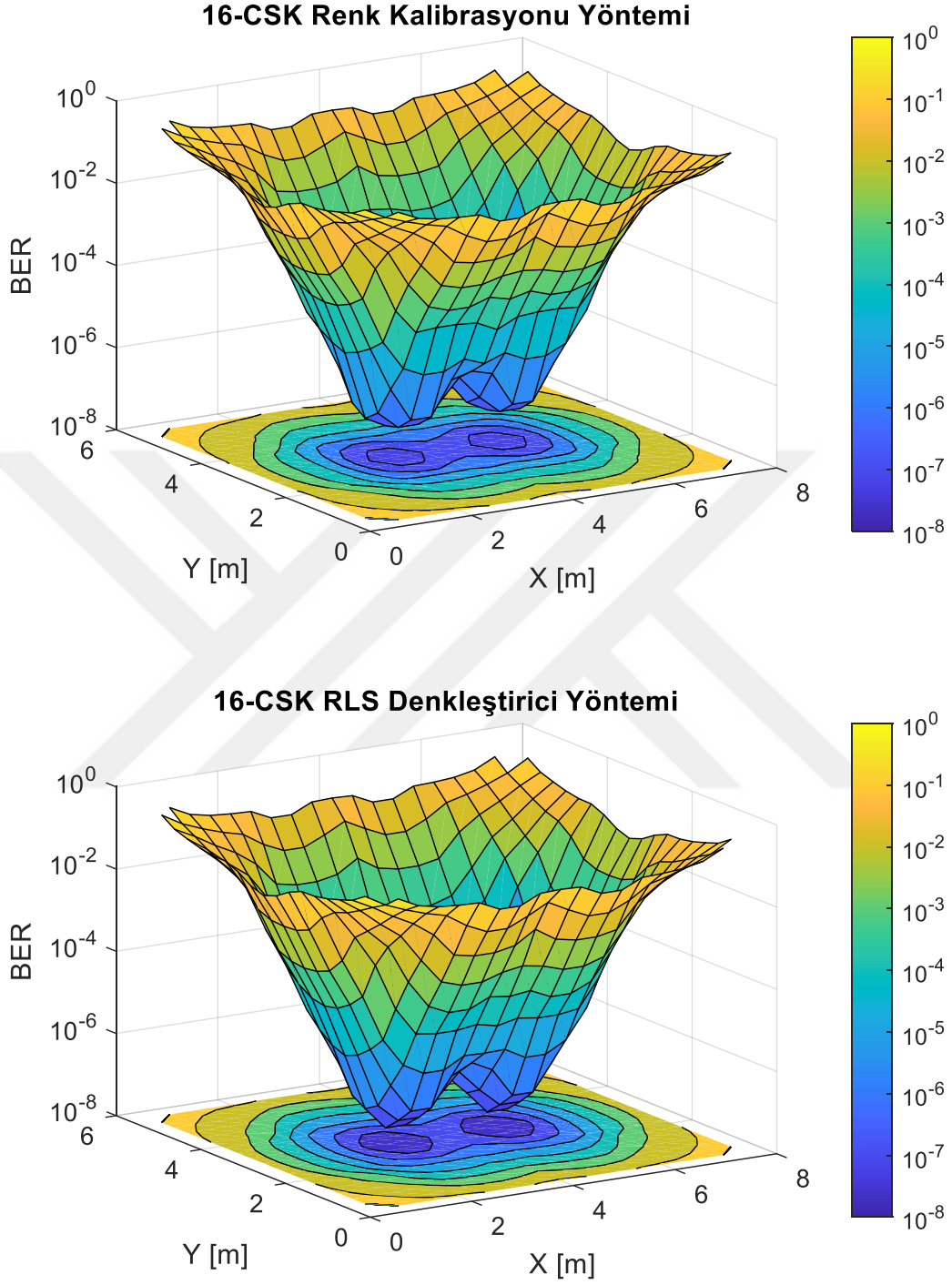
Şekil 2.13. Renk kalibrasyonu ve RLS denkleştiricinin 18 dBm verici gücünde 4-CSK için elde ettikleri BER dağılımı





Şekil 2.14. Renk kalibrasyonu ve RLS denkleştiricinin 21,2 dBm verici gücünde 8-CSK için elde ettikleri BER dağılımı



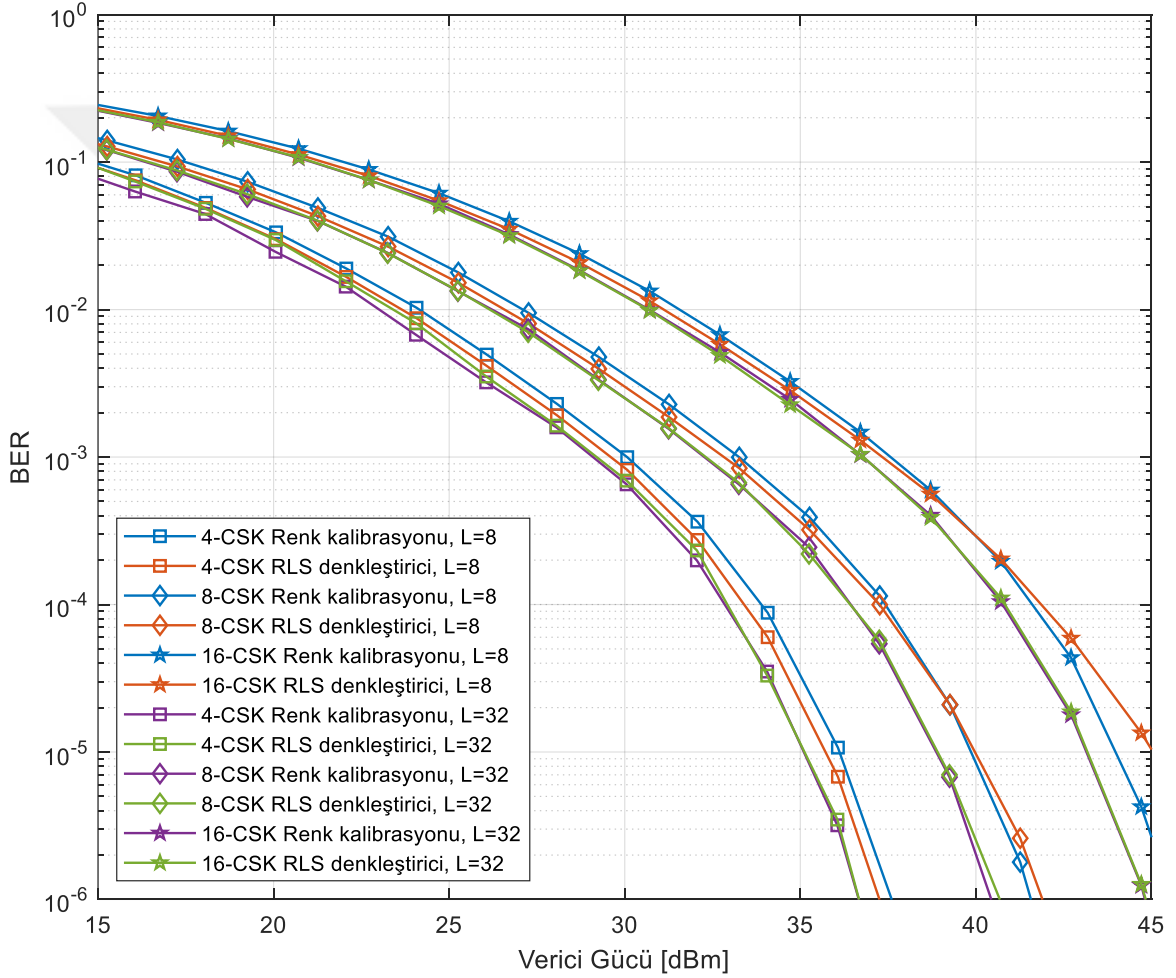


Şekil 2.15. Renk kalibrasyonu ve RLS denkleştiricinin 26,7 dBm verici gücünde 16-CSK için elde ettikleri BER dağılımı





Bu grafiklerden anlaşılacağı gibi maviye kayma ve diğer bozucu etkiler nedeniyle LED armatürlerin altından uzaklaştıkça haberleşme performansı olumsuz etkilenmektedir. Buna ek olarak 4-CSK modülasyonunda RLS denkleştiricinin ortam içerisinde daha iyi bir BER dağılımına sahip olduğu, 8-CSK ve 16-CSK'da ise yaklaşık aynı dağılımın elde edildiği görülmektedir. Bu farkın daha net görülebilmesi için Şekil 2.16'da iki yöntemin 8 ve 32 sembol uzunluğunda eğitim dizisi için ortam içerisinde verici gücüne göre elde ettikleri ortalama BER değişimleri verilmiştir.



Şekil 2.16. Denkleştirici ve renk kalibrasyonu yöntemlerinin oda içerisindeki ortalama BER başarımları

Bu grafiğe göre 32 sembol uzunluğunda eğitim dizisi kullanıldığında iki yöntem de aynı başarımları elde etmektedir. 8 sembol için ise modülasyon seviyesine göre yöntemler arasında farklılıklar bulunmaktadır. Ancak genel olarak düşük verici gücü için RLS



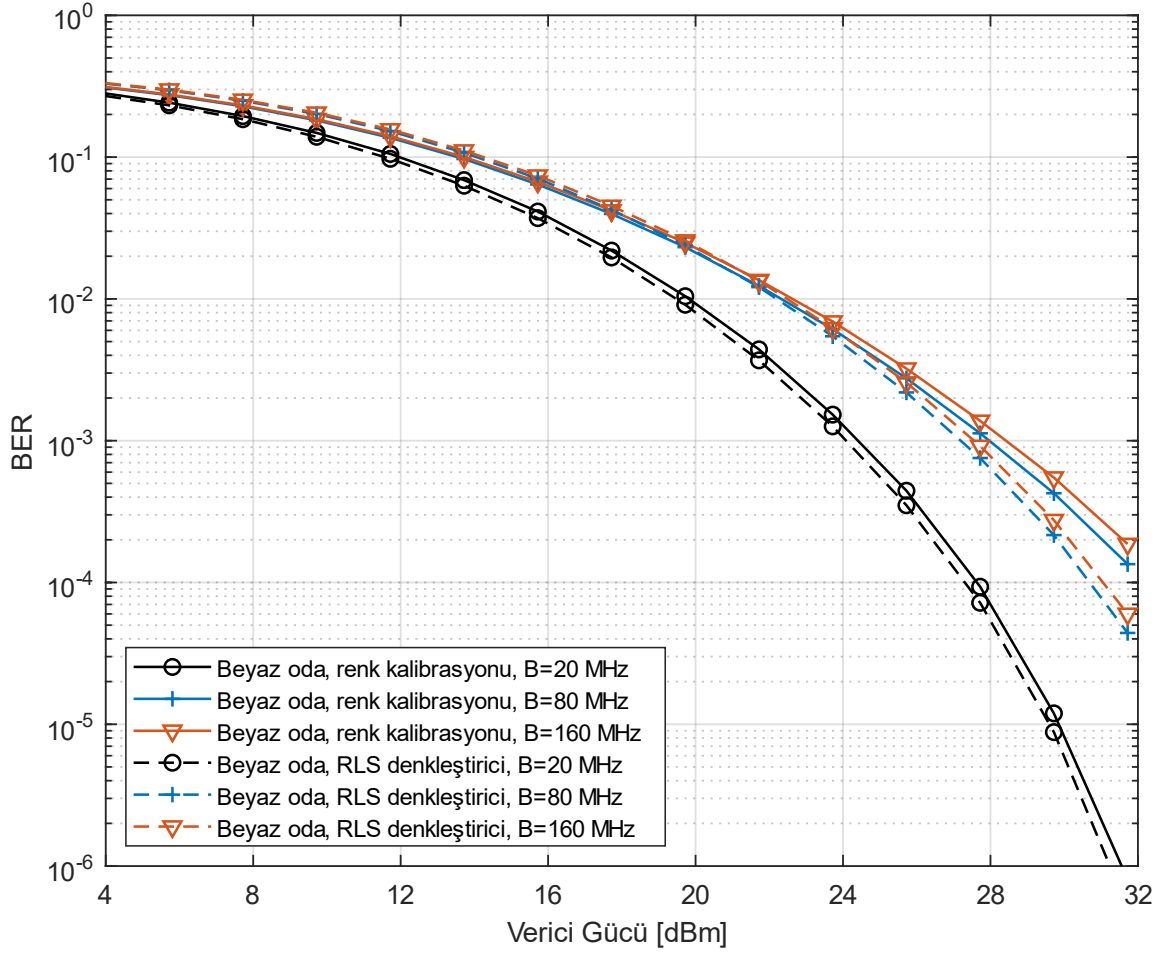
denkleştiricinin renk kalibrasyonu yöntemine göre bir miktar daha iyi BER başarımına ulaştığı söylenilebilir. Modülasyon seviyesine göre gözlemlenen farklılık yeterli miktarda Monte Carlo döngüsü yapılamadığından dolayı oluşmuş olabilir.

### 2.6.2. Çok Yolluluk Etkileri İçin Sayısal Sonuçlar

Çalışmanın son bölümünde LED anahtarlama hızlarında yaşanan artışlar nedeniyle görünür ışık haberleşmesi için oluşabilecek çok yolluluk etkileri incelenmiştir. Tek renkli VLC uygulamaları için literatürde bu artışın ISI etkileri oluşturacağı [22, 41] gösterilmiştir. Ancak çok renkli VLC uygulamaları için önceki bölümlerde gösterilen maviye kayma ve ortamın yansıtıcılık özellikleri nedeniyle her bir renk kanalı farklı etkilenecektir ve ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu bölümde anahtarlama hızlarındaki artışın neden olacağı bozucu etkilerin standartta tanımlanan renk kalibrasyonu yöntemi ile giderilme miktarı incelenerek, aynı koşullarda kullanılan RLS denkleştiricinin elde ettiği performans ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan simülasyonlarda VLC kanalı, bir yansıma durumundaki NLOS bileşeni dikkate alınarak oluşturulmuştur. Buna göre ilk olarak 8-CSK modülasyonunun renk kalibrasyonu ve RLS denkleştirici yöntemleri ile kapalı mekan modeli içerisinde 20 MHz, 80 MHz ve 160 MHz anahtarlama hızları için elde ettikleri BER dağılımları elde edilmiştir. RLS denkleştirici 20 MHz anahtarlama hızında tek tab olarak, 80 MHz ve 160 MHz anahtarlama hızlarında ise 2 adet ileri yön 1 adet geri yön olmak üzere toplam 3 tablı DFE olarak tasarlanmıştır. Bu verilere göre Şekil 2.17’de ortamın tamamında elde edilen ortalama BER değişimleri verilmiştir. Bu sonuçlarda her bir konum için 20 bin sembol gönderilmiş ve 200 Monte Carlo döngüsü ile elde edilen ortalama değerler sunulmuştur.





Şekil 2.17. Farklı anahtarlama hızları için CSK modülasyonunun performansı

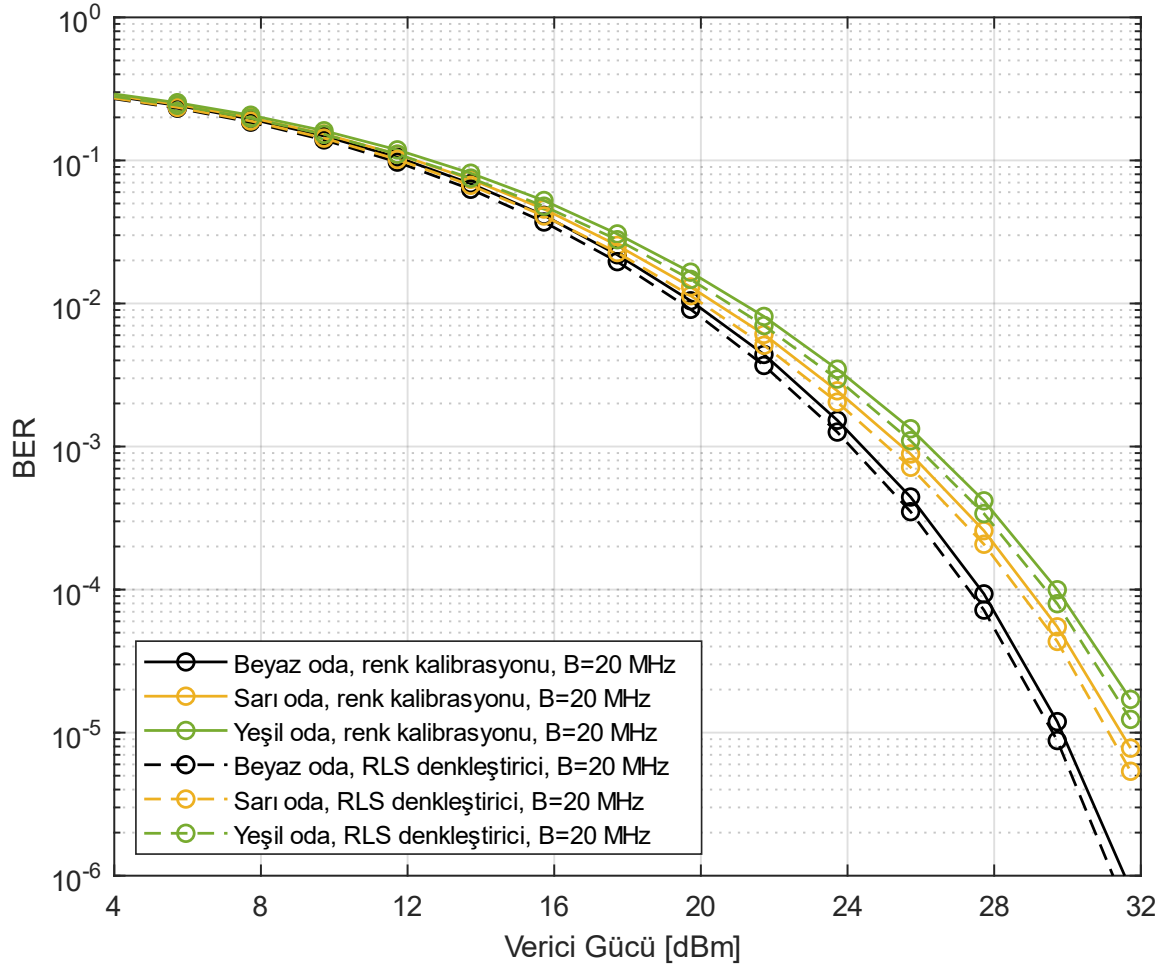
Bu sonuçlara göre 20 MHz anahtarlama hızı için semboller arası girişim etkileri bulunmamaktadır. Ancak anahtarlama hızı 80 MHz olduğu durumda ISI etkilerinden dolayı BER başarımı ciddi oranda düşmektedir. 160 MHz anahtarlama hızına çıkıldığında ise 80 MHz'e göre BER başarımında yaklaşık 1,4 dB düşüş yaşanmıştır. Bunun nedeni anahtarlama hızının iki kat artmasına rağmen ISI etkilerin hala çoğunlukla 2 tab ile sınırlı olmasıdır.

Ayrıca RLS denkleştirici yapısı renk kalibrasyonu yöntemine göre yüksek anahtarlama hızları için 32 dBm verici gücünde yaklaşık 4,9 dB BER kazancı sağlamaktadır. Buna rağmen RLS denkleştirici yapısı 20 MHz performansından oldukça uzak kalmıştır. Denkleştiricinin tab sayısı arttığında katsayıların belirlenebilmesi için uzun eğitim dizilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle RLS denkleştirici yapısının yüksek anahtarlama hızlarında ISI etkilerini giderebilmesi için daha uzun eğitim dizisi kullanılması gerekir.



### 2.6.3. Renk Seçici Ortamlar İçin Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde çok yolluluk etkilerine ek olarak ortamın renk seçici özelliklerinin bulunması durumunda için renk kalibrasyonu ve RLS denkleştirici yöntemlerinin performansları incelenmiştir. Bunun için Şekil 2.2’de verilen kapalı mekan modelinin duvar renkleri sarı [34] ve yeşil [43] olacak şekilde kanal hesaplamaları yapılmıştır. İlk olarak çok yolluluk etkilerinin görülmemesi için 20 MHz anahtarlama hızında 8-CSK modülasyonunun standartta bulunan ve önerilen yöntemler ile ortamın tamamında elde ettiği ortalama BER performansları incelenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 2.18’de verildiği gibidir.



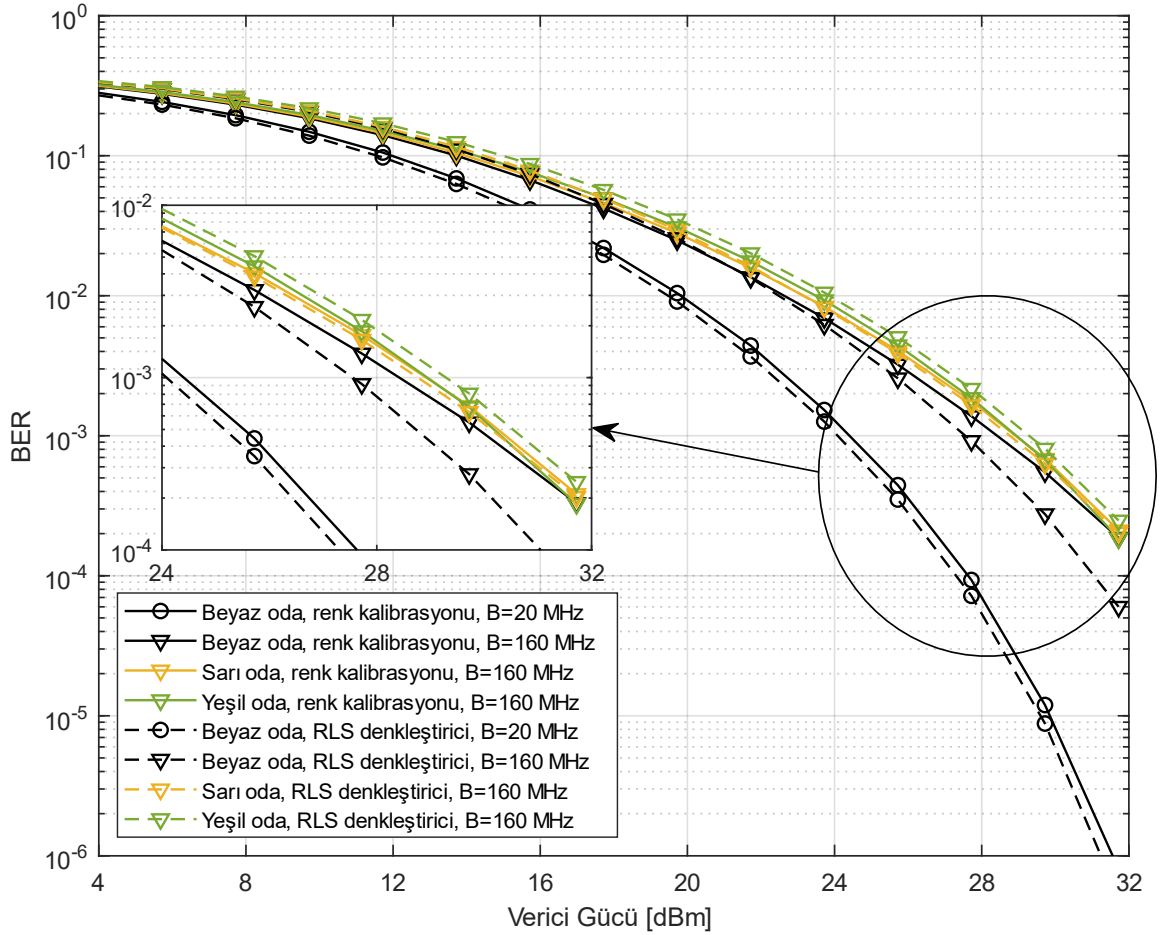
Şekil 2.18. Renk seçici ortam için 8-CSK performansı

Grafikte görüldüğü gibi ortam duvarlarının renkli olması durumunda elde edilen ortalama haberleşme performansı düşmektedir. Ayrıca iki adet renk kanalının zayıfladığı



yeşil duvar rengine sahip odadaki BER performansı, sarı renkli odaya göre 1 dB daha düşük olduğu görülmektedir. Bu verilere göre CSK performansının ortamın renk seçicilik özelliklerine bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Son olarak renk seçici ortam ile çok yolluluk etkilerinin oluşturduğu toplamsal etkilerin incelenmesi için bu bölümde yapılan simülasyonlar 160 MHz anahtarlama hızı için tekrarlanmıştır. Şekil 2.19’de verilen sonuçlarda maviye kayma, renk dengesizliği ve çok yolluluk etkilerinin tamamı bulunduğundan dolayı pratik uygulamalara en yakın verilerin bunlar olduğu söylenilebilir.



Şekil 2.19. 160 MHz anahtarlama hızı için CSK modülasyonunun renk seçici ortamlardaki performansı

Bu sonuçlara renk kalibrasyonu yöntemi 160 MHz anahtarlama hızı ve renk seçici ortamlarda elde edilen BER değişimleri yaklaşık olarak aynıdır. RLS denkleştirici ise her ne



kadar beyaz oda için daha iyi bir performans elde etse de sarı ve yeşil odalarda renk kalibrasyonu ile benzer performans göstermiştir.

Böylelikle çalışmanın geneline bakıldığında hem renk girişimi, hem de çok yolluluk etkilerinden dolayı CSK modülasyonu için önerilen RLS denkleştirici yapısı kullanımının haberleşme açısından daha uygun olduğu söylenilebilir.



### 3. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans çalışmasında temel olarak, çok renkli VLC modülasyonlarından bir tanesi olan CSK modülasyonunun kanalın sahip olduğu çoklu renk dengesizliği, özellikle optik filtrelerin maviye kayma özelliğinin neden olduğu çoklu renk girişimi ve yüksek anahtarlama hızlarında ortaya çıkan semboller arası girişim etkileri altındaki performansı ve bu bozucu etkilerin giderilmesine yönelik literatürde bulunan ve bu çalışmada önerilen yöntemlerin başarımları incelenmiştir.

Literatürde bulunan çalışmalarda genellikle çok renkli VLC kanalı sabit olarak kabul edilmektedir, ancak bu çalışmada kanal yapısının seçilen optik filtre geçiş bandı sınırlarına ve gönderilen ışınların alıcının normali ile yaptığı açıya bağlı olarak değişken olduğu gösterilmiştir. Ayrıca bu etkilerin giderilmesine yönelik oluşturulan filtre bankası alıcı yapısı CSK modülasyonuna uygulanmıştır. Bu incelemeler sonucunda filtre bankası yapısının CSK modülasyonunun geliş açısından bağımsız olmasını sağladığı gösterilmiştir. Ancak filtre bankası yapısının, mevcut sistemler ile eşit fotodedektör yüzey alanına sahip olduğu durumda aynı BER başarımına ulaşabilmek için daha fazla verici gücüne ihtiyaç duyduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmanın devamında IEEE 802.15.7 standardında tanımlanan renk kalibrasyonu yöntemi ile önerilen uyarlanabilir RLS denkleştirici yapısı aynı uzunluktaki eğitim dizileri için kanal kestirme başarımları incelenmiştir. Burada eğitim dizisinin 8 sembol olarak seçildiği durumda RLS denkleştiricinin hem kararlılık açısından hem de kanal kestirimi açısından daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. 32 sembol uzunluğundaki dizi için ise iki yöntemin çok yakın sonuçlar vermesine karşılık yine RLS denkleştirici yapısının bir miktar daha iyi kanal kestirimi gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre CSK modülasyonunda RLS denkleştirici kullanımının haberleşme performansı açısından daha uygun olduğu söylenilebilir.

Bu iki yöntem oluşturulan kapalı mekan modeli içerisindeki verici gücüne göre elde ettikleri BER başarımları açısından karşılaştırıldığında ise modülasyon seviyesi ve verici gücüne göre farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak düşük verici güçlerinde RLS denkleştirici yapısı daha yüksek ortalama performansa ulaşmıştır. Verici gücü arttığında ise modülasyon seviyesine göre elde edilen başarımlarda farklılıklar olmuştur. Buna göre 4-CSK modülasyonunda RLS denkleştirici ortalama BER performansında daha iyi sonuç



verirken, 16-CSK için renk kalibrasyonu yöntemi bir miktar daha az BER seviyesine ulaşmıştır. Ancak verici gücünün yüksek olduğu durumda özellikle LED armatürlerin altında hata olasılığı oldukça düşmektedir ve simülasyonlarda gönderilen veri miktarında yeterli sayıda hata oluşmamaktadır. Bu nedenle düşük verici gücünde elde edilen sonuçların doğruluğu daha yüksektir.

Son olarak çok yolluluk ve renk seçici ortamların CSK modülasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için oluşturulan kapalı mekan modelinin duvarları çoğunlukla tercih edilen renklerde olacak şekilde düzenlenerek haberleşme simülasyonları tekrarlanmıştır. Buna göre ortamın duvar renginin haberleşme performansının olumsuz etkilediği gösterilmiştir. Ayrıca maviye ve kırmızı renk kanalını zayıflatan yeşil duvar boyasının sarı renge göre daha çok bozucu etki oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çok yolluluk etkilerinin incelenmesi için ise farklı anahtarlama hızlarında haberleşme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre 20 MHz anahtarlama hızında çok yolluluk etkisi görülmemektedir. Ancak 80 ve 160 MHz hızlarında oluşan semboller arası girişim haberleşme performansını ciddi oranda düşürmektedir. Bu etkilerin giderilmesinde önerilen denkleştirici yapısı renk kalibrasyonu yöntemine göre daha iyi sonuç vermiştir. Ancak yapıda çok sayıda denkleştirici katsayısı bulunduğundan dolayı performansın artırılması için daha uzun eğitim dizisi kullanılması gerekmektedir.





#### 4. ÖNERİLER

Yapılan çalışmalarda ilk olarak maviye kayma etkilerinin giderilmesine yönelik oluşturulan filtre bankası yönteminin bu konuda başarılı olmasına rağmen, mevcut sistemlere göre daha fazla verici gücüne ihtiyaç duyduğu gösterilmiştir. Buna rağmen filtre bankası yapısında geçiş bandı sınırları optimize edilerek sistem performansının artırılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Maviye kayma özelliğinden dolayı alıcı konumunda yaşanan değişiklik çok renkli VLC kanal matrisinin değişmesine neden olmaktadır. Bu özelliğe dikkat edilerek CSK modülasyonu için sembollerin hatalı algılanma olasılığını düşürecek yıldız diyagramı tasarımları oluşturulabilir.

Çoklu renk girişimi etkilerinin azaltılması veya giderilmesine yönelik özel lens tasarımları oluşturulabilir. Bu türden mekanik çözümler oluşturulması durumunda VLC kanalı daha az bozucu etkiye sahip olacağı için düşük işlem karmaşıklığına sahip yapılar ile yüksek haberleşme performansı elde edilebilir.

Birden fazla verici LED kullanıldığında maviye kaymanın neden olacağı toplamsal etkilerin incelenmesi için kapalı mekan modeli oluşturulmuştur. Bu modelde alıcı boş bir ortamda zemine paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Pratik uygulamalar ile uyumlu sonuçların elde edilebilmesi için içerisinde eşyaların bulunduğu ve alıcının farklı doğrultularda konumlandırıldığı durumlar için incelemeler gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada VLC kanalının bozucu etkilerinin giderilmesine yönelik düşük anahtarlama hızları için doğrusal RLS, çok yolluluk etkileri altında ise karar geri beslemeli RLS denkleştirici için incelemeler gerçekleştirilmiştir. Genel olarak yüksek karmaşıklığa sahip olmasına rağmen diğer denkleştirici yöntemlerine göre daha iyi başarıya ulaştığı bilinen MLSE denkleştirici yapısı çok renkli VLC kanalı için oluşturularak RLS denkleştirici yapısı ile farklı açılardan karşılaştırılabilir.

Simülasyon çalışmaları ile elde edilen sonuçların kontrol edilmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir. Böylelikle bu çalışmada oluşturulan çok renkli VLC kanal modelinin doğruluğu incelenebilir. Ayrıca çok yolluluğun incelendiği bölümde LOS ve bir yansımali NLOS bileşenleri dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar ile bu incelemenin yeterli olup olmadığının kontrol edilebilir.



## 5. KAYNAKÇA

1. Basnayaka, D.A. ve Haas, H., Design and Analysis of a Hybrid Radio Frequency and Visible Light Communication System, IEEE Transactions on Communications, 65,10 (2017) 4334-4347.
2. Rahaim, M.B. ve Little, T.D.C., Toward practical integration of dual-use VLC within 5G networks, IEEE Wireless Communications, 22,4 (2015) 97-103.
3. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications, IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011), (2019) 1-407.
4. Jackson, D.K., Buffaloe, T.K. ve Leeb, S.B., Fiat lux: a fluorescent lamp digital transceiver, IEEE Transactions on Industry Applications, 34,3 (1998) 625-630.
5. Chow, C.W., Yeh, C.H., Liu, Y.F. ve Liu, Y., Improved modulation speed of LED visible light communication system integrated to main electricity network, Electronics Letters, 47,15 (2011) 867-868.
6. Shi, J., Huang, X., Wang, Y. ve Chi, N., Real-time bi-directional visible light communication system utilizing a phosphor-based LED and RGB LED, 2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 23-25 Oct. 2014 2014: 1-5.
7. Liao, C., Ho, C., Chang, Y., Wu, C. ve Wu, M., High-Speed Light-Emitting Diodes Emitting at 500 nm With 463-MHz Modulation Bandwidth, IEEE Electron Device Letters, 35,5 (2014) 563-565.
8. Shi, J., Sheu, J., Chen, C., Lin, G. ve Lai, W., High-Speed GaN-Based Green Light-Emitting Diodes With Partially n-Doped Active Layers and Current-Confined Apertures, IEEE Electron Device Letters, 29,2 (2008) 158-160.
9. Huang, Y., Guo, Z., Wang, X., Li, H. ve Xiang, D., GaN-Based High-Response Frequency and High-Optical Power Matrix Micro-LED for Visible Light Communication, IEEE Electron Device Letters, 41,10 (2020) 1536-1539.
10. Cui, L., Tang, Y., Jia, H., Luo, J. ve Gnade, B., Analysis of the Multichannel WDM-VLC Communication System, Journal of Lightwave Technology, 34,24 (2016) 5627-5634.
11. Chun, H., Rajbhandari, S., Faulkner, G., Tsonev, D., Xie, E., McKendry, J.J.D., Gu, E., Dawson, M.D., Brien, D.C.O. ve Haas, H., LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications, Journal of Lightwave Technology, 34,13 (2016) 3047-3052.



12. Chang, R.W., Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission, The Bell System Technical Journal, 45,10 (1966) 1775-1796.
13. Armstrong, J., OFDM for Optical Communications, Journal of Lightwave Technology, 27,3 (2009) 189-204.
14. Andreas, F.M., Wireless Communications, Equalizers, IEEE, 343-361, 2011.
15. Zang, Y.-D. ve Zhang, J., Optimal Scheme of DCO-OFDM for Optical Frequency-selectivity, Procedia Computer Science, 131 (2018) 1074-1080.
16. Tugcu, E., Albayrak, C., Yazgan, A., Simsek, C. ve Turk, K., Bit error rate analysis for color shift keying modulation, 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2-5 May 2018 2018: 1-4.
17. Singh, R., Ofarrell, T. ve David, J.P.R., An Enhanced Color Shift Keying Modulation Scheme for High-Speed Wireless Visible Light Communications, Journal of Lightwave Technology, 32,14 (2014) 2582-2592.
18. Monteiro, E. ve Hranilovic, S., Design and Implementation of Color-Shift Keying for Visible Light Communications, Journal of Lightwave Technology, 32,10 (2014) 2053-2060.
19. 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 (2019) 2173-2187.
20. Ge, P., Ling, X., Wang, J., Liang, X., Zhang, R. ve Zhao, C., Optical Filter Bank for Multi-Color Visible Light Communications, 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 9-13 Dec. 2019 2019: 1-6.
21. Barros, D.J.F., Wilson, S.K. ve Kahn, J.M., Comparison of Orthogonal Frequency-Division Multiplexing and Pulse-Amplitude Modulation in Indoor Optical Wireless Links, IEEE Transactions on Communications, 60,1 (2012) 153-163.
22. Komine, T., Lee, J.H., Haruyama, S. ve Nakagawa, M., Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment, IEEE Transactions on Wireless Communications, 8,6 (2009) 2892-2900.
23. Jain, S., Mitra, R. ve Bhatia, V., Multivariate-KLMS based Post-Distorter for Nonlinear RGB-LEDs for Color-Shift Keying VLC, 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 8-11 Sept. 2019 2019: 1-6.
24. Guoxin He, 何. ve Lihong Zheng, 郑., A model for LED spectra at different drive currents, Chinese Optics Letters, 8,11 (2010) 1090-1094.
25. Ohno, Y., Spectral design considerations for white LED color rendering, Optical Engineering, 44,11 (2005).



26. Qiu, Y., Chen, H.-H. ve Meng, W.-X., Channel modeling for visible light communications-a survey, Wireless Communications and Mobile Computing, 16,14 (2016) 2016-2034.
27. <https://hoyaoptics.com/colored-glass-filters/> Color Glass Filter List by Wavelength. 30.08.2020.
28. Minowa, J. ve Fujii, Y., Dielectric multilayer thin-film filters for WDM transmission systems, Journal of Lightwave Technology, 1,1 (1983) 116-121.
29. Pathak, P.H., Feng, X., Hu, P. ve Mohapatra, P., Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17,4 (2015) 2047-2077.
30. Danakis, C., Afgani, M., Povey, G., Underwood, I. ve Haas, H., Using a CMOS camera sensor for visible light communication, 2012 IEEE Globecom Workshops, 3-7 Dec. 2012 2012: 1244-1248.
31. Lee, K., Park, H. ve Barry, J.R., Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications, IEEE Communications Letters, 15,2 (2011) 217-219.
32. Schulze, H., Frequency-Domain Simulation of the Indoor Wireless Optical Communication Channel, IEEE Transactions on Communications, 64,6 (2016) 2551-2562.
33. Küçük, M.A., Türk, K. ve Albayrak, C., Kapalı Mekan Görünür Işık Haberleşmesi için CSK Modülasyonunun Çokyollu Kanal Şartlarında İncelenmesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi 2019, 2019, İstanbul 373-378.
34. <https://www.shepherdcolor.com/products/technical-data/YL0030C119/> Technical Data information for YL0030C119. 12.11.2020.
35. Ben Salem, E., Cherif, S., Besbes, H. ve López-Valcarce, R., Lattice implementation of adaptive channel shortening in multicarrier transmission over IIR channels, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013,1 (2013) 174.
36. Proakis, J.G., Adaptive equalization for TDMA digital mobile radio, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 40,2 (1991) 333-341.
37. Widrow, B. ve Hoff, M.E., Adaptive Switching Circuits, 1960 IRE WESCON Convention Record, (1960) 96-104.
38. Kumar, P., Theory and practice of recursive identification, IEEE Transactions on Automatic Control, 30,10 (1985) 1054-1056.
39. Jia, L., Wang, J., Zhang, W., Chen, M. ve Wang, J., Symbol error rate analysis for colour-shift keying modulation in visible light communication system with RGB light-emitting diodes, IET Optoelectronics, 9,5 (2015) 199-206.



40. Singh, R., Farrell, T.O. ve David, J.P.R., Performance evaluation of IEEE 802.15.7 CSK physical layer, 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 9-13 Dec. 2013 2013: 1064-1069.
41. Albayrak, C., Turk, K., Tugcu, E. ve Yazgan, A., Seamless rate adaptation for indoor visible light communication without CSI at the transmitter, Physical Communication, 40 (2020) 101071.
42. <https://www.cree.com/led-components/products/xlamp-leds-arrays/xlamp-xm-l-color> XLamp XM-L Color Brightest, smallest multi-color LED of its class. 12.11.2020.
43. <https://www.shepherdcolor.com/products/technical-data/GR0223/> Technical Data information for GR0223. 12.11.2020.



## 6. EKLER

Ek Tablo 1. IEEE standartında tanımlanan renk bandları [3].

Renk Bandı (nm)	Band Kodu	Merkez Dalga Boyu (nm)	(x, y)
380-478	000	429	(0.169, 0.007)
478-540	001	509	(0.011, 0.733)
540-588	010	564	(0.402, 0.597)
588-633	011	611	(0.669, 0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

Ek Tablo 2. Renk kalibrasyonu yöntemi için kullanılan 32 sembollük eğitim dizisi

Kanal	Gönderilecek Eğitim Dizisi
Kanal i	1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0
Kanal j	1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0
Kanal k	1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1



## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Kenan Evren İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Salihli Merkez Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans programına başladı ve 2018 yılında ikincilik derecesi ile bu bölümden mezun oldu. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2019 yılı Temmuz ayından itibaren Gümüşhane Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

Bu tez çalışması süresince alınan sonuçlar ile hazırlanan "Kapalı Mekan Görünür Işık Haberleşmesi için CSK Modülasyonunun Çokyollu Kanal Şartlarında İncelenmesi" isimli bildiri EEMKON19 (İstanbul) konferansında sözlü olarak sunuma kabul edilmiştir.

