



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

KULLANICI MERKEZLİ GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kardelen HORUNLU

DANIŞMAN

Doç. Dr. Yasin ÇELİK

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 212363403 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Kardelen HORUNLU tarafından hazırlanan “**KULLANICI MERKEZLİ GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Elektrik Elektronik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Yasin ÇELİK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Sultan ALDIRMAZ ÇOLAK

Kocaeli Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Selim SOYLU

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2024

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

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Kardelen HORUNLU

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında yönlendirici bilgi birikimi ve tecrübelerini paylaşan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Yasin Çelik'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, sağladığı destekler için Kağan Orbay'a da şükranlarımı iletmek isterim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her konuda bana destek olan aileme de teşekkür ve minnetlerimi sunarım. Sizlerin varlığı ve desteği, bu süreci başarıyla tamamlamamı sağlayan en büyük güç kaynağım oldu.

Tekrar teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Kardelen HORUNLU
AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Görünür Işık İletişimine Yönelik Motivasyon	1
1.2 Görünür Işık İletişimi Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları.....	3
1.3 Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Sistemler ve Görünür Işık İletişimi Teknolojileri	4
1.4 Uyarlanabilir Modülasyon Yaklaşımı ve Açısız Çeşitlemeli Alıcı.....	5
1.5 Tezin Katkıları	8
2. KAYNAK ÖZETLERİ	9
2.1 VLC Tarihçesi	9
2.2 VLC Uygulamaları.....	10
2.3 MIMO VLC Sistemler	12
3. MALZEME VE YÖNTEM	15
3.1 MIMO-VLC Sistem Tasarımı	15
3.1.1 İç mekân MIMO-VLC sistem modeli	15
3.1.2 Alıcı modülleri	18
3.2 Geleneksel MIMO Teknikleri	20
3.2.1 SD çoğullama tekniği.....	21
3.2.2 SMP çoğullama tekniği	21
3.3 Kullanıcı Merkezli MIMO Teknikleri	22
3.3.1 SD/SMP anahtarlama tekniği.....	23
3.3.2 Uyarlanabilir SMP tekniği	23
3.3.3 SD-aSMP tekniği	24
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	25
4.1 $N_t = 4$ için ADR ve GADR Yapısının MIMO Performanslarının Düzlemsel Alıcı Yapısı ile Karşılaştırılması.....	30
4.2 $N_t = 8$ ve $N_t = 12$ için GADR ile SD, SMP, aSMP, SD-aSMP İletim Tekniklerinin SNR-Ulaşılabilir Hız Grafiği	36
4.2.1 $N_t = 8$ için SD, SMP, aSMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin SNR-ulaşılabilir hız grafikleri.....	36
4.2.2 $N_t = 12$ için SD, SMP, aSMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin SNR-ulaşılabilir hız grafikleri.....	42
4.3 Farklı N_t için SD, SMP ve aSMP İletim Tekniklerinin Ulaşılabilir Hız- CDF Grafikleri	46
4.4 Farklı Yükselme Açıları İçin SD, SMP ve aSMP İletim Tekniklerinin Ulaşılabilir Hız-CDF Grafikleri	53
4.5 Farklı N_t ve Yükselme Açıları İçin GADR ve ADR Yapıları ile SD, SMP ve aSMP Tekniklerinin Ulaşılabilir Hız-CDF Grafikleri.....	58
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ.....	72

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KULLANICI MERKEZLİ GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ

Kardelen HORUNLU

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yasin ÇELİK

ÖZET

Kablosuz iletişim teknolojileri genellikle RF bandını kullanır, ancak RF spektrumu günümüzde oldukça yoğundur. Bu nedenle, Görünür Işık İletişimi (VLC), RF sistemlerine ek veya alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. VLC’de, LED’ler ve fotodetektörler (PD) aracılığıyla iletişim sağlanır ve modüle edilmiş sinyaller pozitif ve gerçek değerlidir. Bu durum bazı RF tekniklerinin VLC’ye uygulanmasını engeller. Optik bant genişliği birkaç Terahertz (THz), elektriksel bant genişliği ise birkaç Megahertz (MHz) seviyesindedir. Bu sistemlerde düşük elektrik bant genişliğinin sınırladığı veri hızlarını artırmak için Çok Girişli Çok-Çıkışlı (MIMO) teknikler kullanılmaktadır. İç mekân aydınlatması için tercih edilen çoklu LED yapısı, MIMO tekniklerinin VLC’de kullanımını destekler.

İç mekân MIMO-VLC sistemlerinde kanal korelasyonu, performansı önemli ölçüde etkiler. Doğrudan görüş hattı (LoS) senaryolarında kanallar yüksek derecede ilintili olup, sinyal çözümlemesini zorlaştırarak sistem performansını düşürür. Bu zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Kullanıcı konumu, kanal korelasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel MIMO teknikleri değişen kanal korelasyonuna göre düzenlenerek kullanıcı konumuna göre uyarlanabilir teknikler geliştirilmiştir. Bu bağlamda üç MIMO tekniği önerilmektedir: Uzamsal Çeşitleme/Uzamsal Çoğullama (SD/SMP) geçişi, uyarlanabilir SMP (aSMP) ve SD destekli uyarlanabilir SMP (SD-aSMP). Açısal Çeşitlemeli Alıcı (ADR) yapısı, PD’lerin farklı yönlendirmelere sahip olmasıyla kanal korelasyonunu azaltır. MIMO-VLC sistemlerinde kanal korelasyonunu dikkate alan teknikler ve alıcı yapıları genellikle ayrı incelenmiştir. Bu tezde, Piramit ADR ve Genelleştirilmiş ADR (GADR) yapısı, kullanıcı merkezli MIMO teknikleriyle birlikte incelenmiş ve değişen LED sayısı, PD sayısı, ADR parametreleri için performans analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çoklu Giriş-Çoklu Çıkış (MIMO), Görünür Işık İletişimi (VLC), Açısal Çeşitleme Alıcı (ADR), Kullanıcı Merkezli İletişim.

Haziran, 2024; 72 sayfa

M.Sc. THESIS

USER-CENTRIC VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Kardelen HORUNLU

Aksaray University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yasin ÇELİK

ABSTRACT

Wireless communication technologies typically use the RF band, but the RF spectrum is highly congested nowadays. Therefore, LED-based Visible Light Communication (VLC) is considered as an additional or alternative solution to RF systems. VLC provides communication through LEDs and photodetectors (PD), operating within the visible part of the electromagnetic spectrum. The modulation techniques in VLC are positive and real-valued, which prevents the direct application of some RF techniques. The optical bandwidth for VLC is in the range of several Terahertz (THz), while the electrical bandwidth is in the range of several Megahertz (MHz). Multiple Input Multiple Output (MIMO) techniques are used to increase data rates limited by the low electrical bandwidth. The use of multiple LEDs, preferred for indoor lighting, supports the application of MIMO techniques in VLC.

In indoor MIMO-VLC systems, channel correlation significantly impacts performance. In line-of-sight (LoS) scenarios, channels are highly correlated due to the lack of multipath components, hindering signal resolution and reducing system performance. Various approaches have been proposed in the literature to overcome these challenges. The user's position is crucial regarding the level of channel correlation. Traditional MIMO techniques have been optimized according to varying channel correlations, resulting in user position-adaptive techniques. Three MIMO techniques are proposed in this context: Spatial Diversity/Spatial Multiplexing (SD/SMP) transition, adaptive SMP (aSMP), and SD-assisted adaptive SMP (SD-aSMP). The Angular Diversity Receiver (ADR) structure, where PDs have different orientations, is another approach to reduce channel correlation. Techniques and receiver structures that consider channel correlation in MIMO-VLC systems have typically been studied separately. In this thesis, the Pyramid ADR and Generalized ADR (GADR) structures are examined together with user-centric MIMO techniques, and detailed performance analyses are conducted for varying numbers of LEDs, PDs, and ADR parameters.

Keywords: Multiple Input-Multiple Output (MIMO), Visible Light Communication (VLC), Angular Diversity Receiver (ADR), User-Centric Communication.

June, 2024; 72 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektromanyetik izge ve görünür izge.....	2
Şekil 3.1. MIMO VLC sisteminin bina içi geometrisi.....	15
Şekil 3.2. j. LED ve i. PD arasındaki bağlantı geometrisi.....	17
Şekil 3.3. 4 Yüzlü piramit alıcı (ADR) yapısı.....	19
Şekil 3.4. 8 Yüzlü piramit alıcı (GADR) yapısı.....	19
Şekil 3.5. Azimut ve yükselme açıları.....	20
Şekil 4.1. PD5 kullanılarak elde edilen oda içerisindeki optik güç dağılımı.....	27
Şekil 4.2. Geleneksel MIMO ve UC-MIMO tekniklerinin verici SNR'ye göre ulaşılabilir veri hızları.....	27
Şekil 4.3. Geleneksel MIMO ve UC-MIMO iletim teknikleri için oda içerisindeki ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği (SNR=120 dB).....	28
Şekil 4.4. Pozisyon 1'de 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.....	31
Şekil 4.5. Pozisyon 2'de 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC ulaşılabilir hız grafikleri.....	32
Şekil 4.6. Pozisyon 3'te 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC ulaşılabilir hız grafikleri.....	32
Şekil 4.7. Pozisyon 4'te 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.....	33
Şekil 4.8. Pozisyon 5'te 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.....	34
Şekil 4.9. Pozisyon 6'da 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.....	35
Şekil 4.10. Pozisyon 1'deki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	37
Şekil 4.11. Pozisyon 2'deki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	38
Şekil 4.12. Pozisyon 3'teki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	38
Şekil 4.13. Pozisyon 4'teki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	39
Şekil 4.14. Pozisyon 5'teki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	40
Şekil 4.15. Pozisyon 6'daki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	40
Şekil 4.16. Pozisyon 1'deki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	42
Şekil 4.17. Pozisyon 2'deki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	43
Şekil 4.18. Pozisyon 3'teki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	44
Şekil 4.19. Pozisyon 4'teki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	44
Şekil 4.20. Pozisyon 5'teki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	45
Şekil 4.21. Pozisyon 6'daki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.....	46
Şekil 4.22. SD iletim tekniğinin 30° yükselme açısı ve farklı sayıda N_t için CDF grafiği.....	47

Şekil 4.23. SMP iletim tekniğinin 30° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.	48
Şekil 4.24. SD-aSMP iletim tekniğinin 30° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.	48
Şekil 4.25. SD iletim tekniğinin 45° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği. .	49
Şekil 4.26. SMP iletim tekniğinin 45° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.	50
Şekil 4.27. SD-aSMP iletim tekniğinin 45° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.	50
Şekil 4.28. SD iletim tekniğinin 60° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği. .	52
Şekil 4.29. SMP iletim tekniğinin 60° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.	52
Şekil 4.30. SMP iletim tekniğinin 60° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.	53
Şekil 4.31. GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	54
Şekil 4.32. GADR ile 8x9 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	55
Şekil 4.33. GADR ile 12x13 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	56
Şekil 4.34. GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	56
Şekil 4.35. $N_t = 4$ ve 30° yükselme açısında ADR ve GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	58
Şekil 4.36. $N_t = 16$ ve 30° yükselme açısında ADR ve GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	59
Şekil 4.37. $N_t = 4$ ve 45° yükselme açısında ADR ve GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	60
Şekil 4.38. $N_t = 16$ ve 45° yükselme açısında ADR ve GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	60
Şekil 4.39. $N_t = 4$ ve 75° yükselme açısında ADR ve GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	61
Şekil 4.40. $N_t = 16$ ve 75° yükselme açısında ADR ve GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. VLC ve RF sistemleri karşılaştırması.....	4
Çizelge 4.1. Benzetim parametreleri.....	25
Çizelge 4.2. LED’lerin x-y pozisyonları.....	29
Çizelge 4.3. Alıcının x, y, z pozisyonları.....	30



SİMGELER VE KISALTMALAR

ABR	Açıklık Tabanlı Alıcı
ADR	Açısal Çeşitlemeli Alıcı
aSMP	Uyarlanabilir Uzamsal Çoğullama
AWGN	Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü
Bell Labs	Bell Laboratuvarları
BER	Bit Hata Oranı
COWA	Optik Kablosuz Uygulamalar Merkezi
CSK	Renk Kaydırma Anahtarlama
DCO-OFDM	DC-Biaslı Optik OFDM
EMI	Elektromanyetik Girişim
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FOV	Yarı Açık Görüş Alanı
GADR	Genelleştirilmiş Açısal Çeşitlemeli Alıcı
GHz	Giga Herthz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFTT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
IM/DD	Yoğunluk Modülasyonu Doğrudan Sezim
IR	Kızıl Ötesi Işınım
ISI	Sembole Arası Girişim
ITS	Akıllı Ulaşım Sistemleri
JEITA	Japon Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Endüstrileri Birliği
KHz	Kilo Herthz
LED	Işık Yayan Diyot
Li-Fi	Işık Alanı
LOS	Direk Görüş Hattı
M2M	Makineden Makineye
MAC	Orta Erişim Kontrolü
MIMO	Çoklu Giriş-Çoklu Çıkış
MMSE	Minimum Ortalama Kare Hatası
OFDM	Dik Frekans Bölmeli Çoğullama
OMEGA	hOME Gigabit Access projesi
OOK	Aç-Kapa Anahtarlama
PD	Fotodedektör
PHY	Fiziksel Katman
PR	Piramit Alıcı
RC	Tekrarlamalı Kodlama
RF	Radyo Frekansı
RI	İç Kırılma İndisi
SD	Uzamsal Çeşitleme
SM	Uzamsal Modülasyon
SMP	Uzamsal Çoğullama
SNR	Sinyal-Gürültü Oranı
UC-Light	Işığa Dayalı Evrensel İletişim Merkezi
V2V	Araçtan Araca
VC	Araç İletişimleri
VLC	Görünür Işık İletişimi
VLCA	Görünür Işık İletişimi Birliği

VL-ID
VPPM
ZF

Görünür Işık Kimlik Sistemi
Değişken Darbe Konum Modülasyonu
Sıfıra Zorlama



1. GİRİŞ

1.1 Görünür Işık İletişimine Yönelik Motivasyon

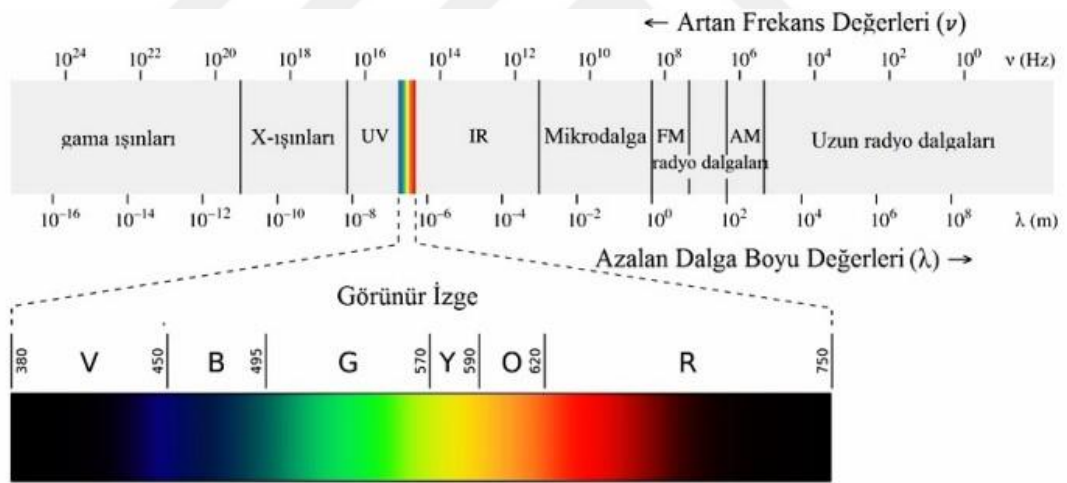
Günümüzde, artan veri trafiği ve kablosuz iletişim ihtiyaçları ile birlikte, geleneksel iletişim teknolojilerinin yeterliliğini zorlamaktadır. Bu durumda, görünür ışık iletişimi (Visible Light Communication, VLC), önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. VLC, ışık yayan diyotlar (Light Emitting Diode, LED) aracılığıyla veri iletimi yaparak, mevcut aydınlatma altyapısını iletişim için kullanma potansiyeline sahiptir. Özellikle, radyo frekansı (Radio Frequency, RF) sinyalleri yerine görünür ışık sinyallerinin kullanıldığı yerlerde LED tabanlı konumlandırma sistemleri oldukça popüler hale gelmiştir. LED tabanlı VLC teknolojisi, mevcut RF sistemlerine ek veya alternatif bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu teknoloji serbest bir spektrum ve yüksek veri hızları sağlar, yüksek enerji verimliliği sunar, düşük donanım maliyetleriyle iletişimi mümkün kılar. Görünür ışığın bulunduğu frekanslar serbest kullanımdadır, herhangi bir kurum tarafından regüle edilmezler [1].

Geleneksel olarak bina içi ortamlarda RF teknolojileri ile iletişim gerçekleştirilmektedir. RF sistemlerinin elektromanyetik girişim (EMI) sorunu, iletişim sinyallerinin istenmeyen elektronik cihazlar tarafından üretilen diğer sinyallerle karışmasına neden olur. Bu durum iletişim kalitesini düşürebilir ve veri aktarımını olumsuz etkileyebilir. Spektrum kıtlığı problemi ise, RF frekanslarının sınırlı olması ve yoğun kullanımı nedeniyle iletişim kanallarının dar olması anlamına gelir. Bu durum, daha fazla cihazın aynı anda iletişim kurmasını zorlaştırabilir veya mümkün kılmayabilir. Ayrıca, RF sistemleri genellikle yüksek güç tüketirler ve veri iletim hızları sınırlıdır, bu da enerji verimliliği ve iletişim hızı açısından dezavantaj oluşturur [2].

VLC, bu problemlerin üstesinden gelebilecek alternatif bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. VLC, LED aydınlatma altyapısını kullanarak veri iletimi sağlar ve bu sayede kablo döşeme ihtiyacını ortadan kaldırır. LED aydınlatma sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, görünür ışık spektrumunu iletişim amaçlı kullanma potansiyeli giderek artmaktadır. Enerji verimli LED'leri verici olarak kullanan bu teknoloji, haberleşme, konumlandırma ve aydınlatma hizmetlerini tek bir altyapı ile

karşlanması sayesinde güç tüketimi ve maliyet açısından avantajlı hale gelmektedir [3, 4].

Görünür ışık spektrumu, 385 tera hertz (THz) ile 789 THz arasındaki frekans aralığını kapsar ve bu aralık, elektromanyetik spektrumun insan gözüyle algılanabilen kısmıdır. VLC (Visible Light Communication), 380 nm ile 750 nm dalga boyu aralığında gerçekleşen kablosuz optik haberleşme tekniğidir [5]; bu aralıktaki elektromanyetik spektrum ve görünür ışık spektrumunun frekans ve dalga boyları Şekil 1.1'de gösterilmiştir. VLC kullanırken, ışığın taşıyabileceği veri miktarını belirleyen iki ana faktör vardır: optik bant genişliği ve elektriksel bant genişliği. Optik bant genişliği, ışığın taşıyabileceği frekans aralığını ifade eder ve genellikle çok daha geniştir (örneğin, 400 THz). Ancak, elektriksel bant genişliği, ışığın modüle edilerek taşıyabileceği veri miktarını belirler ve genellikle daha sınırlıdır (3-4 Megahertz). Bu nedenle, yüksek hızlı iletişimde geniş optik bant genişliğine rağmen, elektriksel bant genişliği sınırlı olduğundan iletişim hızı da bu sınırlar içinde kalmaktadır [3].



Şekil 1.1. Elektromanyetik izge ve görünür izge [61].

Bu bağlamda, VLC'nin avantajları ve kullanım potansiyeli, araştırmacıları bu alana yönlendiren temel motivasyonları oluşturmaktadır. Bu motivasyonla, geleneksel RF teknolojisinin kısıtlarıyla başa çıkabilen ve özellikle LED'lerin iletişimde kullanımının getirdiği potansiyeli değerlendiren VLC'nin önemi vurgulanmaktadır. Bu yeni iletişim teknolojisinin, kablosuz iletişimde daha geniş bir kullanım alanı ve daha verimli bir iletişim sağlama potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir.

1.2 Görünür Işık İletişimi Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları

VLC sisteminin avantajları ve dezavantajları, RF haberleşmesi ile karşılaştırıldığında belirgin farklılıklar gösterir. VLC, bant genişliği ve kapasite açısından RF sistemlerine göre avantaj sağlarken, hareketli kullanım ve kapsama alanı konularında dezavantajlı olduğu bilinir.

Avantajlar:

- **Güvenlik:** Işık, duvarlara nüfuz edemeyeceğinden, veri güvenliği için yüksek seviyede koruma sağlar. Kapalı alanlarda kullanıldığında, kapıyı kapatarak güvenli iletişim sağlar. Yüksek güvenlik gerektiren alanlarda oldukça önemlidir [6].
- **İnsan sağlığı için güvenlik:** Görünür ışık kullanımı RF haberleşmesine göre insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip değildir. RF dalgalarının kanserojen etkileri ve kızılötesi ışıınım (IR) ışığının göz sağlığına zararları dikkate alındığında, VLC güvenli bir iletişim teknolojisi olarak öne çıkar [6,7].
- **Sınırsız teknoloji:** Elektromanyetik dalgaların cihazlara etki etmemesi VLC'nin her alanda kullanılabilir olmasını sağlar [8].
- **Yüksek bant genişliği:** VLC, ışık spektrumunda geniş bir bant genişliği kullanır ve RF sistemlerine kıyasla daha fazla veri aktarım potansiyeline sahiptir [9].

Dezavantajlar:

- **Dar iletim mesafesi:** VLC, RF kadar uzak mesafelere iletim yapamaz ve iletim mesafesi kısıtlıdır. Bu durum, görüş alanı alıcılar veya iletim gücü artışı ile giderilebilir.
- **Sık sinyal kaybı:** Verici ile alıcı arasındaki engeller iletişimde kesintiye neden olur. Bu durum, RF ile birleştirilerek çözülebilir [10].
- **Dış etkenlere duyarlılık:** VLC sistemleri, güneş ışığı ve suni ışık kaynaklarından etkilenebilir. Bu parazitler, filtreler kullanılarak azaltılabilir ancak tamamen ortadan kaldırılamazlar ve iletişim performansını etkilerler [11].

Bu avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alındığında, VLC'nin RF ile kombine edilerek kullanıldığı senaryolar veya kapalı alanlarda RF alternatifi olarak tercih edilebileceği durumlar öne çıkar. Çizelge 1.1'de VLC ve RF sistemleri arasındaki en önemli farkları göstermektedir.

Çizelge 1.1. VLC ve RF sistemleri karşılaştırması.

Özellikler	RF Sistemi	VLC Sistemi
Verimlilik	Orta düzey enerji verimliliği.	Aydınlatma ve veri iletimi aynı anda, daha az enerji kullanımı.
Spektrum	Sınırlı bant genişliğine sahip radyo dalgaları (3 KHz - 300 GHz) ve bu nedenle maliyetlidir.	Geniş spektrum, maliyet açısından daha avantajlı.
Maliyet	RF sistemlerinde verici ve alıcı cihazlar daha maliyetlidir.	Daha ucuz bileşenler.
İnsan Sağlığı	Sağlık riski var.	Sağlık açısından güvenli, tercih edilen bir sistem.
Güvenlik	EMI üretir, güvenlik riski mevcut.	Güvenli, parazitlerden etkilenmez.

1.3 Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Sistemler ve Görünür Işık İletişimi Teknolojileri

VLC, kablosuz iletişim için ışık ışınlarını kullanan bir teknolojidir. Bu teknoloji hem aydınlatma hem de iletişim fonksiyonlarını aynı anda gerçekleştirir. Yüksek bant genişliği yoğunluğu elde etme ve iç mekân aydınlatma altyapısını geniş ölçüde kullanma avantajlarına sahiptir. VLC'nin avantajları arasında, optik frekanslardaki lisanssız ve geniş bant kullanımı yanı sıra LED'lerin uzun ömürlü ve ucuz üretim maliyetine sahip olması da yer alır [12, 13]. LED'ler verici, PD ise alıcı olarak kullanılır. VLC, geleneksel olarak kullanılan RF tabanlı iletişim teknolojilerine bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, LED ışıklar aracılığıyla veri iletimini sağlarken mevcut aydınlatma altyapısını iletişim için kullanma potansiyeline sahiptir. Ancak, iletişim kanalındaki zorluklar ve performansı artırmak için yeni yöntemler arayışı, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) VLC'nin gelişimini teşvik etmiştir.

MIMO sistemler, iletişim sistemlerinde kullanılan bir teknik olarak dikkat çeker. MIMO, aynı anda birden fazla anten kullanarak veri iletimini ve alımını sağlayarak

iletişim performansını artırır. MIMO'nun diğer faydaları, düşük maliyetli düşük güçlü bileşenlerin kullanımı, azaltılmış gecikme, basitleştirilmiş ortam erişim kontrol (MAC) katmanıdır. Ayrıca, çoklu kullanıcılar verimli bir şekilde desteklenebilir. Bant genişliği veya güç genişlemesi olmaksızın veri hızını artırmak için MIMO tekniklerinin kullanılmasıyla umut vadeden bir çözüm elde edilmiştir [14]. RF tabanlı iletişim sistemlerinde başarıyla kullanılan MIMO teknolojisi, görünür ışık iletişimi alanında da potansiyel avantajlar sunmaktadır. MIMO sistemlerin performansı üzerinde etkili olan en önemli etkenlerden biri, kanallar arası ilintidir.

Aydınlatma amaçlı kullanılan LED'ler bina içi ortamlarda çoklu düzende tavana yerleştirilmektedir. Bu durum VLC sistemlerinde MIMO kullanımını desteklemekte fazladan bir maliyet oluşmasını önlemektedir. MIMO-VLC'de kanallar arasındaki ilintiyi azaltmak ve veri hızlarını artırmak için çeşitli yöntemler kullanılır. Örneğin, fotodedektörlerin yönlendirilmiş kullanımı, kanal matrisinin korelasyonunu azaltabilir ve böylece iletimde daha güvenilir ve yüksek hızlı veri iletimi sağlayabilir. Ayrıca, alıcı yapısında piramit tipi açısal çeşitlemeli alıcıların kullanılması, çeşitli açılardan gelen sinyallerin yakalanmasını ve işlenmesini sağlayarak kanal çeşitliliğini artırabilir. Bununla birlikte, iletim şemalarında uzamsal çeşitlilik (SD) ve uzamsal çoklama (SMP) gibi tekniklerin kullanılması veri hızlarını artırabilir. Bu yöntemler, MIMO-VLC sistemlerinin verimliliğini artırmak için etkili stratejiler olarak öne çıkmaktadır.

MIMO'nun sunduğu anten çeşitliliği ve VLC'nin yüksek bant genişliği avantajları birleştiğinde, iletişim sistemlerinde kapasite artışı ve verimlilik sağlanabilir. Bu nedenle, MIMO sistemlerin ve VLC teknolojilerinin birlikte kullanılması, gelecekteki kablosuz iletişim sistemlerinin gelişiminde önemli bir rol oynayabilir.

1.4 Uyarlanabilir Modülasyon Yaklaşımı ve Açısal Çeşitlemeli Alıcı

İç mekân MIMO-VLC sistemlerinde uyarlanabilir yaklaşımlar, sinyal kalitesini ve veri iletim hızını artırmada önemli bir rol oynar. Bu sistemlerde, tipik iç mekân koşullarında yol farkının çok küçük olduğu gözlemlenmiştir, bu da basit ve etkili yöntemlerle çeşitlilik kazancı elde edilmesini sağlar. SMP gibi RF sistemlerinde yaygın olarak kullanılan MIMO teknikleri, sistem kapasitesini artırarak belirli bir çoklama kazancı sağlayabilir. Önceki çalışmalarda, iç mekân MIMO-VLC sistemlerinde sinyal kalitesini ve veri iletim hızını artırmak için çeşitli iletim şemaları

üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu şemalar arasında özellikle SD, SMP ve uzamsal modülasyon (SM) teknikleri öne çıkmıştır [15-17].

Tipik iç mekânlarda, birden fazla verici-alıcı bağlantısı arasındaki yol farkı çok küçük olduğundan, bağlantılar arasındaki gecikme göz ardı edilebilir düzeydedir [15]. Dolayısıyla, SD iç mekân VLC sistemlerinde çeşitlilik kazancı elde etmek için basit ve etkili bir yöntemdir. SMP, yaygın olarak kullanılan bir diğer MIMO tekniğidir ve belirli bir çoklama kazancı sağlayarak sistem kapasitesini artırır [16]. Ancak, alıcılar arasındaki yakınlık ve doğrudan görüş hattı (LOS) iletişimi sebebiyle, SMP-VLC sistemleri yüksek kanal ilintisi ile karşılaşırlar. Bu durum, elde edilebilir çoğullama kazancı miktarını kısıtlar. SM tekniği ise, MIMO ve sayısal modülasyonun birleşimi olarak öne çıkar. Bu teknikte, herhangi bir zamanda sinyal iletmek için yalnızca bir LED aktive edilir ve aktifleştirilen LED'in indeksini seçerek ek bitler iletilebilir [18]. Ancak, yüksek veri hızları elde etmek için vericilerin (LED'lerin) sayısının üstel olarak artırılması gereklidir ki bu iç mekânlar için uygulanabilir olmayabilir.

Tüm bu MIMO tekniklerinde, her LED vericinin çalışma modu, MIMO-VLC sistemi kullanıcılarının uzamsal konumlarından bağımsızdır. Bu nedenle, iç mekân MIMO-VLC sistemlerindeki uygun iletim şemasının seçimi, sistem performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. İç mekân MIMO-VLC sistemlerinde uyarlanabilir yaklaşımlar, sinyal kalitesini ve veri iletim hızını artırmada önemli bir rol oynar. Geleneksel SD yöntemi, yüksek hızları sadece düşük Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) bölgelerinde elde edebilirken, geleneksel SMP büyük SNR bölgelerinde daha etkilidir. Ancak hem düşük hem de yüksek SNR bölgelerinde yüksek hız elde edebilen bir MIMO tekniği bulunmamaktadır [19, 20].

Bu kısıtlamaları aşmak ve veri hızlarını artırmak için MIMO-VLC'de kanallar arasındaki ilintiyi azaltma stratejilerine odaklanılmıştır. Ayrıca, kullanıcı odaklı kalite deneyimi optimizasyonundan ve zamanlama planlamasından esinlenen çok renkli LED'ler, VLC sistemlerindeki kullanıcı odaklı kalite deneyimi optimizasyonu ve zamanlama planlamasından ilham almıştır [21]. Bu stratejiler ve teknolojik ilerlemeler, iç mekân MIMO-VLC sistemlerinde daha yüksek veri iletim hızları ve daha iyi sinyal kalitesi sağlamak için önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır.

[22] çalışmasında önerilen kullanıcı merkezli MIMO yaklaşımı, geleneksel MIMO tekniklerine kıyasla kullanıcıların uzamsal konumlarını dikkate alarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşıma dayalı üç MIMO tekniği önerilmektedir: SD/SMP anahtarlama, uyarlanabilir SMP (aSMP) ve SD destekli uyarlanabilir SMP (SD-aSMP). SD/SMP anahtarlama, gölgelenmeye karşı bağlantı güvenilirliğini artırmak ve kanal korelasyonlarına uyum sağlamak için incelenmiştir [20]. [23] çalışmasında kullanıcı merkezli aSMP tekniği, VLC sistemlerinde kullanılan dağıtık MIMO kavramından esinlenilmiştir. aSMP, düşük karmaşıklığa sahip sezgisel bir LED alt küme seçim algoritması ile kullanıcı merkezli bir şekilde tasarlanmıştır. Özellikle, bu çalışmada ilk kez ortaya konan SD-aSMP tekniği, hem SD/SMP anahtarlamasından hem de aSMP'den geniş bir SNR aralığında daha iyi performans sergilemektedir [22]. Bu nedenle, uyarlanabilir yaklaşımların iç mekân MIMO-VLC sistemlerinde kullanılması, iletişim performansını artırmak ve sistem kapasitesini optimize etmek için önemlidir. Bu yaklaşımlar, değişken kanal koşullarına uyum sağlayarak iletişim sistemlerinin verimliliğini artırabilir ve kullanıcı deneyimini iyileştirebilir.

[24] çalışmasında, piramit alıcı yapısı kullanılmıştır. Bu yapının özellikleri şunlardır: alıcı yapısı birden fazla PD'den oluşur, PD'lerin farklı eğim açılarıyla yönlendirilmesiyle düşük korelasyonlu MIMO kanalları elde edilir. PD'lerin normal vektörleri, eşkenar N-gen tabanlı bir piramitin üçgen yüzlerinin normal vektörleriyle aynı şekilde seçilir. Piramit açısız çeşitlenmeli alıcı (ADR) olarak adlandırılan bu yapı, farklı açılardan gelen sinyallerin yakalanmasını ve işlenmesini sağlayarak kanal çeşitliliğini artırmayı hedefler. Genelleştirilmiş ADR (GADR) yapısında ise ADR yapısına ek olarak piramitin tepe noktasına normali alıcı düzlemine dik olan fazladan bir PD yerleştirilir.

ADR yapısı, küçük mobil cihazlar için uygundur ve mekânsal ayırım gerektirmez. Çalışmada, ADR alıcı yapısının VLC-MIMO sistemlerinde etkin ve umut verici olduğunu gösterilirken, aynı zamanda ADR'nin bağlantısı engellenmiş alıcıya göre daha iyi performans sergilediği ve farklı alıcı konumları için donanım ayarı gerektirmediği belirtilmektedir. Bu sonuçlar, ADR yapısının gelecekteki MIMO görünür ışık iletişim sistemlerinde önemli bir rol oynayabileceğini ve yüksek potansiyele sahip olabileceğini göstermektedir.

1.5 Tezin Katkıları

Bu çalışmada, piramit ADR ve GADR yapıları, kullanıcı merkezli MIMO kavramıyla birleştirilerek, iç mekân VLC sistemlerindeki iletişim performansı iyileştirilmiştir. Kullanıcı merkezli üç MIMO tekniği- SD/SMP anahtarlama, aSMP ve SD-aSMP- iç mekân VLC sistemlerine uygulanmış ve farklı konumlardaki kullanıcıların veri hızlarını artırmak için bu tekniklerden yararlanılmıştır. Özellikle, kullanıcı merkezli MIMO yaklaşımı ve GADR alıcının birlikte kullanımı ile iç mekân iletişimde literatürdeki VLC sistem performanslarının üzerine çıkmıştır.

Ayrıca, çalışmada ADR ve GADR yapılarının performansı kullanıcı merkezli iletim teknikleriyle Matlab üzerinden detaylı bir şekilde incelenmiştir. Matlab üzerinde yapılan benzetimler, önerilen kullanıcı merkezli MIMO tekniklerinin etkinliğini değerlendirmek ve gerçek dünya uygulamalarında nasıl performans gösterebileceğini anlamak için önemli bir araçtır. ADR ve GADR yapılarının performansları LED sayısının değiştirilmesi, PD sayısının değiştirilmesi ve açı parametrelerinin değiştirilmesi gibi senaryolarda benzetim ve analitik sonuçlarla ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

MIMO-VLC sistemlerinin bina içi iletişimde kullanıcı odaklı bir yaklaşımla vericiden alıcıya olan bağlantıda ulaşılabilir veri hızları elde edilmiştir. Dikkate alınan senaryoda tüm bina içi ortam için belli aralıklarla ulaşılabilir veri hızları hesaplanarak toplamsal dağılım fonksiyonu (CDF) grafikleri elde edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 VLC Tarihçesi

Alexander Graham Bell'in geliştirdiği foton teknolojisi, VLC'nin en eski kullanım örneklerinden biridir. Bu teknoloji, ses verilerini güneş ışınları aracılığıyla ileterek 200 metreye kadar iletişim sağlamayı amaçlamıştır [25-27]. Ancak, teoride kullanışlı olsa da pratikte birçok zorlukla karşılaşmıştır. Özellikle iletişimin uzak mesafelerde zor olması ve açık alanın güneş ışığıyla aydınlanmasıyla ortaya çıkan gürültü büyük engeller oluşturmuştur. Bu iletişim yöntemi sadece gündüz saatlerinde kullanılabilmiştir, çünkü güneş ışığını kaynak olarak kullanmaktaydı.

RF iletişim yöntemlerinin geliştirilmesiyle VLC konusu 1999 yılına kadar belirli bir noktada kalmıştı. Ancak, bu yılın sonlarında Pang ve ekibi hızlı anahtarlama LED'leri kullanarak iletişim için görünür ışığı modüle etmeyi başardılar. Bu, VLC'nin modern çağıdaki ilk adımlarından biriydi ve literatürde önemli bir dönüm noktası olarak kabul edildi [26-29].

2001'de, RONJA projesi (Makul Optik Yakın Erişim), 1,4 kilometreyi aşan mesafelerde 10 Mb/s hızında veri iletimi için görünür ışık demetlerini kullandı. Bu da VLC'nin pratik uygulamalarını gösteren önemli bir örnekti [30]. Ayrıca, Japonya'daki Keio Üniversitesi'nde, Tanaka ve ekibi 2000'lerin başlarında Beyaz-LED'leri kullanarak iç mekân kablosuz iletişimin gelişimine öncülük etti. Bu da VLC'nin farklı alanlarda kullanım potansiyelini ortaya koydu [31,32].

2003 yılında, Japonya'da önemli şirketlerin katılımıyla Visible Light Communication Consortium (VLCC) kuruldu. Bu konsorsiyumun amacı, VLC teknolojisinin yaygınlaşmasını ve kamuoyuna duyurulmasını sağlamaktı. VLCC, 2007 yılında VLC sistemi standardı ve Görünür Işık Kimlik Sistemi (VL-ID) standardı olmak üzere iki ek standart önerdi [32]. Bu standartlar, Japon Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Endüstrileri Birliği (JEITA) tarafından CP-1221 ve CP-1222 olarak kabul edildi [26, 27, 33]. Aynı zamanda, Avrupa'da *hOME Gigabit Access* projesi (OMEGA) de 2011'de görünür LED'lerle tavan aydınlatmasını kullanarak yüksek bant genişliği hizmetleri sunan bir ev erişim ağı geliştirmeyi amaçladı. Bu proje, Siemens, France

Telecom gibi önemli endüstri ve akademi kuruluşlarından 20 Avrupalı ortakla gerçekleştirildi [62,63].

Aynı yıl içinde, kısa menzilli optik kablosuz iletişimlerde görünür ışığı kullanan bir Fiziksel (PHY) ve MAC katmanı tanımlarıyla birlikte ilk IEEE 802.15.7 VLC standardı yayınlandı. Bu standart, Aç Kapa Anahtarlama (OOK), Değişken Darbe Konum Modülasyonu (VPPM) ve Renk Kaydırma Anahtarlama (CSK) gibi modülasyon tekniklerini içermektedir [34,35,64]. İç mekân iletişimi için bu standarda göre elde edilebilecek maksimum veri hızı 96 Mb/s'ye kadar çıkabilmektedir. MIMO sistemlerinin ve farklı modülasyon şemalarının uygulanmasıyla veri hızlarını önemli ölçüde artırıldı.

Mayıs 2014'te, Görünür Işık İletişimi Birliği (VLCA), VLC araştırmalarını genişletmek, geliştirme sürecini planlamak ve ileri VLC sistemlerini standardize etmek için VLCC'nin yerine geçti. Bu değişim, VLC teknolojisinin daha yaygın kullanımına ve gelişimine ivme kazandırdı [36,65].

Günümüzde, akademi ve endüstride birçok araştırma grubu bulunmaktadır. Bunlar arasında Işığa Dayalı Evrensel İletişim Merkezi (UC-Light), Optik Kablosuz Uygulamalar Merkezi (COWA), Akıllı Aydınlatma Mühendislik Araştırma Merkezi (Boston Üniversitesi), Edinburgh Üniversitesi ve Oxford Üniversitesi gibi önemli araştırma merkezleri yer almaktadır. Bu merkezler, VLC ve optik kablosuz iletişim teknolojileri üzerine araştırmalar yürütmekte ve bu alanın gelişimine büyük katkılarda bulunmaktadır [37-40].

2.2 VLC Uygulamaları

VLC teknolojisi, çok yüksek veri hızları gerektiren güvenli iletişim gereksinimlerini karşılayabilen bir teknoloji olarak karşımıza çıkmıştır. Alıcı ve verici kaynaklarının ucuz olması ve düşük güç tüketimi gibi avantajları sayesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. VLC'nin gelişmekte olan teknolojilerden biri olması ve bu alanda birçok araştırma yapılıyor olması, VLC'yi günlük yaşamımızın bir parçası haline getirmek için yapılacak çok şey olduğunu göstermektedir. VLC uygulamaları kapalı alanlarla sınırlı kalmamıştır. RF sistemlere göre öne çıkan güvenlik ve girişime karşı

dirençli olma özelliği ile farklı alanlarda uygulama imkânı bulmuştur. VLC'nin kullanım alanları olarak şunları gösterebiliriz:

- Ulaşım
- Hastaneler
- Savunma
- Havacılık
- Akıllı aydınlatma
- Su altı iletişimi

VLC teknolojisi, Akıllı Ulaşım Sistemleri (ITS) alanında güçlü ve güvenli iletişim gerektiren önemli uygulamalara sahiptir. Mevcut yoğun RF tabanlı ITS sistemlerini değiştirmek veya tamamlamak için ideal bir aday olarak öne çıkmaktadır [41, 42]. Ayrıca, VLC ve RF tabanlı iletişim sistemlerinin bir araya geldiği bir ağ, Araç İletişimleri (VC) için daha güvenilir bir sistem sunabilir. LED'lerin araçlarda uyarı ışığı olarak kullanılması, trafikte araçlar arasında ve/veya araç-trafik uyarıcıları arasında VLC kullanımını teşvik etmektedir. Bu durum, VLC'nin ITS alanında önemini vurgulamaktadır.

ITS alanında güçlü ve güvenli iletişimi sağlamak için VLC teknolojisinin kullanılması, iletişim sistemlerinin güvenilirliğini artırabilir. Bu da trafik güvenliğini ve araç iletişimini güçlendirebilir. Ayrıca, trafik yoğunluğunu azaltarak yolculuk süresini kısaltabilir. Bu da VLC'nin ITS alanında gelecekte daha güvenli ve verimli ulaşım sistemleri için sağladığı potansiyeli gösterir. Otomotiv endüstrisinde başarıyla kullanılan VLC teknolojisi, araçtan-araca iletişimi, araçtan trafik lambasına veya çevre aydınlatma sistemine kolaylıkla sağlar [43]. Bu teknolojinin araçtan-araca iletişime (V2V) sağladığı katkı büyüktür; çünkü yaralanmaların azaltılma potansiyelini göz önünde bulundurursak, güvenliği artırır [43]. 2016 yılında Avrupa Birliği seviyesinde yaklaşık olarak 25,624 kişi trafik kazalarında hayatını kaybetmiştir. Araç iletişim teknolojisinde entegre edilmiş VLC, güvenliği artırmaya yardımcı olabilir [44].

VLC, hastaların izlenmesi, Makine-Makine (M2M) iletişimleri ve diğer tüm ağ uygulamaları için kullanılabilir [45]. VLC'nin hastanelerde kullanılması, hastaların izlenmesi ve tıbbi verilerin iletilmesi açısından güvenli ve güvenilir bir çözüm sunabilir. Bu da sağlık çalışanlarının hastaların durumunu daha etkin bir şekilde takip

etmelerine ve gerektiğinde hızlı müdahalede bulunmalarına yardımcı olabilir. Hastanelerde elektromanyetik girişime maruz kalacak manyetik rezonans (MR) tarayıcıların olduğu yerlerde cep telefonları ve WI-FI kullanımı istenmemektedir [45]. VLC teknolojisi, elektromanyetik girişim oluşturmadağı için MR tarayıcıları gibi hassas tıbbi cihazlardan etkilenmeden kullanılabilir.

Havacılıkta, yolcular VLC teknolojisi kullanılarak aydınlatma ve iletişim hizmetinden yararlanabilmektedir. Bu durum, yolcuların kendi akıllı telefonları, dizüstü bilgisayarları, vb. cihazları kullanarak koltuklarının üstündeki LED lambayı açtıklarında istedikleri medya hizmetine erişebilmelerini mümkün kılar [46]. Bu yolcuların uçuş süresi boyunca bağlantılarını sürdürmelerini ve istedikleri içerikleri tüketmelerine olanak sağlar. Fakat bu durumda dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, yan yana oturan yolcular lambalarını kullanmaya başladıklarında birbirlerine karşı girişim yayınları oluşturmaları ve bu durum hizmetin kalitesini düşürmesidir.[46]. Yan yana oturan yolcuların lambalarını kullanmalarıyla ortaya çıkan girişim problemleri, daha ileri teknoloji ve iletişim çözümleriyle çözülebilir.

2.3 MIMO VLC Sistemler

Akıllı cihazların sayısındaki artış ve kablosuz veri trafiğindeki talep artışı, mevcut RF spektrum kaynağının doyuma ulaşmasına neden olmuştur. Bu talepleri karşılayabilmek için yeni kablosuz iletişim teknolojileri geliştirilmelidir. VLC ve Light Fidelity (Li-Fi), bu teknolojiler arasında en umut verici olanlarıdır. Literatürde yapılan birçok çalışmada VLC, daha yoğun veri iletimi, yüksek veri hızı ve iletim güvenliği sağlama yeteneğini göstermiştir.

Kablosuz iletişimde çoklu antene sahip sistemler, performansı önemli ölçüde artırarak tek antenli sistemlerin yerini almış ve özellikle yeni nesil teknolojilerde büyük ilgi görmüştür [47]. İç mekanlarda eşit ve yeterli aydınlatma sağlamak amacıyla tavana yerleştirilen çok sayıda LED MIMO iletimini doğal olarak kolaylaştırır [48]. Son on yılda MIMO-VLC araştırmalarına olan ilgi artmıştır. Bu sistemlerde yaygın olarak üç şema değerlendirilir: uzamsal modülasyon (SM), uzamsal çeşitlilik (SD) veya Tekrarlama Kodlaması (RC), ve uzamsal çoklama (SMP) [49].

MIMO-VLC sistemlerinin verimliliğini artırmak için kullanıcı merkezli MIMO ve indeks modülasyonlu MIMO gibi ileri teknikler önerilmiştir. 2017'de tanıtılan dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM) tabanlı indeks modülasyonlu MIMO VLC sistemi, OFDM sinyallerindeki bant genişliği kayıplarını önler ve LED indeks modülasyonunu uzamsal çoklama ile birleştirir [50]. Ancak, bu yöntem alıcı karmaşıklığını ve aydınlatma kısıtlamalarını beraberinde getirir. [22] çalışması, PD'lerin 90° açıyla yerleştirildiği bir düzlemsel alıcı yapısıyla, kullanıcı merkezli MIMO performansını incelemiştir. Bu çalışmada aSMP, SD/SMP anahtarlama ve SD-aSMP teknikleri ile performans artırılmıştır. Ancak, yüksek kanal korelasyonu sorunu çözülememiştir [51].

Kanal korelasyonu, bir MIMO sisteminde farklı sinyal yollarının birbirine olan benzerliğidir. Yüksek kanal korelasyonu, sinyallerin birbirine çok benzediği ve bu nedenle bağımsız bilginin verimli bir şekilde iletilemediği anlamına gelir. Bu durum, özellikle iç mekân MIMO-VLC sistemlerinde, doğrusal görüş hattının (LoS) baskın olduğu durumlarda sıkça görülür ve bu da sinyalin ayrıştırılmasını zorlaştırır.

MIMO-VLC sistemlerinde kanallar arasındaki yüksek korelasyon sorununa çözüm olarak ADR önerilmiştir. [52]'de piramit tipi ADR yapısının, düzlemsel alıcılara göre kanal matrisinin korelasyonunu azaltmada etkili olduğunu gösterilmiştir. Genelleştirilmiş ADR (GADR) yapısı, ek bir düzlemsel PD ile korelasyon azaltımını daha da iyileştirir [52]. [53] çalışması, farklı ADR yapılandırmalarıyla elde edilebilecek performans artışını modellemiş ve daha fazla PD içeren yapıların daha iyi bit hata oranları (BER) sağladığını ortaya koymuştur.

MIMO-VLC sistemlerinin performansı, kullanıcıların konumuna ve alıcıların türüne bağlı olarak değişir. Literatürdeki çalışmalar, LED yerleşimi ve alıcı türlerinin performansa etkisini detaylandırmıştır [23, 51, 54, 55]. İç mekanlarda SMP ve SD gibi tekniklerin, sinyal kalitesini ve veri hızını artırmada önemli olduğu gösterilmiştir. Ancak, SMP'nin yüksek kanal korelasyonu sorunları, performans artışını sınırlamaktadır. SM tekniği ise daha fazla LED gereksinimi nedeniyle iç mekanlarda pratik olmayabilir.

Uyarlanabilir yaklaşımlar, değişen kanal koşullarına uyum sağlayarak MIMO-VLC sistemlerinde veri iletim hızını ve sinyal kalitesini artırmada önemli bir rol oynar.

Geleneksel SD ve SMP yöntemleri belirli SNR bölgelerinde etkilidir ancak geniş SNR aralıklarında performansı optimize eden bir MIMO tekniği henüz bulunmamıştır. Kullanıcı merkezli aSMP ve SD/SMP anahtarlama gibi yeni teknikler, geniş SNR aralıklarında daha iyi performans sağlar [22].

Sonuç olarak, MIMO-VLC sistemlerinde kanal korelasyonunu azaltmak ve veri hızlarını artırmak için uyarlanabilir yaklaşımlar ve ADR gibi yenilikçi alıcı yapıları önemlidir. Bu teknikler, iç mekân iletişimde kullanıcı deneyimini iyileştirir ve sistem kapasitesini artırır.



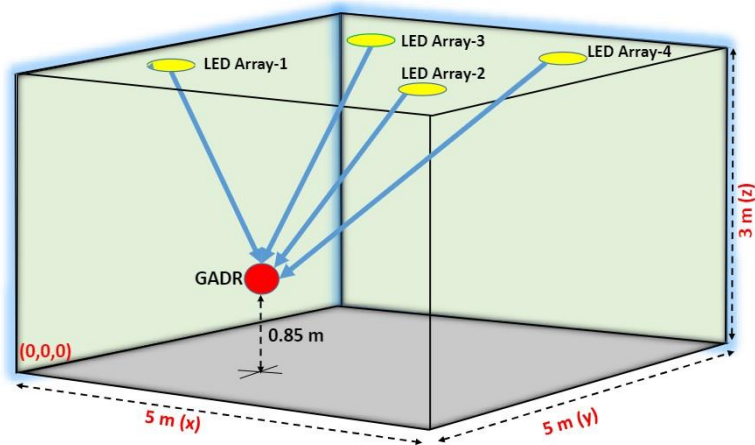
3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 MIMO-VLC Sistem Tasarımı

Bu bölüm, çalışmada kullanılan sistem modelinin temelini açıklar. Aynı zamanda, piramit alıcı için Açısal Çeşitlilik Alıcı (ADR) ve Genelleştirilmiş Açısal Çeşitlilik Alıcı (GADR) yapısının temel özelliklerini incelediğimiz bu bölüm, MIMO-VLC sistemlerinde kullanılan geleneksel ve kullanıcı merkezli MIMO iletim tekniklerinin veri hızlarına etkisini ADR ve GADR alıcı yapılarıyla birlikte açıklar. Bu bağlamda, sistem modeli, geleneksel ve kullanıcı-merkezli MIMO iletim tekniklerinin performansını analiz etmek ve sistemin ulaşılabilir veri hızını elde etmek için gerekli ifadeler verilmiştir.

3.1.1 İç mekân MIMO-VLC sistem modeli

Bu çalışmada, iki farklı alıcı tipi incelendi. İlk olarak, poligonal piramit ADR adı verilen alıcı türü, poligonal yüzeylerde ($N_r - 1$) PD ile donatılmıştır. Diğer bir yapı GADR alıcı ise normali alıcı düzlemiyle 90° açı yapacak şekilde yerleştirilmiş merkezde bir PD ve poligonal yüzeylerde ($N_r - 1$) PD içerir [57]. MIMO-VLC sisteminin geometrisi, Şekil 3.1'de gösterilen yapıya sahiptir. Sistemde, odanın tabanı ve tavanıyla paralel bir konumda olduğu varsayılan bir masa düzlemi bulunmakta olup, PD'lerin yerden yüksekliği 0,85 metre olarak kabul edilmektedir. Alıcı modülün konumu, iç mekân kullanıcı hareketliliğine bağlı olarak x ve y eksenlerinde değişebilmektedir.



Şekil 3.1. MIMO VLC sisteminin bina içi geometrisi.

OFDM, dağınık kanallardan kaynaklanan semboller arası girişimi (ISI) azaltmadaki etkinliği nedeniyle geniş bant kablosuz iletişim ağlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, optik sistemler için iyi bir seenekdir. Ancak, OFDM optik iletişimlerde kullanılan yoğunluk modülasyonu ve doğrudan sezim (IM/DD) sistemlerine doğrudan uygulanamaz [5].

IM/DD sistemlerde, temel bant iletim sinyali, optik frekans taşıyıcısının genlik ve fazı yerine yoğunluğunu değiştirir. Bu nedenle, vericiden çıkan sinyalin pozitif ve gerçek olması gerekmektedir. Ters hızlı Fourier dönüşümünün (IFFT) giriş vektörü Hermitian simetrik ise, gerçek bir OFDM sinyali üretilebilir. Sinyali pozitif yapmanın iki yolundan biri, DC bias uygulamak, yani DC bias optik OFDM (DCO-OFDM) kullanmaktır [53]. Bu alışmada DCO-OFDM düzeni ele alınmıştır. Böylece, LED'lerden gelen iletim sinyal vektörü iki bileşenden oluşur: AC sinyal vektörü $\mathbf{x}$ ve DC bias. DC bias sinyali bilgi içermez ve alıcıda elimine edilir. Bu nedenle alınan bilgi sinyali denklem (3.1)'deki gibi elde edilir [22];

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (3.1)$$

burada $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_{N_r}]^T$ vektörü eklenmiş beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) olarak modellenmiştir. $\mathbf{n}$ elemanları sıfır ortalama ve σ^2 varyansa sahip normal dağılıma sahiptir, yani $n_i \sim N(0, \sigma^2)$. $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_t}]^T$ iletilen veri vektörü ve $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{N_r}]^T$ alınan vektördür. $\mathbf{H}$, $N_r \times N_t$ boyutundaki kanal matrisini temsil eder. $\mathbf{H}$ elemanları, direk görüş hattı (LOS) bağlantısının katsayılarıdır. Lambertian formülüne göre j . LED ile i . PD arasındaki kanal katsayısı denklem (3.2)'de verilmektedir [30];

$$h_{ij} = \frac{(m+1)\rho A}{2\pi d_{ij}^2} \cos^m(\beta_{ij}) \cos(\gamma_{ij}) T_s(\gamma) G(\gamma), \quad (3.2)$$

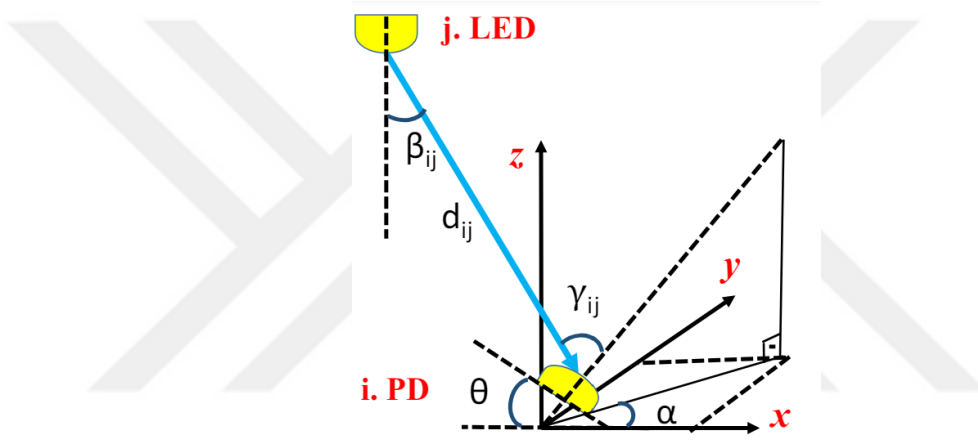
burada ρ ve A sırasıyla PD'nin duyarlılığını ve aktif alanı belirtir. $i = 1, 2, \dots, N_r$ ve $j = 1, 2, \dots, N_t$ şeklinde verilir. d_{ij} , j . LED ile i . PD arasındaki mesafeyi temsil eder. β ve α sırasıyla azimut ve yükselme açısıdır. Denklem (3.2)'de yer alan açılar ve mesafe şekil 3.2'de gösterilmiştir. Lambertian düzen katsayısı m (3.2a) ile elde edilir;

$$m = -\frac{\ln(2)}{\ln(\cos(\psi))}, \quad (3.2a)$$

burada ψ , LED'in yarı güçteki yarı açısını belirtir. $G(\gamma)$ ve $T_s(\gamma)$ sırasıyla alıcıdaki lensin ve filtrenin optik katsayılarıdır. $G(\gamma)$ iç kırılma indisi n_{RI} olan idealize edilmiş bir PD ile (3.2b)'deki gibi elde edilir [57];

$$G(\gamma) = \frac{n_{RI}^2}{\Psi_C}, \quad (3.2b)$$

Burada Ψ_C , yarı açı görüş alanını (FOV) ifade eder ve bu, PD'ler için özel bir açıdır. Eğer bir fotonun geliş açısı FOV'ye eşit veya daha küçükse, PD üzerinde akım oluşturur. Son olarak, eğer ışın ile alıcı normali arasındaki açı FOV açısından büyükse, kanal katsayısı h_{ij} sıfır olarak alınır.



Şekil 3.2. j . LED ve i . PD arasındaki bağlantı geometrisi.

Denklem (3.1), her PD'nin çıkışındaki elektrik sinyalinin, giriş sinyali ve eklenen gürültünün doğrusal bir toplamı olduğunu açıklar. Pratik VLC sistemlerinde, alıcı tarafındaki MIMO sinyalin çözülmesi, LED giriş elektrik güçlerinin ayarlanmasını gerektirmeden kolayca gerçekleştirilebildiğinden, giriş sinyallerinin tekrar elde edilmesi için dikkate alınmıştır.

Önerilen MIMO-VLC sisteminin kanal matrisi $\mathbf{H}$ tam ranklıdır. Bu gereksinim, $N_r \geq N_t$ sağlandığında karşılanır. Bu nedenle, $\mathbf{H}^\dagger$, $\mathbf{H}$ 'nin pseudo-tersi olarak elde edilir ve (3.3) ile değerlendirilir [59];

$$\mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^* \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^*, \quad (3.3)$$

burada $\mathbf{H}^*$, kanal matrisinin eşlenik devriğidir. Tahmin edilen veri vektörü $\hat{\mathbf{x}}$, alınan sinyalin kanal matrisinin pseudo-tersi ile çarpılmasıyla elde edilir. Bu işlem (3.4) ile gerçekleştirilir [58];

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{H}^\dagger \mathbf{n}. \quad (3.4)$$

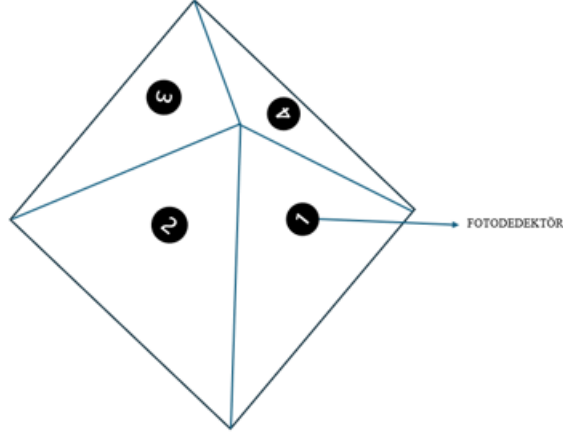
Tipik bir iç mekân VLC sisteminde, eklenen gürültü anlık ve ısı gürültülerin toplamından meydana gelir. AWGN modeline sahip n_r gürültü sinyalinin gücü $P_n = N_0 B$ olarak ifade edilir. Burada N_0 , gürültünün güç spektral yoğunluğu (power spectral density, PSD ve B ise modülasyon bant genişliğidir.

3.1.2 Alıcı modülleri

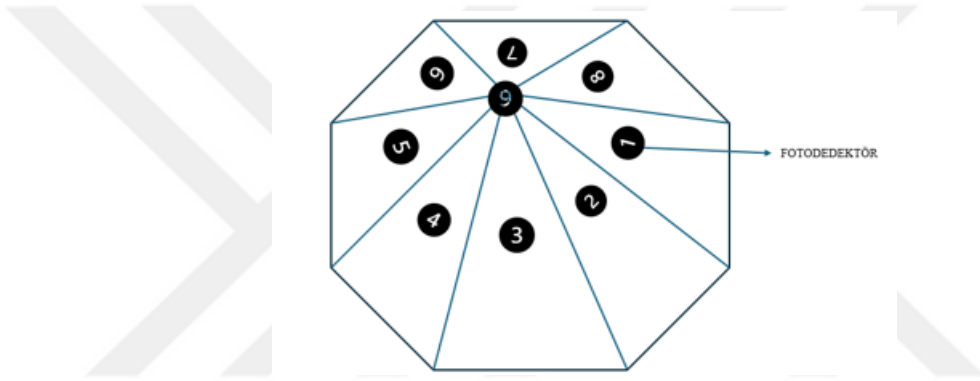
MIMO iletişim tekniklerinde kanallar arasındaki ilişki, iletişim performansı için kritik bir faktördür. VLC sistemlerinde MIMO kanalları genellikle yüksek derecede ilişkilidir. Bu zorluğu aşmak adına, önceki çalışmalarda alıcı tarafında PD'ler arasında belirli bir mesafenin olduğu bir model önerilmiştir, ancak bu model kullanıcının hareket özgürlüğünü kısıtlamaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise MIMO VLC alıcı çeşitlerinin kompakt şekilde tasarlanması ve kullanıcının hareket özgürlüğünün artırılması üzerine odaklanılmıştır.

ADR ve GADR hem kompakt bir yapıya hem de kolay montaj özelliklerine sahiptir. Bu kompakt yapı, PD'ler ile aynı LED arasında yaklaşık olarak eşit mesafelerin oluşmasını sağlar. Alıcının temel prensibi, her bir PD'nin normal vektörünü ayarlayarak aynı LED'den gelen farklı açılardaki ışınların farklı kanal kazançlarına yol açmasını sağlamaktır. Bu sayede, MIMO sistemlerinde kanallar arasındaki korelasyon azalmaktadır.

ADR üzerinde her bir üçgen yüzeyine bir PD monte edilmiştir ve piramit şeklinde inşa edilen, tabanı eşkenar $(N_r - 1)$ kenara sahip çokgen bir yapıya sahiptir. ADR'nin aksine, GADR üzerinde N_r PD'nin normali yatay düzleme dik ve merkezde yüzü yukarıya doğru yönlendirilmiştir. Bu nedenle, ADR ve GADR'deki PD'lerin normal vektörleri çeşitli yönlerde doğru işaret eder. Şekil 3.3, $N = 4$ için bir ADR örneğini göstermektedir. Şekil 3.4'de ise $N = 9$ için bir GADR örneği bulunmaktadır.



Şekil 3.3. 4 Yüzlü piramit alıcı (ADR) yapısı.



Şekil 3.4. 8 Yüzlü piramit alıcı (GADR) yapısı.

PD'lerin yatay bir düzlemde h_{PD} yüksekliğinde konumlandığını varsayıyoruz. i . üçgen yüzeyindeki i . PD'nin koordinatları (3.5) ile elde edilir;

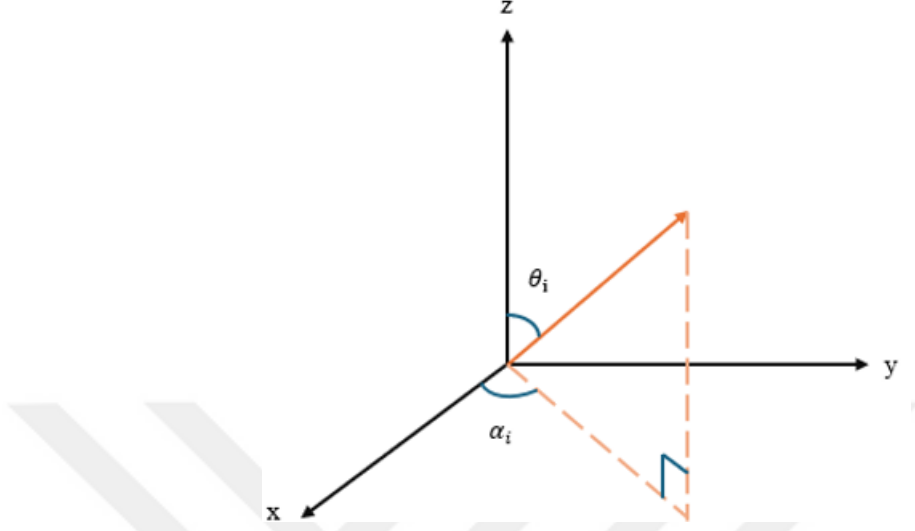
$$x_{PD}^i = X_{PD} + r \cos\left(\frac{2(i-1)\pi}{N-1}\right), \quad y_{PD}^i = Y_{PD} + r \sin\left(\frac{2(i-1)\pi}{N-1}\right), \quad z_{PD}^i = h_{PD}, \quad (3.5)$$

Buradar, ADR ve GADR yapısının tabanında çokgenle temas eden dairenin yarıçapıdır. Her PD'nin θ olarak tanımlanan bir yükseklik açısı vardır, bu parametre tüm PD'ler için aynıdır. Başka bir deyişle, $\theta_i = \theta, i \in \{1, \dots, (N-1)\}$. Diğer yandan, i . PD'nin azimut açısı (3.6) ile hesaplanır;

$$\alpha_i = \frac{2(i-1)\pi}{N-1} + \alpha_{PD}. \quad (3.6)$$

LED'lerin ve PD'lerin normal vektörleri $[x, y, z, \alpha, \theta]$ formatında ifade edilir. Burada (x, y, z) , vektörün başlangıç noktasının Kartezyen koordinatlarını temsil eder. $\theta \in$

$[0, \pi]$ ve $\alpha \in [0, 2\pi]$ ise sırasıyla pozitif z-ekseninden olan açıları (yani yükseklik açısı) ve pozitif x-ekseninden olan açıları (yani azimut açısı) temsil eder. Bu açılar Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Azimut ve yükselme açıları.

3.2 Geleneksel MIMO Teknikleri

Bu bölümde geleneksel MIMO tekniklerinin analizini yaparak, iç mekân VLC sistemleri için uygun olup olmadığı değerlendirildi. Ayrıca, bu tekniklerin başarımlarını değerlendirirken, iç mekân iletim koşullarının etkisini de göz önünde bulunduruldu.

MIMO sistemlerinde, sonsuz düşük hata oranıyla iletilebilecek en yüksek veri hızına kapasite denir. Tekli giriş tekli çıkış (SISO) kanalına ait karşılıklı bilgi denklemi, MIMO kanalının kapasitesini belirlemek için genişletilmiştir [4]. İlgili denklem (3.7) gibi verilir;

$$C = [\mathbf{H}(Y) - \mathbf{H}(Y|X)], \quad (3.7)$$

$H(Y)$ ve $H(Y|X)$, sırasıyla y ve $y|x$ 'teki entropiyi temsil eder. $p(x)$ ise giriş dağılımıdır. AWGN kanalında $p(x)$ 'in maksimuma çıkarılması Gauss dağılımı ile sağlanır ve kanal kapasitesini bit/s cinsinden (3.8) gibi verilir [60];

$$C = B \log_2(1 + \Gamma). \quad (3.8)$$

Sinyal-gürültü oranı (SNR), $\Gamma, P_s/P_n$ olarak tanımlanır. Burada P_s , iletilen sinyal gücü ve P_n , gürültü gücüdür. P_n, N_0B olarak tanımlanır; burada B , modülasyon bant genişliği ve N_0 , gürültü güç spektral yoğunluğudur (PSD). Ulaşılabilir hız, R , birim zaman ve bant genişliğinde iletilen bitleri, yani spektral verimliliği (bit/s/Hz) ifade eder. Bu nedenle, $R = C/B$ 'dir.

3.2.1 SD çoğullama tekniği

Geleneksel MIMO teknikleri içinde, SD en basit olanı olup, VLC sistemlerinde verici çeşitliliği sağlamanın etkili bir yoludur. VLC kanalları için $\mathbf{H}$ 'nin makul bir tahminini elde etmek oldukça kolaydır, bu nedenle alıcının MIMO kanal matrisini bildiği varsayılır. SD şemasında tüm LED'ler aynı sinyali gönderdiği için, i . PD çıkışındaki SNR (3.9) ile hesaplanır;

$$\Gamma_{i,SD} = \left(\sum_{j=1}^{N_t} h_{ij} \right)^2 \Gamma. \quad (3.9)$$

SD'nin ulaşılabilir hızı, alıcıda kullanılan tekniğe göre türetilen alınan SNR, Γ_{SD} , dikkate alınarak belirlenir. SD için en iyi alıcı yaklaşımı maksimum oranlı birleştirmedir (MRC). Bu nedenle, Γ_{SD} , tüm PD'lerin çıkış SNR'lerinin toplamıdır ve (3.10) ile gösterilir [22].

$$\Gamma_{SD} = \sum_{i=1}^{N_r} \left(\sum_{j=1}^{N_t} h_{ij} \right)^2 \Gamma. \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) ve $R = C/B$ 'ye göre, DCO-OFDM sinyalleme ile SD şemasının ulaşılabilir hızı (3.11) ile elde edilir;

$$R_{SD} = \frac{1}{2} (1 + \Gamma_{SD}). \quad (3.11)$$

$1/2$ çarpanı, DCO-OFDM sinyalinin iki kat bant genişliği kullanımından kaynaklanmaktadır.

3.2.2 SMP çoğullama tekniği

İç mekân VLC sistemlerinde sıkça kullanılan bir MIMO tekniği olan SMP, farklı LED'lerin aynı anda bağımsız veri akışları iletimini sağlamasıyla dikkat çeker. SMP'nin kullanılmasıyla birlikte alıcı tarafında genellikle MIMO sinyal çözümü

gerekliliği ortaya çıkar [22]. Bu teknik, iletişim hızını artırabilir ve sistemde daha iyi bir performans elde edilmesine yardımcı olabilir.

SD tekniğinin aksine, SMP, LED'lerden bağımsız semboller gönderdiği için alıcı tarafında MIMO sinyal çözümü gerektirir. Kanal matrisinin pseudo-tersi, $\mathbf{H}^\dagger$, alıcıda MIMO sinyal çözümü sağlar. Bu durumda, l 'inci LED'den alınan sinyalin SNR'ı (3.12) gibi hesaplanır;

$$\Gamma_{l,SMP} = \frac{\Gamma}{\left(\sum_{r=1}^{N_r} \tilde{h}_{tr}^2\right)}, \quad (3.12)$$

$\tilde{h}_{tr}$, $\mathbf{H}^\dagger$ 'in t 'inci satırının ve r 'inci sütununun katsayısıdır. $N_r \times N_t$ boyutunda ve DCO-OFDM sinyalleşmesi ile bir SMP sisteminin ulaşılabilir hızı (3.13) ile elde edilir [23];

$$R_{SMP} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N_t} (1 + \Gamma_{l,SMP}). \quad (3.13)$$

Kanal matrisinin korelasyonu nedeniyle, kanal matrisi SMP kapasitesini ciddi şekilde etkiler.

3.3 Kullanıcı Merkezli MIMO Teknikleri

Geleneksel MIMO teknikleri, örneğin SD ve SMP gibi yöntemlerde, iletim modu her zaman sabit ve kullanıcının kanal koşullarından bağımsızdır. Ancak, kullanıcıların farklı mekânsal konumlarındaki değişen kanal koşulları dikkate alındığında, MIMO sisteminin iletim modunu kullanıcı-odaklı bir şekilde tasarlamak mümkün olabilir. Bu yaklaşım, geleneksel MIMO-VLC sistemlerinin ulaşılabilir hızını artırmak için yeni bir çeşitlilik seviyesi olarak görülebilir.

MIMO VLC sistemlerinde, mobil bir kullanıcının iç mekânı boyunca hareket etmesi, değişen kanal korelasyonlarını beraberinde getirir. Kanal korelasyonlarındaki değişikliklere bağlı olarak, MIMO sistemi güçlü sinyal yollarını seçerek daha yüksek kapasite elde edebilir. SD ve SMP'nin birlikte kullanılması veya aralarında geçiş yapılması ise MIMO VLC için daha etkin bir çözüm sunar. Bu uyarlanabilir yapı, kullanıcının konumuna bağlı olarak kanal korelasyonunun değişmesiyle birlikte kullanıcı merkezli bir iletişim sağlar [22].

3.3.1 SD/SMP anahtarlama tekniği

SD/SMP anahtarlama, kullanıcı-merkezli bir MIMO tekniğidir. Bu teknikte, MIMO modu dinamik olarak SD ve SMP arasında değiştirilir. SD modunda tüm LED'ler aynı veri akışını iletirken, SMP modunda farklı LED'ler farklı veri akışlarını iletiyor. Bu geçiş dinamiği, daha yüksek bir hız elde etmek için kullanılır.

Bu teknik, iç mekân VLC sistemlerindeki kullanıcı deneyimini geliştirmek için önemli bir rol oynar. Özellikle, kullanıcıların çeşitli mekânsal konumlarındaki değişen kanal koşulları göz önünde bulundurularak, SD ve SMP modları arasında geçiş yapmak, iletişim hızını artırır ve kullanıcılara daha iyi bir deneyim sunar. Sonuç olarak, SD/SMP geçişli MIMO-VLC sisteminin ulaşılabilir hızı (3.14) ile hesaplanır;

$$R_{SD/SMP} = \begin{cases} R_{SD}, & \text{eğer } R_{SD} \geq R_{SMP} \\ R_{SMP}, & \text{eğer } R_{SD} < R_{SMP} \end{cases}. \quad (3.14)$$

3.3.2 Uyarlanabilir SMP tekniği

Geleneksel SMP'de, tüm LED'ler, kullanıcıların mekansal konumlarına bakılmaksızın sinyal iletmek için etkinleştirilir. Ancak, kullanıcıların mekânsal konumlarından yararlanarak yeni bir çeşitlilik derecesi oluşturularak, iç mekân VLC sistemlerinde ulaşılabilir hızı artırmak için kullanıcı-merkezli aSMP tekniği [22]'de önerilmiştir. aSMP'de, yalnızca bir LED alt kümesi bağımsız veri akışlarını iletmek için etkinleştirilirken, diğerleri sadece aydınlatma amacıyla kullanılmıştır. Bu şekilde, sistem daha verimli bir şekilde kullanılır ve ulaşılabilir hız artar. Aktive edilen LED sayısını N_k olarak kabul edelim, bu değer N_t 'den küçük veya eşit olmalıdır. Bu durumda, karşılık gelen kanal matrisi (3.15) gibi tanımlanır;

$$\mathbf{A}_{N_r \times N_k} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_k}] = [\lambda_{11} \ \lambda_{1N_k} : \ddots : \lambda_{Nr1} \ \dots \ \lambda_{NrN_k}]. \quad (3.15)$$

Ardından, l 'inci aktif LED'den alınan sinyalin SNR değerı (3.16) ile hesaplanır;

$$\Gamma_{l,aSMP} = \frac{\Gamma}{\left(\sum_{r=1}^{N_r} \tilde{\lambda}_{tr}^2\right)}. \quad (3.16)$$

$\tilde{\lambda}_{tr}$, $\mathbf{\Lambda}^\dagger$ 'in t 'inci satırı ve r 'inci sütunundaki katsayıdır. Bu, $\mathbf{\Lambda}$ 'in pseudo-tersidir. Denklem (3.7) kullanılarak, aSMP sisteminin ulaşılabilir hızı (3.17) ile verilir:

$$R_{aSMP} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N_k} (1 + \Gamma_{l,aSMP}). \quad (3.17)$$

aSMP uygulamasının temel amacı, MIMO VLC sisteminin ulaşılabilir hızını artıran sinyal iletimini sağlayan LED'lerin belirli bir alt kümesini seçmektir. Bu LED alt kümesi seçiminin ayrıntılı bir prosedürü, [22]'de açıklanmıştır.

3.3.3 SD-aSMP tekniği

SD-aSMP, aSMP'den farklı olarak, iletim için devre dışı bırakılan LED'lerin kullanılmasını içerir. Bu, kaynak kullanımını artırarak aSMP'de göz ardı edilen LED'lerin iletişim için kullanılmasını sağlar. Bu tekniğin temel amacı, ek çeşitlilik kazancı elde ederek gürültünün kuvvetlendirilmesini azaltmaktır. Bu durum, iletilen sinyalin alınan gücünü artırır ve böylece iletişim kalitesini iyileştirir. Bu durumda, N_k LED'ler farklı semboller iletimi için kullanılır ve z . LED kullanıcıdan en uzak LED'dir. Bu durumda, bu N_k LED'ler için kanal matrisi (3.18) ile belirtilebilir;

$$\mathbf{\Lambda}_{N_r \times N_k} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_z, \dots, \lambda_{N_k}]. \quad (3.18)$$

Diğer yandan, $(N_t - N_k)$ tane LED, z . LED ile aynı sembolü iletmek için kullanılır ve SD-aSMP için elde edilen kanal matrisi (3.19) gibi ifade edilebilir;

$$\mathbf{W}_{N_r \times N_k} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_z, \dots, \mathbf{w}_{N_k}], \quad (3.19)$$

burada, $i = 1, 2, \dots, N_k$ ve $\mathbf{w}_z$ hariç olmak üzere, $\mathbf{w}_i = \lambda_i$ dir. $\mathbf{w}_z = \lambda_z + \sum_{j=N_k+1}^{N_t} \lambda_j$ olarak tanımlanmıştır. Bundan sonra, l 'inci aktif LED'den gelen sinyalin SNR değeri (3.20) ile hesaplanır [22];

$$\Gamma_{l,SD-aSMP} = \frac{\Gamma}{\left(\sum_{r=1}^{N_r} \tilde{w}_{tr}^2\right)}, \quad (3.20)$$

$\tilde{w}_{tr}$, $\mathbf{W}^T$ 'in t 'inci satırı ve r 'inci sütunundaki katsayıdır ve bu, $\mathbf{W}$ 'nin pseudo-tersidir. (3.7) denklemi kullanılarak SD-aSMP sisteminin ulaşılabilir hızı (3.21) gibi elde edilir;

$$R_{SD-aSMP} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{N_k} (1 + \Gamma_{l,SD-aSMP}). \quad (3.21)$$

N_k değeri, kanal matrisi $\mathbf{H}$ dikkate alınarak belirlenir. Son olarak, SD-aSMP'de optimal LED alt kümesi seçiminin prosedürü referans [22]'de verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tezde kullanıcı merkezli MIMO-VLC iletim tekniklerinin tüm bina içi ortamlarda ADR ve GADR alıcı yapıları için performansları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. İletim tekniklerinin adil bir şekilde karşılaştırılması için verici SNR değeri dikkate alınarak ulaşılabilir veri hızları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar geleneksel düzlemsel alıcı ile karşılaştırılmıştır. LED dizilerinin sayısının ve yükselme açısının performanslar üzerindeki etkisi farklı senaryolar üzerinden değerlendirilmiştir.

SD, SMP, SD/SMP anahtarlama, aSMP ve SD-aSMP gibi çeşitli MIMO teknikleri kullanılarak farklı LED sayıları için kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Ayrıca, ADR ve GADR yapıları karşılaştırılarak geleneksel ve kullanıcı merkezli MIMO teknikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Odanın çeyrek bölümünde, farklı pozisyonlardaki SNR değerlerine göre performanslar belirlenmiştir. Analitik ve benzetim sonuçları ayrı ayrı hesaplanmış ve birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür. Ayrıca, farklı MIMO şemaları için iç mekandaki veri hızlarının nasıl değiştiğini anlamak amacıyla, tüm odadaki sonuçlar elde edilmiş ve CDF grafikleri oluşturulmuştur.

Ana benzetim parametreleri Çizelge 4.1'de listelenmiştir. Her LED'in yarım güç yarı açısı 70° 'dir. Optik filtre kazancı 0.9'dur. Optik merceklerin kırılma indisi ve yarı açısı FOV'si sırasıyla 1.5 ve 70° 'dir. Her PD'nin duyarlılığı $0.53 \text{ A}/\sqrt{\text{W}}$ ve aktif alanı 1 cm^2 'dir. Modülasyon bant genişliği 20 MHz olarak ayarlanmıştır ve gürültü PSD değeri $10^{-22} \text{ A}^2/\text{Hz}$. olarak belirlenmiştir. OFDM modülasyonu için, ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) ve hızlı Fourier dönüşümü (FFT) boyutları 128'dir.

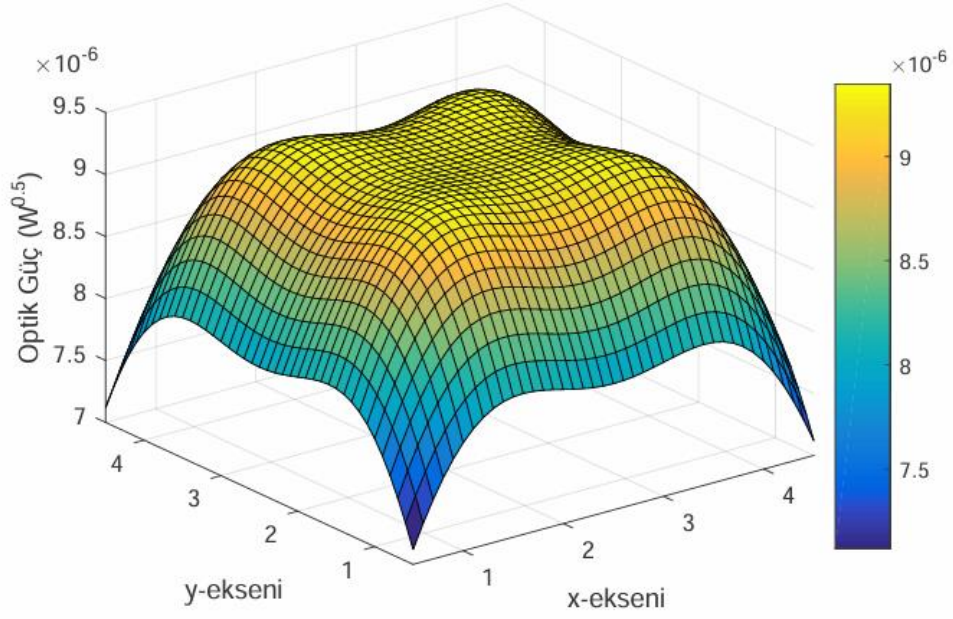
Çizelge 4.1. Benzetim parametreleri.

Parametreler	Değerler
Odanın uzunluğu (x)	5m
Odanın genişliği (y)	5m
Odanın yüksekliği (z)	3m
Verici sayısı (N_t)	4, 5, 8, 9, 12, 16
Alicı sayısı (N_r)	5, 6, 9, 10, 13, 17

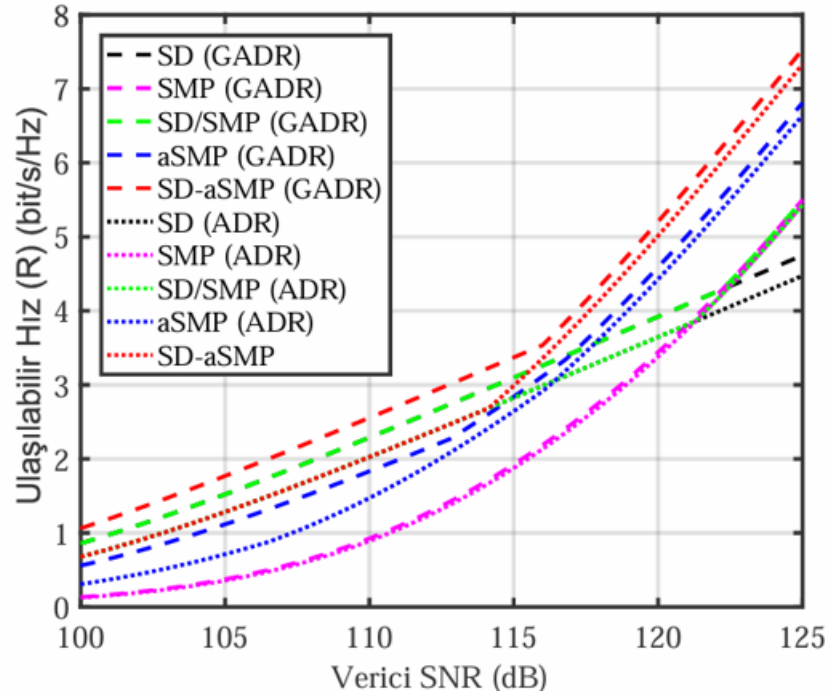
Çizelge 4.1 (devam). Benzetim parametreleri

Parametreler	Değerler
LED'lerin yükselme açısı	-90°
LED'lerin yatay açısı	0°
LED'in yarım güç yarı açısı (ψ)	70°
Optik filtre kazancı G (γ)	0,9
Optik merceğin kırılma indisi	1,5
Optik merceğin yarı açısı FOV'si	70°
Alıcı düzleminin yüksekliği	0,85 m
PD'nin tepki yeteneği	$0.53 \text{ A}/\sqrt{W}$
PD'nin aktif alanı	1 cm^2
PD'lerin yatay açısı (α)	$180^\circ/(N_r - 1)$
PD'lerin yükselme açısı (θ)	$30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$
Modülasyon bant genişliği	20 MHz
Gürültü güç spektral yoğunluğu	$10^{-22} \text{ A}^2/\text{Hz}$
IFFT/FFT boyutu	128
Modülasyon	BPSK

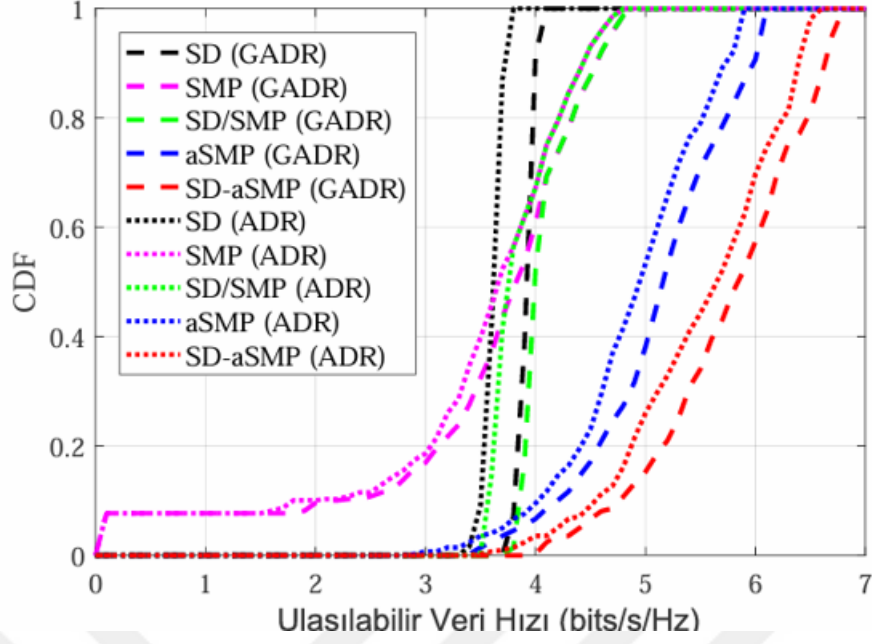
Benzetimlerde, $N_r \times N_t$ MIMO-VLC sistemini ve $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ boyutlarındaki bir iç mekân ortamı dikkate alınmıştır. LED'ler tavana normalleri tabana dik olacak şekilde monte edilmiştir ve ADR veya GADR kullanan kullanıcı, 0,85 m yükseklikteki alıcı düzleminde konumlandırılmıştır. $N_t = 4$ için, LED'lerin x-y konumları {1-1; 1-4; 4-1; 4-4} şeklinde belirlendiğinde odanın merkezinde yer alan ADR ve GADR alıcılar için elde edilen oda içerisindeki güç dağılımı, ulaşılabilir hız ve CDF grafikleri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Burada alıcıların yükselme ve dönme açıları 45° olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1. PD5 kullanılarak elde edilen oda içerisindeki optik güç dağılımı (Her bir LED dizisinin çıkış gücü 1W kabul edilmiştir).



Şekil 4.2. Geleneksel MIMO ve UC-MIMO tekniklerinin verici SNR'ye göre ulaşılabilir veri hızları.



Şekil 4.3. Geleneksel MIMO ve UC-MIMO iletim teknikleri için oda içerisindeki ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği (SNR=120 dB).

Şekil 4.1'de GADR'nin tepedeki PD'si kullanılarak oda içerisinde elde edilen optik güç dağılımı çizdirilmiştir. Her bir LED dizisinin çıkış gücü 1W olarak ayarlanmıştır. Optik güç elektriksel gücün kareköküne eşit olduğu için birim olarak $\sqrt{W}$ kullanılmıştır.

Şekil 4.2'de alıcının (x, y, z) konumu (1.5, 0.7, 0.85) olarak seçilmiş, iki farklı alıcı yapısı için geleneksel MIMO ve UC-MIMO iletim tekniklerinin performansları incelenmiştir. aSMP ve SD-aSMP teknikleri göz önüne alındığında GADR alıcı performansı ADR performansından yüksektir. Düşük SNR değerleri için performans farkı artmaktadır. Bu artışın temel nedeni düşük SNR bölgelerinde SD performansının yüksek olmasıdır. GADR'de bulunan tepe PD alınan güç miktarını artırmaktadır. SD şeması için fazladan PD kullanımı avantaj sağlamaktadır. Genel olarak bakıldığında en iyi performans GADR alıcı yapısının kullanıldığı SD-aSMP iletim tekniği tarafından elde edilmiştir.

Şekil 4.3'te Geleneksel MIMO ve UC-MIMO iletim teknikleri için oda içerisindeki ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği verilmiştir. Verici tarafta SNR değeri 120 dB seçilmiştir. SMP için veri hızlarının odanın bazı bölgelerinde 3.4 bit/s/Hz değerinin altına düştüğü gözlemlenirken diğer iletim tekniklerini odanın her noktasında bu değerin üzerinde hızlara ulaşmıştır. Oda içerisinde SD-aSMP iletim tekniğinin en

yüksek veri hızlarını sağladığını bu şekilden çıkarmak mümkündür. Alıcılar açısından bakıldığında odanın her noktasında herhangi bir teknik için GADR alıcı yapısı daha yüksek veri hızları sunmuştur.

Uyarlanabilir modülasyonlar ve açısal çeşitlemeli alıcılar için genel bir performans değerlendirmesi için değişen kanallar arası ilinti koşullarının oluşturulması gerekir. Bu durum değişen alıcı konumu ve LED sayıları gibi senaryoların çalışılmasını gerektirir. Kullanılan LED sayısına bağlı olarak LED'lerin pozisyonu değişir. Farklı senaryolar için LED'lerin x-y pozisyonları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. LED'lerin x-y pozisyonları.

N_t	x-y Pozisyonları(m)
4	{1.25-1.25; 1.25-3.75; 3.75-1.25; 3.75-3.75}
5	{1.03-1.03; 3.96-1.03; 2.50-2.50; 1.03-3.96; 3.96-3.96}
8	{0.85-0.85; 4.14-0.85; 2.50-1.29; 1.29-2.50; 3.70-2.50; 2.50-3.70; 0.85-4.14; 4.14-4.14}
9	{0.83-0.83; 2.50-0.83; 4.16-0.83; 0.83-2.50; 2.50-2.50; 4.16-2.50; 0.83-4.16; 2.50-4.16; 4.16-4.16}
12	{0.70-0.70; 3.10-0.70; 1.90-1.46; 4.29-1.46; 0.70-2.12; 3.10-2.12; 1.90-2.87; 4.29-2.87; 0.70-3.54; 3.10-3.54; 1.90-4.29; 4.29-4.29}
16	{0.62-0.62; 1.87-0.62; 3.12-0.62; 4.37-0.62; 0.62-1.87; 1.87-1.87; 3.12-1.87; 4.37-1.87; 0.62-3.12; 1.87-3.12; 3.12-3.12; 4.37-3.12; 0.62-4.37; 1.87-4.37; 3.12-4.37; 4.37-4.37}

MIMO-VLC sisteminin ulaşılabilir veri hızlarını belirlemek için alıcı pozisyonları 1'den 6'ya kadar olan konumlar dikkate alınmıştır. Simetri nedenleriyle odanın yalnızca dörtte biri seçilmiştir; diğer dörtte birlik alanlarda da aynı performans elde edilecektir. Sonuç olarak, Pozisyon 1'den Pozisyon 6'ya kadar olan alıcı x-y pozisyonları sırasıyla Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Alıcının x, y, z pozisyonları.

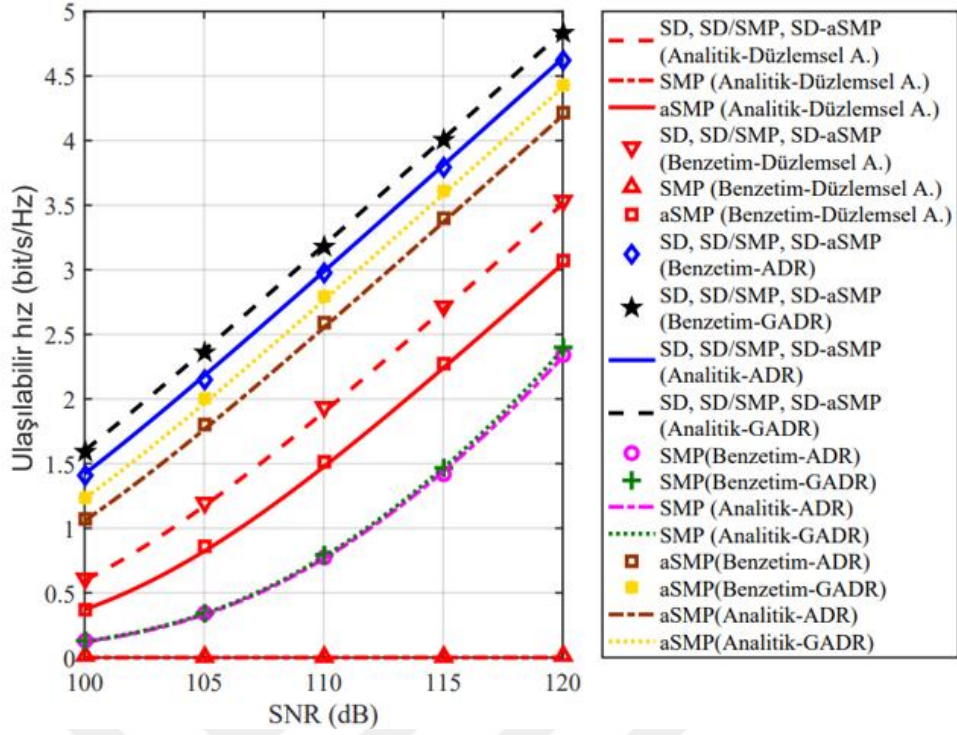
Pozisyon 1	$x_r = 0,5 \ y_r = 0,5 \ z_r = 0,85$
Pozisyon 2	$x_r = 1,5, y_r = 0,5 \ z_r = 0,85$
Pozisyon 3	$x_r = 2,5 \ y_r = 0,5, z_r = 0,85$
Pozisyon 4	$x_r = 1,5 \ y_r = 1,5 \ z_r = 0,85$
Pozisyon 5	$x_r = 2,5 \ y_r = 1,5 \ z_r = 0,85$
Pozisyon 6	$x_r = 2,5 \ y_r = 2,5 \ z_r = 0,85$

4.1 $N_t = 4$ için ADR ve GADR Yapısının MIMO Performanslarının Düzlemsel Alıcı Yapısı ile Karşılaştırılması

Bu bölümde, MIMO sistemlerinde kullanılan tüm iletim tekniklerinin performansları, ADR ve GADR alıcı yapıları üzerinde detaylı bir inceleme yapılmıştır. Bu inceleme sürecinde, sistemde $N_t = 4$ kullanılarak yükselme açısı 35° olarak seçildi. Düzlemsel alıcı için, PD'ler arasındaki mesafe 10 cm olarak varsayıldı. İşaretler ve çizgiler sırasıyla benzetim ve analitik sonuçları temsil etmektedir. Bu parametreler altında, farklı pozisyonlarda SNR-ulaşılabilir hız grafikleri titizlikle incelenmiş ve sonuçlar ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

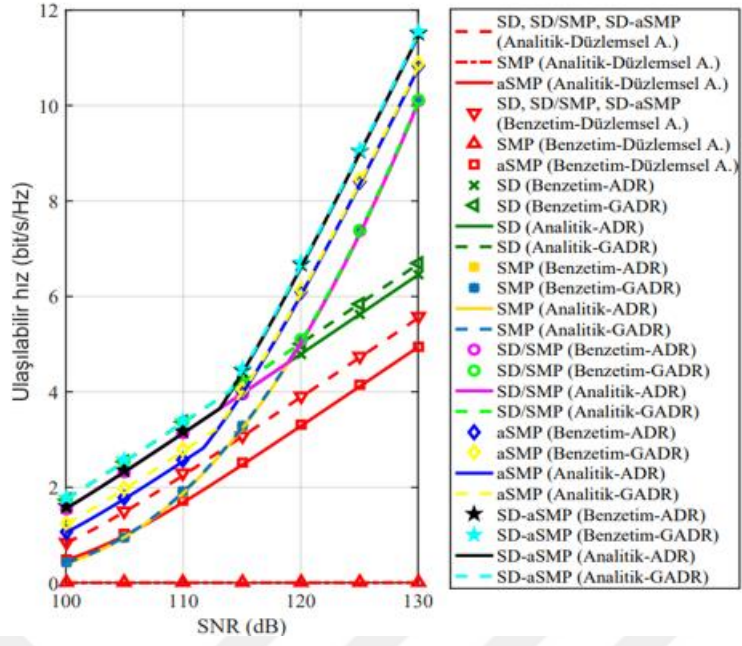
ADR, GADR ve düzlemsel alıcı yapılarının performansı, özellikle de SNR-ulaşılabilir hız grafikleri üzerinden karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Alıcı yapılarının MIMO sistemlerindeki etkinliği ve verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 4.4'te pozisyon 1'e yönelik incelemede, Alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (0.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Düzlemsel alıcı modeline sahip SMP iletim tekniği, 100-120 SNR değerleri arasında etkisiz kalmış ve diğer iletim tekniklerine göre en düşük performansı göstermiştir. En iyi performans, SD, SD/SMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin bir arada kullanıldığı GADR yapısında görülmüştür. GADR yapısı, her zaman ADR ve düzlemsel alıcı yapılarından daha yüksek ulaşılabilir hızlara ulaşmayı başarmıştır.



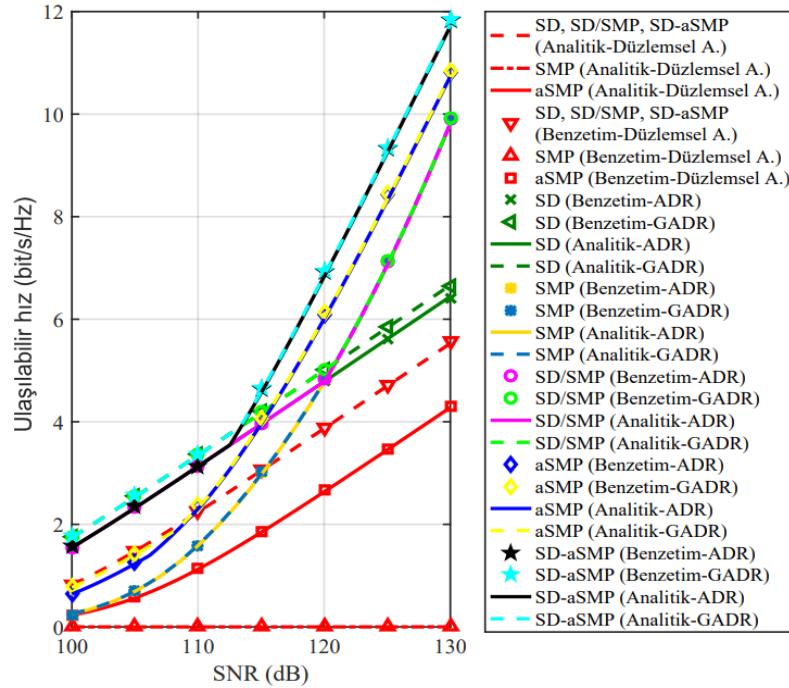
Şekil 4.4. Pozisyon 1'de 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.

Şekil 4.5'te pozisyon 2'ye yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (1.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Düzlemsel alıcı yapısına sahip SMP iletim tekniğinin, 100-130 SNR değerlerinde belirli bir ulaşılabilir hıza sahip olmadığı görülmüştür. 125 SNR değerine kadar, en iyi performansı GADR yapısına sahip SD-aSMP iletim tekniği gösterirken, daha yüksek SNR değerlerinde ADR yapısına sahip SD-aSMP ile eşdeğer ulaşılabilir hıza sahip olmuştur. Benzer şekilde, ADR yapısına sahip aSMP iletim tekniğinde 112 dB SNR değerinde bir kırılma gerçekleşmiş ve daha yüksek SNR değerlerinde GADR yapısına sahip aSMP iletim tekniğiyle aynı ulaşılabilir hıza sahip olduğu gözlemlenmiştir. Düşük SNR değerlerinde ise, GADR yapısının ADR yapısından daha yüksek ulaşılabilir hıza sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.5. Pozisyon 2'de 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC ulaşılabilir hız grafikleri.

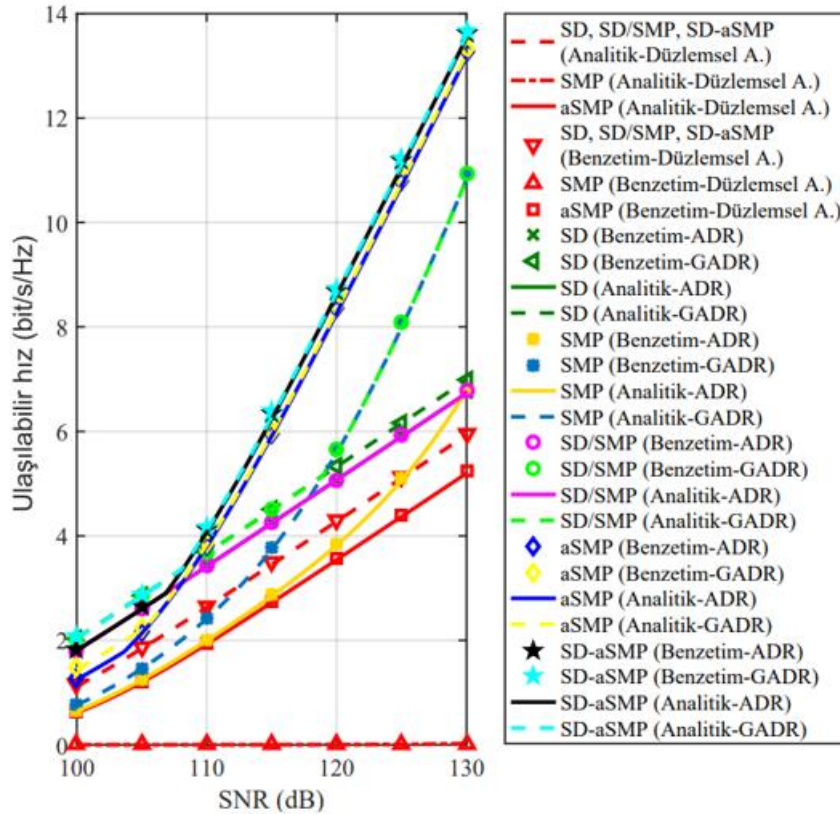
Şekil 4.6'da pozisyon 3'e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Düzlemsel alıcı yapısına sahip SMP iletim tekniğinin 100-130 dB SNR değerlerinde çok düşük ulaşılabilir hıza sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.6. Pozisyon 3'te 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC ulaşılabilir hız grafikleri.

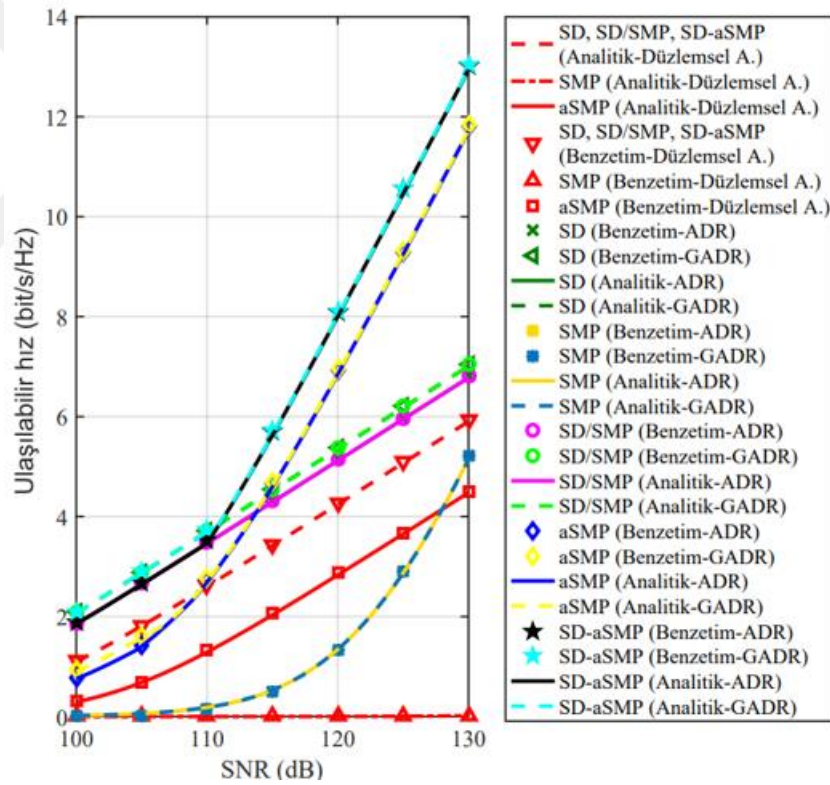
Uyarlanabilir modülasyonlar incelendiğinde 114 dB SNR değerine kadar en iyi performansı GADR ile SD-aSMP iletim tekniği göstermiştir. Yüksek SNR değerlerinde ADR ile GADR eşdeğer ulaşılabilir hıza sahip olmuştur. Düşük SNR değerlerinde ise GADR yapısının ADR yapısından daha yüksek ulaşılabilir hıza sahip olduğu belirlenmiştir. ADR ve GADR yapısına sahip SMP tekniği eşdeğer performans göstermiş ve 125 SNR değerinden sonra performansında iyileşme görülmüştür.

Şekil 4.7’de pozisyon 4’e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (1.5, 1.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Düzlemsel alıcı yapısına sahip SMP iletim tekniğinin 100-130 SNR değerlerinde belirli bir ulaşılabilir hıza sahip olmadığı görülmüştür. 107 SNR değerine kadar en iyi performansı GADR yapısına sahip SD-aSMP iletim tekniği gösterirken, daha yüksek SNR değerlerinde ADR yapısına sahip SD-aSMP ile eşdeğer ulaşılabilir hıza sahip olmuştur. 105 SNR değerinde ise, ADR ve GADR yapısına sahip aSMP iletim teknikleri eşdeğer ulaşılabilir hızlara sahip olup performanslarında iyileşme görülmektedir.



Şekil 4.7. Pozisyon 4'te 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.

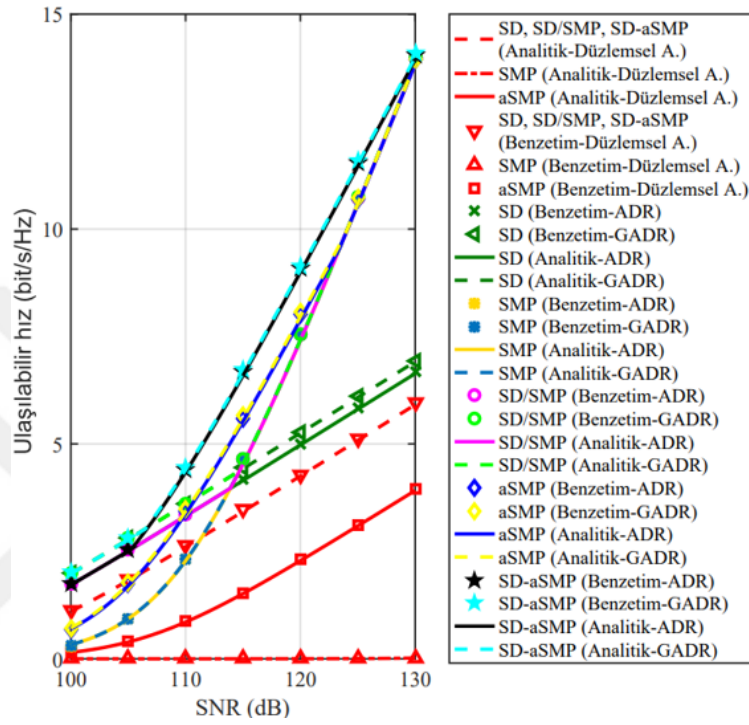
Şekil 4.8’de pozisyon 5’e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 1.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçlar uyumlu olarak gözlemlenmiştir. Düzlemsel alıcı yapısına sahip SMP iletim tekniğinin 100-130 SNR değerleri arasında belirli bir ulaşılabilir hıza sahip olmadığı görülmüştür. 110 SNR değerine kadar en iyi performansı, GADR yapısına sahip SD-aSMP iletim tekniği sergilerken, daha yüksek SNR değerlerinde ADR yapısına sahip SD-aSMP ile eşdeğer ulaşılabilir hıza sahip olmuştur. Ayrıca, 110 SNR değerinde ADR ve GADR yapısına sahip aSMP iletim teknikleri eşdeğer ulaşılabilir hızlara sahip olup, performanslarında iyileşme gözlenmiştir. ADR ve GADR yapılarına sahip SMP iletim tekniği, eşdeğer ulaşılabilir hıza sahip olup, 128 SNR değerinden sonra düzlemsel alıcı yapısına sahip aSMP iletim tekniğinden daha iyi performans göstermeye başladığı grafik üzerinde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8. Pozisyon 5'te 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.

Şekil 4.9’da pozisyon 6’ya yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 2.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçlar uyumlu olarak gözlemlenmiştir. GADR, düşük SNR bölgelerinde hala avantajlıdır, ancak kırılma noktası Pozisyon 6’da 115 dB’den 105 dB’ye düşer. Düzlemsel alıcı yapısına sahip SMP iletim tekniğinin 100-130 SNR değerleri arasında belirli bir ulaşılabilir hıza sahip

olmadığı görülmüştür. 105 SNR değerine kadar en iyi performansı GADR yapısına sahip SD-aSMP iletim tekniği gösterirken daha yüksek SNR değerlerinde ADR yapısına sahip SD-aSMP iletim tekniği ile eşdeğer bir performans göstermektedir. Genel olarak incelendiğinde düzlemsel alıcı yapısına sahip iletim teknikleri ADR ve GADR yapısından daha düşük performans göstermiştir.



Şekil 4.9. Pozisyon 6’da 4x4 ve 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hız grafikleri.

Grafiklerde görüldüğü üzere, benzetimler analitik sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir. GADR, düşük SNR bölgelerinde ADR’ye göre avantaj sağlarken, yüksek SNR bölgelerinde benzer performans sergiler. Burada, alıcının tepesindeki PD’nin çeşitlilik kazancı etkili olmaktadır. Çoğullama kazancının baskın olduğu yüksek SNR bölgesinde, GADR ve ADR performansları birbirine yaklaşır. GADR ile SD-aSMP şeması, düşük ve yüksek SNR bölgeleri için tüm diğer şemalardan daha iyi performans gösterir. Hibrit bir modülasyon olarak SD-aSMP, düşük SNR bölgesinde çeşitlilik kazancından, yüksek SNR bölgesinde çoğullama kazancından yararlanır. Kanal korelasyonunun azalması, SMP varyasyonlarının performansını artırdığından, SD-aSMP, aSMP, SMP ve SD/SMP’nin ulaşılabilir hızları, özellikle ADR ve GADR için, yüksek SNR bölgesinde diğerlerinden önemli ölçüde farklıdır. Düzlemsel alıcı ile SMP en kötü performansa sahiptir.

4.2 $N_t = 8$ ve $N_t = 12$ için GADR ile SD, SMP, aSMP, SD-aSMP İletim Tekniklerinin SNR-Ulaşılabilir Hız Grafiği

Bu bölümde, MIMO sistemlerinde kullanılan çeşitli teknikler ve bu tekniklerin farklı LED sayıları ($N_t = 8$ ve $N_t = 12$) ile performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. GADR ile MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hızları gösterilmektedir. İşaretler ve çizgiler sırasıyla benzetim ve analitik bulguları göstermektedir. İnceleme sürecinde, SD, SMP, a-SMP ve SD-aSMP MIMO teknikleri kullanılarak GADR yapısı üzerinde SNR-ulaşılabilir hız grafikleri karşılaştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu analizlerde yükselme açısının sabit olarak 45° olduğu bir senaryo ele alınmıştır.

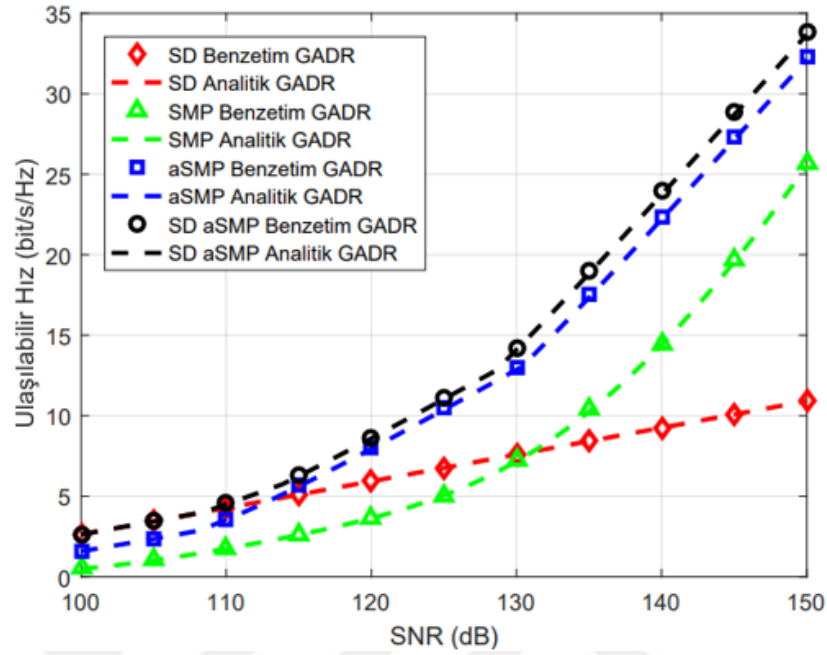
Bu kapsamlı inceleme sürecinde elde edilen bulgulara ek olarak, MIMO sistemlerindeki LED sayısının sistem performansına etkisi üzerinde durulmuştur. Özellikle, farklı LED sayılarına sahip sistemlerin veri iletim hızları ve kapasiteleri arasındaki ilişki incelenerek, optimum LED konfigürasyonunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra, GADR yapısının kullanımının MIMO sistemlerindeki performansı nasıl etkilediği de ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Sonuç olarak, bu bölümde yapılan incelemeler ve elde edilen sonuçlar, MIMO sistemlerinin optimize edilmesi ve verimliliğinin artırılması adına önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu bilgiler, gelecekteki MIMO-VLC sistemlerinin tasarımında ve geliştirilmesinde kullanılabilir.

4.2.1 $N_t = 8$ için SD, SMP, aSMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin SNR-ulaşılabilir hız grafikleri

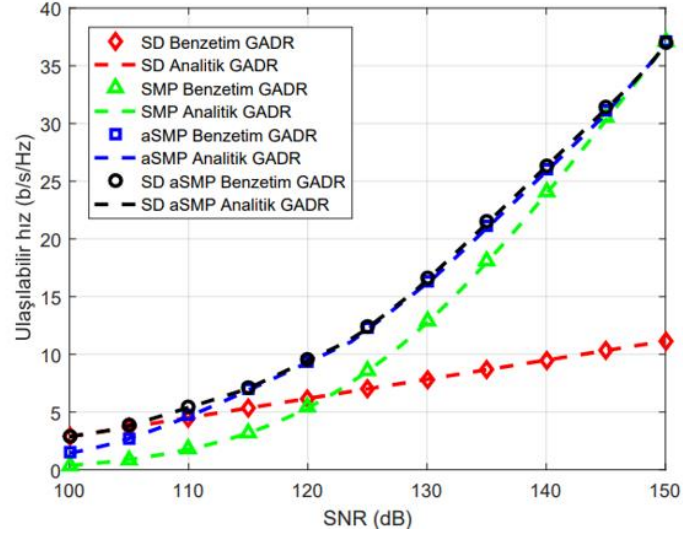
Şekil 4.10'da pozisyon 1'e yönelik incelemede, Alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (0.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel MIMO performansını olumsuz etkileyen zayıf sinyal yolları, uyarlanabilir MIMO şemalarında aynı sinyalin gönderilmesiyle birleştirilir. Bu özellik, performansın iyileşmesine yol açar. SD tekniğinin 130 dB'ye kadar olan değer aralığında SMP iletim tekniğinden daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, SD iletim tekniğinin düşük SNR koşullarında daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır. SD ve SD-aSMP, 110 dB'ye kadar olan düşük SNR bölgesinde aynı performansı gösterirken, bu değerden sonra performans farkı SD-aSMP lehine

üstel bir şekilde artmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, SD-aSMP ve aSMP iletim teknikleri diğer iletim tekniklerine göre daha iyi performans göstermiştir.



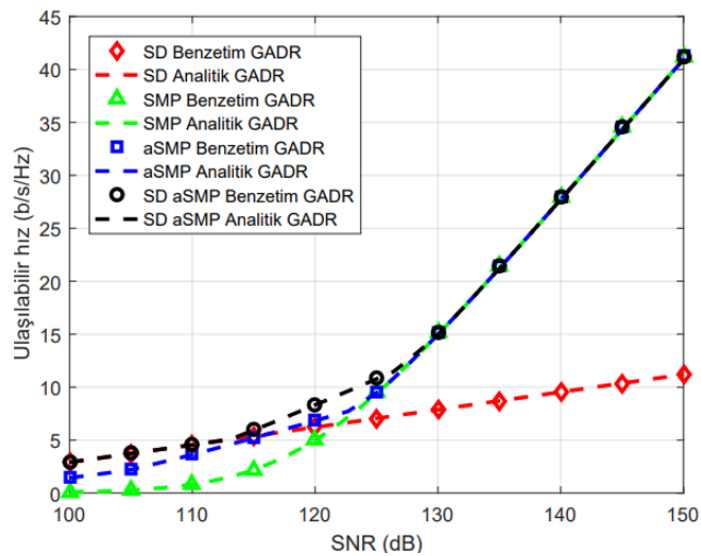
Şekil 4.10. Pozisyon 1'deki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.11'de Pozisyon 2'ye yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (1.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. 110 SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, 120 SNR değerinden sonra SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans sağlamış ve 146 SNR değerinde aSMP ve SD-aSMP iletim teknikleriyle eşdeğer performansa ulaşmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, SD-aSMP ve aSMP iletim teknikleri diğer iletim tekniklerine göre daha üstün performans göstermiştir.



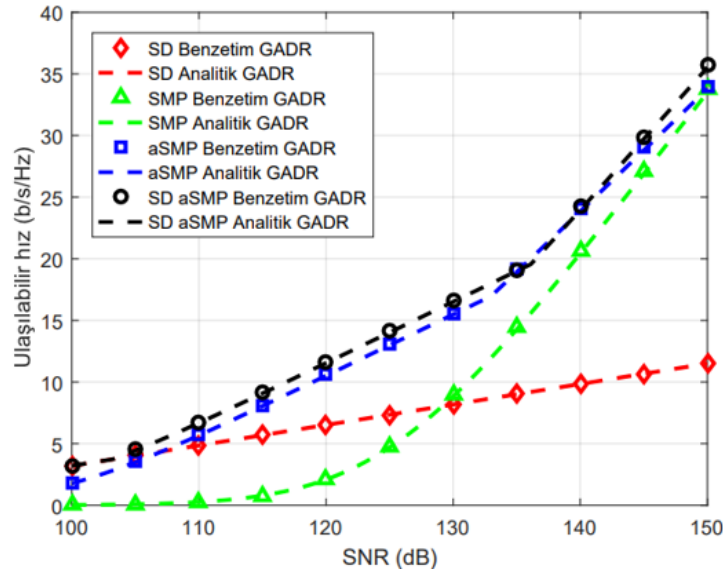
Şekil 4.11. Pozisyon 2'deki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.12'de pozisyon 3'e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. 120 SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Diğer üç iletim tekniğinin ulaşılabilir hızları birbirine yakın durumdadır. 122 dB SNR değerinde SMP iletim tekniğinin performansı SD iletim tekniğinden daha iyi olarak görülmüştür. 128 dB SNR ve daha yüksek SNR değerlerinde ise SMP, aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin ulaşılabilir hızlarının aynı olduğu grafik üzerinden açıkça görülmektedir.



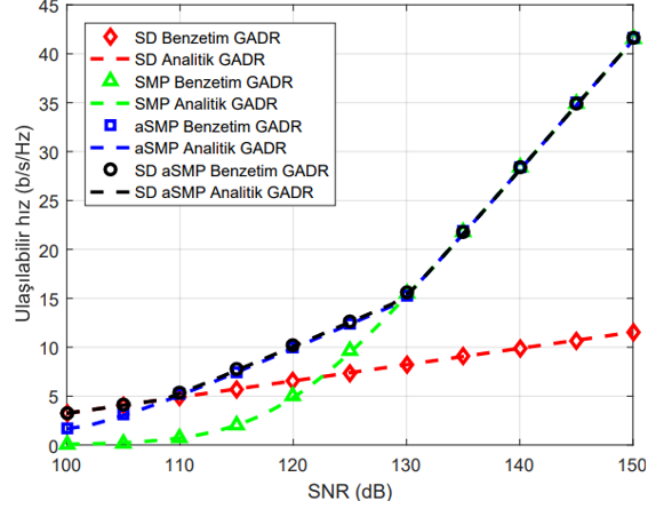
Şekil 4.12. Pozisyon 3'teki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.13'te pozisyon 4'e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (1.5, 1.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. 140 dB SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. 130 dB SNR değerinde SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans göstermiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, SD-aSMP ve aSMP iletim teknikleri diğer iletim tekniklerine göre daha iyi performans göstermiştir.



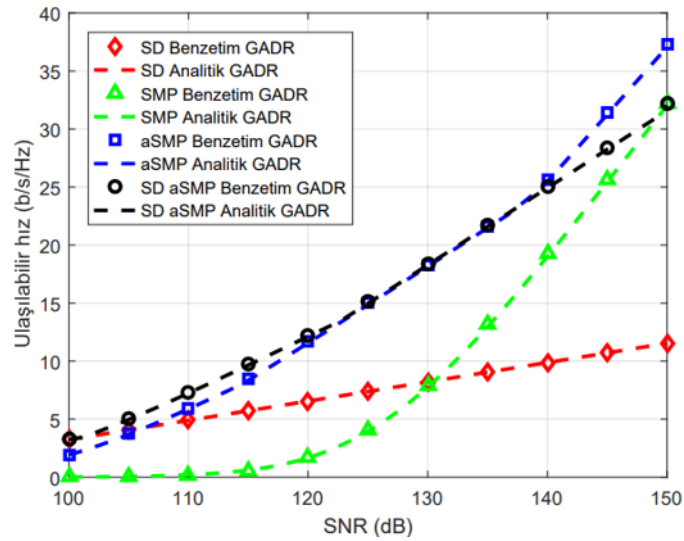
Şekil 4.13. Pozisyon 4'teki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.14'te pozisyon 5'e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 1.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçlar uyumlu olarak gözlemlenmiştir. 122 dB SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak daha yüksek SNR değerlerinde SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans göstermiştir. Özellikle 110 dB SNR değerinde aSMP iletim tekniği, SD-aSMP iletim tekniğinden daha yüksek performans sağlarken, daha yüksek SNR değerlerinde eşdeğer ulaşılabilir hızlarda performans göstermektedir. 130 dB SNR ve daha yüksek değerlerde ise SMP iletim tekniği, aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin ulaşılabilir hızlarına eşdeğer bir performans sergilemiştir.



Şekil 4.14. Pozisyon 5'teki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.15'te pozisyon 6'ya yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 2.5) olarak belirlendi. 130 dB SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak 130 dB SNR değerinden daha yüksek SNR değerleri için SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans sağlamıştır. 124 dB SNR ve daha düşük SNR değerlerinde SD-aSMP iletim tekniği en iyi performansı sağlamıştır. 140 dB SNR değeri sonrasında ise aSMP en iyi performansı gösteren iletim tekniğidir. Genel olarak değerlendirildiğinde, SD-aSMP ve aSMP iletim teknikleri diğer iletim tekniklerine göre daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 4.15. Pozisyon 6'daki GADR ile elde edilebilen 8x9 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Genel olarak $N_t = 8$ olarak değerlendirdiğimiz senaryoda SD, SMP, aSMP ve SD-aSMP MIMO tekniklerini 6 farklı pozisyon üzerinde incelendi. Elde edilen sonuçlar, benzetim ve analitik verilerin birbirleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Her pozisyonda belirli SNR (Sinyal-Gürültü Oranı) değerlerinde hangi iletim tekniğin daha üstün performans sergilediği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Grafikler, GADR ile 8x9 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir hızını göstermektedir.

SD-aSMP ve aSMP iletim teknikleri, genel olarak en yüksek performansı sağlayan teknik olarak öne çıkmıştır. Düşük SNR koşullarında ve belirli yüksek SNR aralıklarında diğer tekniklere kıyasla SD-aSMP iletim tekniği üstün performans sergilemiştir. Özellikle düşük SNR değerlerinde SD-aSMP tekniğinin en iyi performansı sağladığı gözlemlenmiştir.

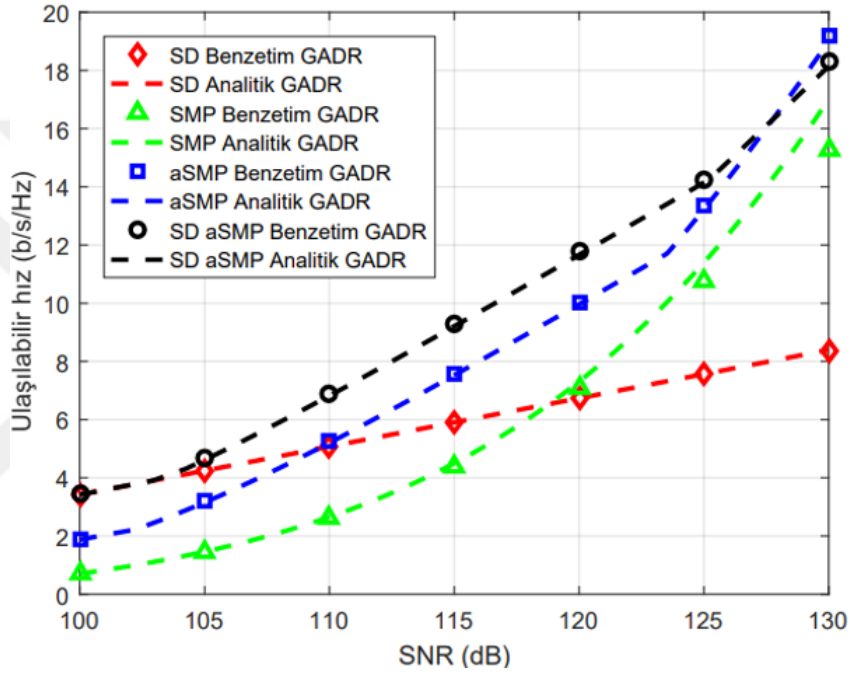
SMP iletim tekniği, belirli SNR aralıklarında diğer tekniklere göre daha düşük performans sergilemekle birlikte, yüksek SNR değerlerine ulaşıldığında performansını artırarak diğer tekniklerle eşdeğer veya daha iyi hale gelmiştir. Özellikle 120 dB SNR ve üzerinde SMP tekniğinin performansının arttığı ve bazı durumlarda SD ve diğer tekniklerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

SD iletim tekniği, düşük SNR koşullarında genellikle daha etkili bulunmuştur. 130 dB'ye kadar olan SNR aralığında SMP tekniğinden daha üstün performans sergilemiş, düşük SNR seviyelerinde SD tekniğinin SMP tekniğinden daha iyi olduğu

Bu sonuçlar, aSMP ve SD-aSMP gibi uyarlanabilir MIMO tekniklerinin, özellikle yüksek SNR koşullarında yüksek hızlı iletişim sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu teknikler, MIMO-VLC sistemlerindeki değişken koşullara adaptasyon yetenekleriyle dikkat çekiyor ve iletişim performansını artırma potansiyeline sahip. Ancak, SD tekniğindeki sabit ulaşılabilir hız değerleri, bu teknik için daha stabil ve öngörülebilir bir performans ortaya koyduğunu gösteriyor. Bu sonuçlar, MIMO-VLC sistemlerinin çeşitli teknikler arasında uygun seçimler yapılmasını gerektiren dinamik ve karmaşık bir yapıya sahip olduğunu vurgulamaktadır.

4.2.2 $N_t = 12$ için SD, SMP, aSMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin SNR-ulaşılabilir hız grafikleri

Şekil 16'da pozisyon 1'e yönelik incelemede, alıcının x - y düzlemindeki pozisyonu (0.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. SD tekniğinin 110 dB'ye kadar olan değer aralığında SMP ve aSMP iletim tekniklerinden daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, SD iletim tekniğinin düşük SNR koşullarında daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

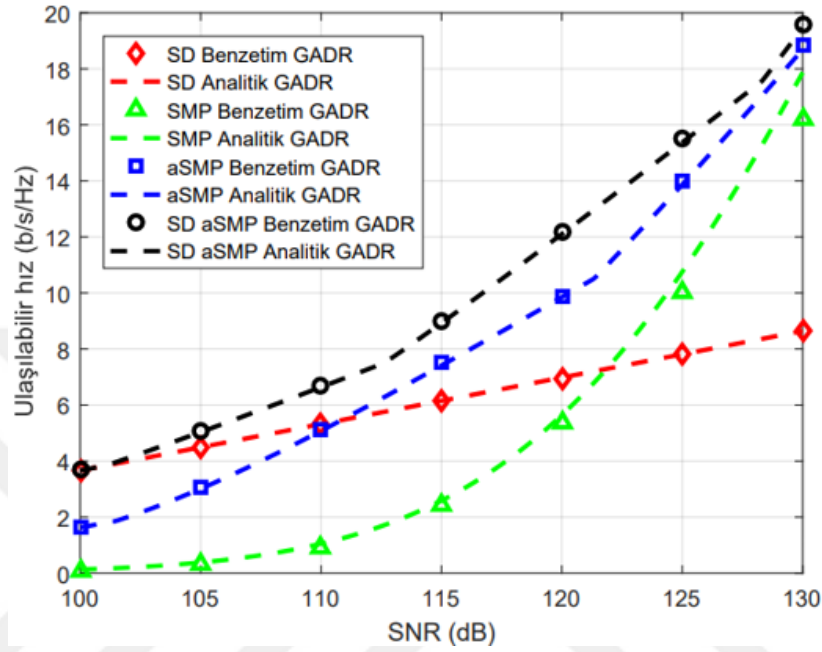


Şekil 4.16. Pozisyon 1'deki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

127 dB SNR değerine kadar en iyi performansı SD-aSMP iletim tekniği gösterirken, daha yüksek SNR değerlerinde aSMP iletim tekniği daha iyi performans göstermiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, SD-aSMP ve aSMP iletim teknikleri diğer iletim tekniklerine göre daha iyi performans göstermiştir.

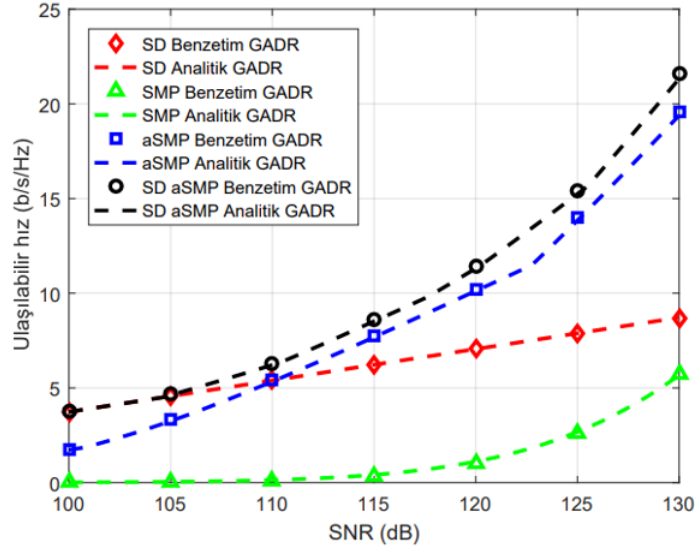
Şekil 4.17'de pozisyon 2'ye yönelik incelemede, alıcının x - y düzlemindeki pozisyonu (1.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. 122 dB SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, 122 dB SNR değerinden

sonra SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans sağlamış ve ulaşılabilir hızı önemli bir değerde artmıştır. Yüksek SNR değelerinde aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin ulaşılabilir hız değeleri birbirlerine yaklaşmıştır. Genel olarak, SD-aSMP iletim tekniğinin en iyi performansı sağladığı görölmektedir.



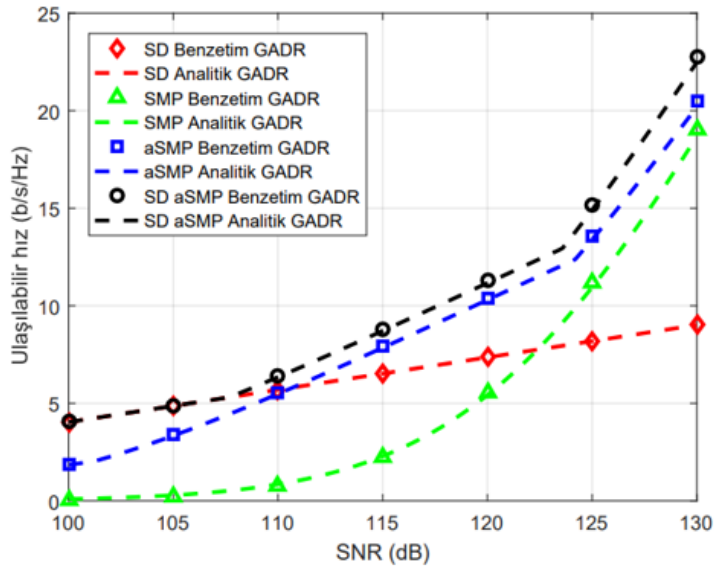
Şekil 4.17. Pozisyon 2'deki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.18'de pozisyon 3'e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 0.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. SMP iletim tekniği en düşük performansı sergilemektedir. 110 dB SNR değeri ve daha yüksek SNR değelerinde aSMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans göstermiştir. Genel olarak incelendiğinde ise SD-aSMP iletim tekniği diğer iletim tekniklerinden daha iyi performans sağlamıştır.



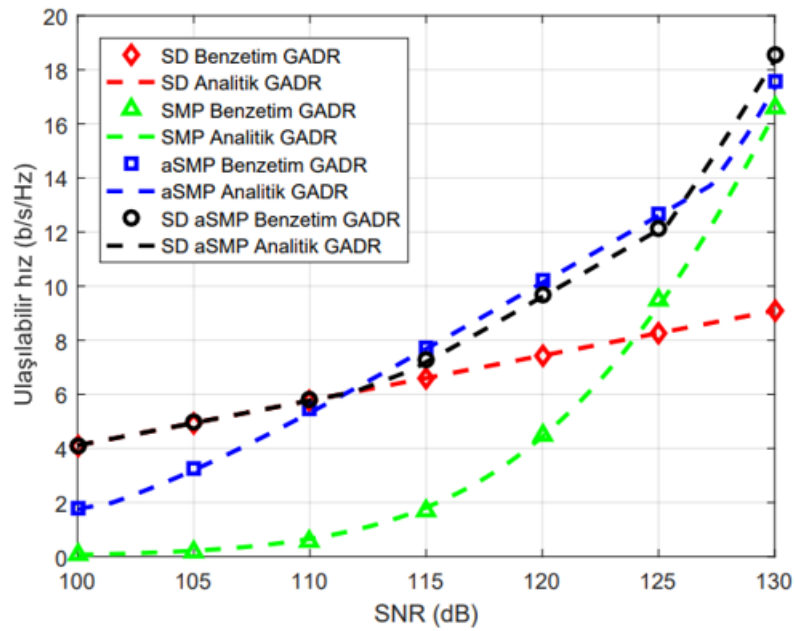
Şekil 4.18. Pozisyon 3'teki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.19'da pozisyon 4'e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (1.5, 1.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. 123 dB SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. 123 dB SNR değerinden daha yüksek SNR değerlerinde SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans göstermiştir. Genel olarak incelendiğinde ise SD-aSMP iletim tekniği diğer iletim tekniklerinden daha iyi performans sağlamıştır.



Şekil 4.19. Pozisyon 4'teki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

Şekil 4.20’de pozisyon 5’e yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 1.5) olarak belirlendi. Benzetim ve analitik sonuçlar uyumlu olarak gözlemlenmiştir. 124 dB SNR değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden önemli bir farkla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak daha yüksek SNR değerlerinde SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans göstermiştir. Korelasyon, SMP ve varyasyonlarını önemli ölçüde etkilediğinden, SNR’nin artması performansta üstel bir artışa neden olur. Öte yandan, SD şeması için yalnızca alınan güç belirleyici faktör olduğundan, SNR’nin artması lineer bir artışa yol açar.

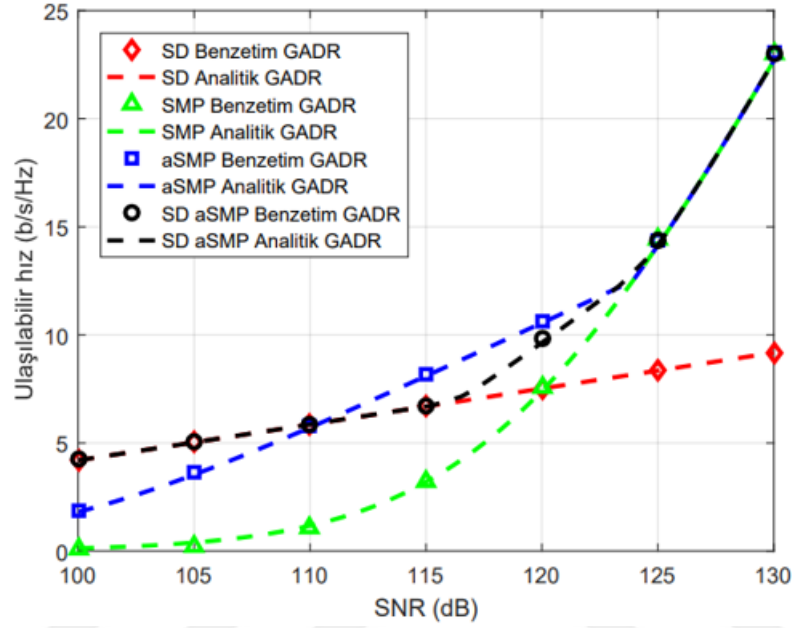


Şekil 4.20. Pozisyon 5’teki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

100 dB ve 110 dB SNR değerleri arasında SD ve SD-aSMP iletim teknikleri aynı ulaşılabilir hıza sahiptir. 112 dB ve 126 dB SNR değeri aralığında en iyi performansı aSMP iletim tekniği göstermiştir. Daha yüksek SNR değerlerinde ise en iyi performansı SD-aSMP iletim tekniğinin gösterdiği grafik üzerinden de görülebilmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, SD-aSMP ve aSMP iletim tekniklerinin diğer iletim tekniklerinden daha iyi performans sağladığı görülmektedir.

Şekil 4.21’de pozisyon 6’ya yönelik incelemede, alıcının x-y düzlemindeki pozisyonu (2.5, 2.5) olarak belirlendi. 100-110 dB SNR değeri aralığında en iyi performansı SD ve SD-aSMP iletim tekniği eşdeğer ulaşılabilir hızlarıyla sağlamıştır. 120 dB SNR

değerine kadar SMP iletim tekniğinin ulaşılabilir hızının diğer iletim tekniklerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak 125 dB SNR değerinden daha yüksek SNR değerleri için SMP iletim tekniği, SD iletim tekniğinden daha iyi performans sağlamıştır. Ayrıca 125 dB SNR ve daha yüksek SNR değerlerinde SMP iletim tekniği aSMP ve SD-aSMP iletim teknikleriyle aynı ulaşılabilir hızlara ulaşmıştır.



Şekil 4.21. Pozisyon 6'daki GADR ile elde edilebilen 12x13 MIMO-VLC şemalarının verimliliği.

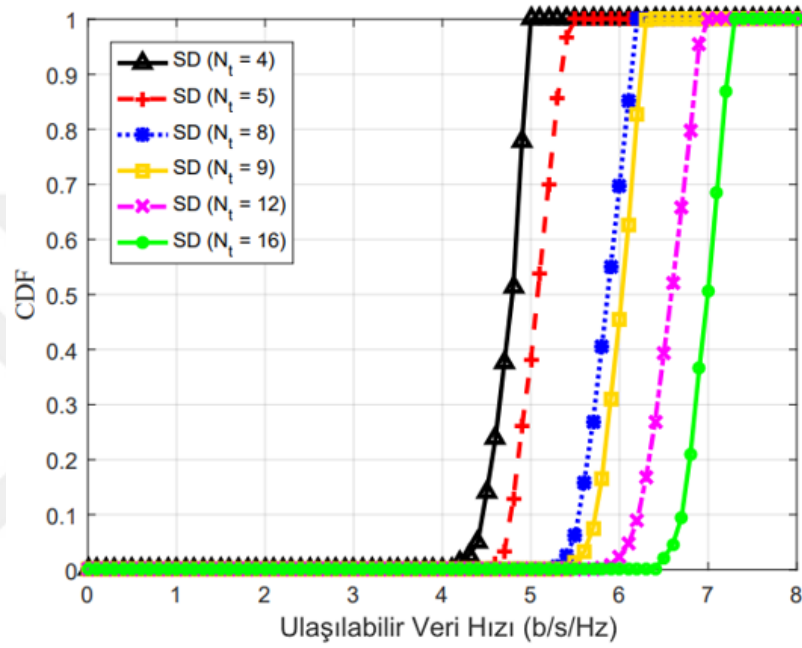
$N_t = 12$ olarak farklı iletim tekniklerinin performanslarının incelenmesi sonucunda, SD-aSMP tekniğinin genel olarak en yüksek performansı sağladığı belirlenmiştir. Düşük SNR koşullarında SD tekniği genellikle daha etkili bulunurken, belirli yüksek SNR aralıklarında aSMP tekniği üstün performans göstermiştir. SMP tekniği ise düşük SNR koşullarında daha düşük performans sergilemesine rağmen, yüksek SNR değerlerinde performansını artırarak diğer tekniklerle eşdeğer veya daha iyi hale gelmiştir.

4.3 Farklı N_t için SD, SMP ve aSMP İletim Tekniklerinin Ulaşılabilir Hız-CDF Grafikleri

Bu bölümde SD, SMP ve aSMP iletim teknikleri farklı LED sayıları ($N_t = 4$, $N_t = 5$, $N_t = 8$, $N_t = 9$, $N_t = 12$ ve $N_t = 16$) ile 30° , 45° ve 60° yükselme açıları ve 120 dB iletim SNR koşulları altında ulaşılabilir hız-CDF grafikleri incelenmiştir.

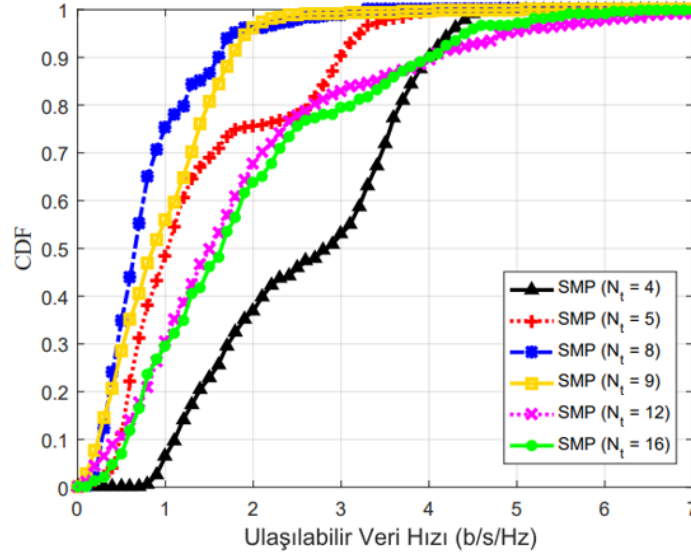
Ulaşılabilir hızlarla ilgili veriler, CDF grafiklerini oluşturmak için odadaki 1849 pozisyonda toplanmıştır. Alıcı ünitesi, duvarlardan 40 cm uzaklıkta olacak şekilde oda içinde hareket ederken, her ölçüm arasında 10 cm boşluk bırakılmıştır.

Şekil 4.22’de 30° yükselme açısına sahip SD iletim tekniği için en iyi performansı $N_t = 16$ iken göstermektedir. LED sayısı arttıkça iletişimin optimize olduğu ve daha yüksek performans sağlandığı görülmektedir.



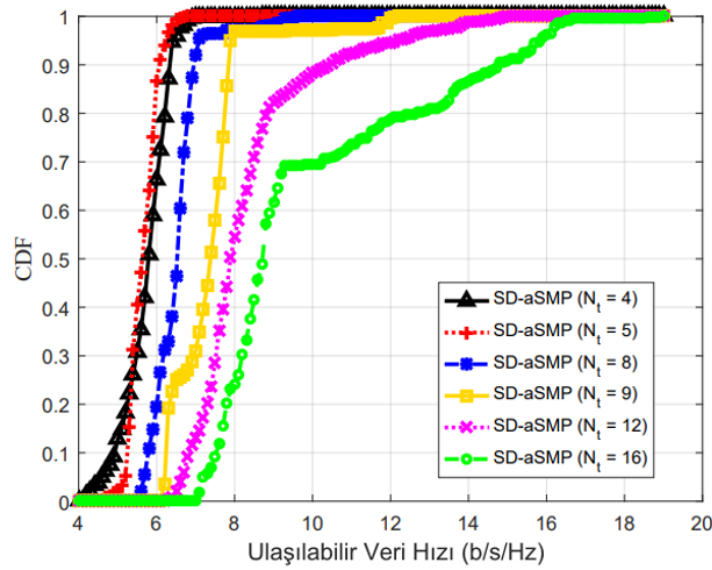
Şekil 4.22. SD iletim tekniğinin 30° yükselme açısı ve farklı sayıda N_t için CDF grafiği.

Şekil 4.23’te gözlemlenen SMP iletim tekniğinde LED sayısının artmasıyla iletişim performansı oda genelinde artarken en iyi performansı 4 adet LED sayısına sahipken göstermektedir.



Şekil 4.23. SMP iletim tekniğinin 30° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

Şekil 4.24'te gözlemlenen SD-aSMP iletim tekniğinde LED sayısının artması iletişim performansını arttırmıştır. 30° yükselme açısıyla SD, SMP ve SD-aSMP tekniklerinin ulaşılabilir veri hızı-CDF grafikleri üzerinde yapılan incelemeler, LED sayısının artmasıyla birlikte odanın genelinde yüksek ulaşılabilir hızlara ulaşıldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, MIMO iletişim sistemlerinde LED sayısının artmasının iletişim performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, $N_t = 16$ iken tüm tekniklerin en iyi performansı sergilediği gözlemlenmiştir.

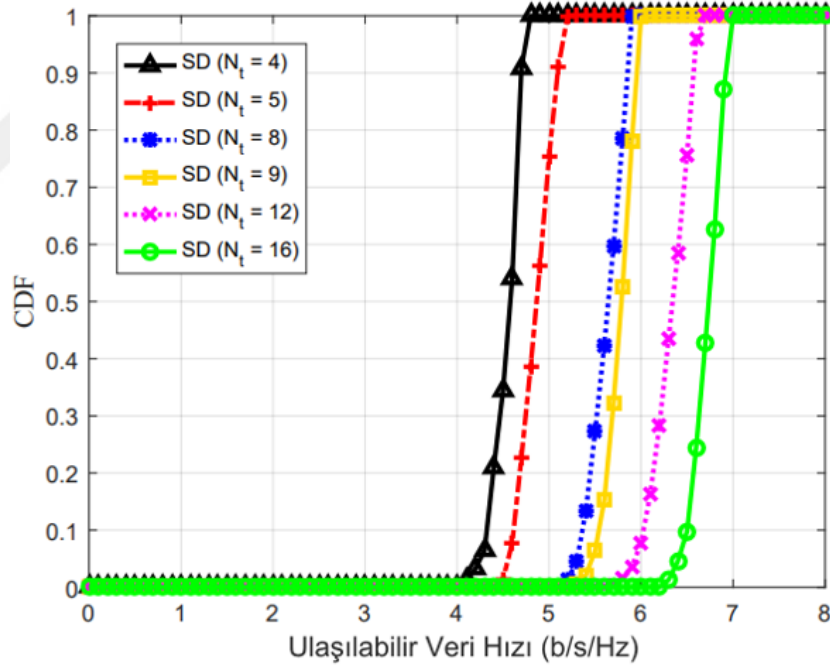


Şekil 4.24. SD-aSMP iletim tekniğinin 30° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

Bu analizlerin yanı sıra, odanın farklı bölgelerindeki ulaşılabilir hızların da dikkate alındığı belirtilmelidir. LED sayısının artmasıyla birlikte, odanın çeşitli bölgelerinde daha dengeli bir ulaşılabilir hız dağılımı sağlandığı görülmüştür. Bu durum, MIMO iletişim sistemlerinin genel kapasitesinin arttığını ve kullanıcı deneyimini iyileştirdiğini göstermektedir.

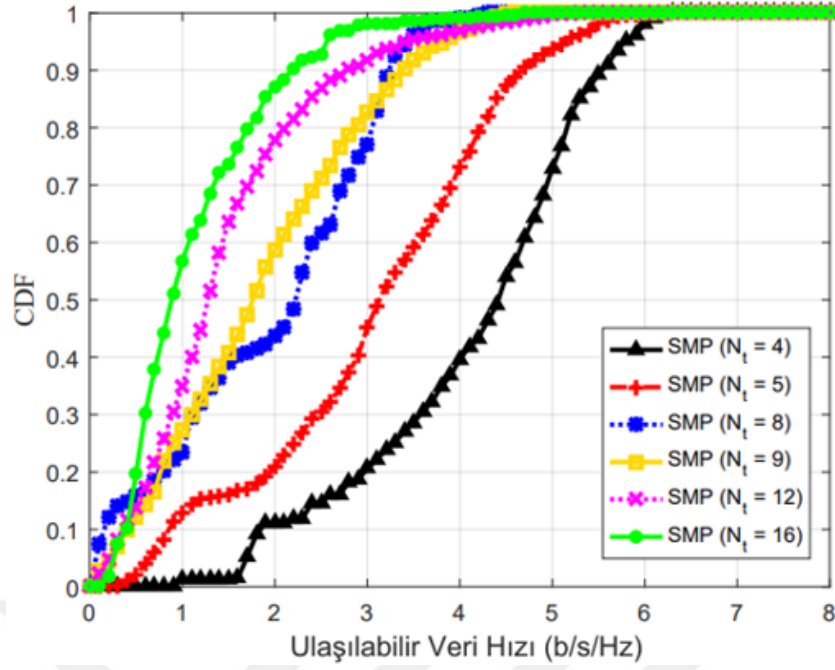
Özellikle, SD-aSMP tekniği incelendiğinde, LED sayısının artmasıyla birlikte ulaşılabilir hızın daha hızlı arttığı görülmüştür. Bu durum, SD-aSMP tekniğinin LED sayısının artışından daha fazla faydalandığını ve geniş alanlarda daha etkili bir iletişim sağladığını ortaya koymaktadır.

Şekil 4.25'te 45° yükselme açısına sahip SD iletim tekniği LED sayısının artmasıyla odanın genelinde iletişim performansının arttığı grafik üzerinden görülmektedir. Odanın genelinde tüm LED sayıları için yüksek optimizasyon sağlanmıştır.



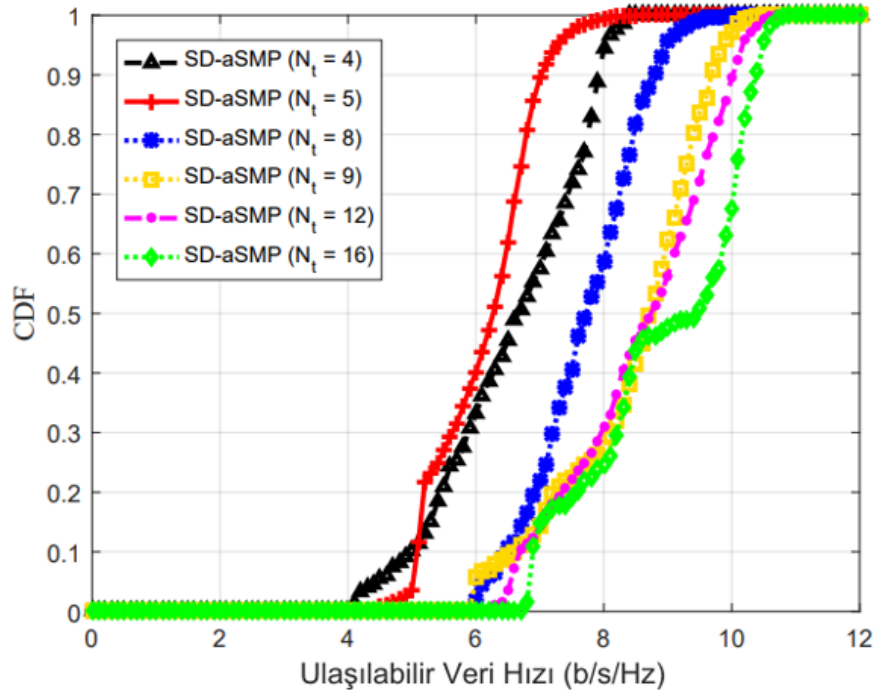
Şekil 4.25. SD iletim tekniğinin 45° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

Şekil 4.26'da LED sayısının artmasıyla ulaşılabilir hızın oda genelinde düşük olup iletişimi olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.26. SMP iletim tekniğinin 45° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

Şekil 4.27’de gözlemlenen SD-aSMP iletim tekniğinde LED sayısının artması iletişim performansını arttırmıştır ve odanın genelinde tüm LED sayıları için yüksek hızlar sağlanmıştır.



Şekil 4.27. SD-aSMP iletim tekniğinin 45° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

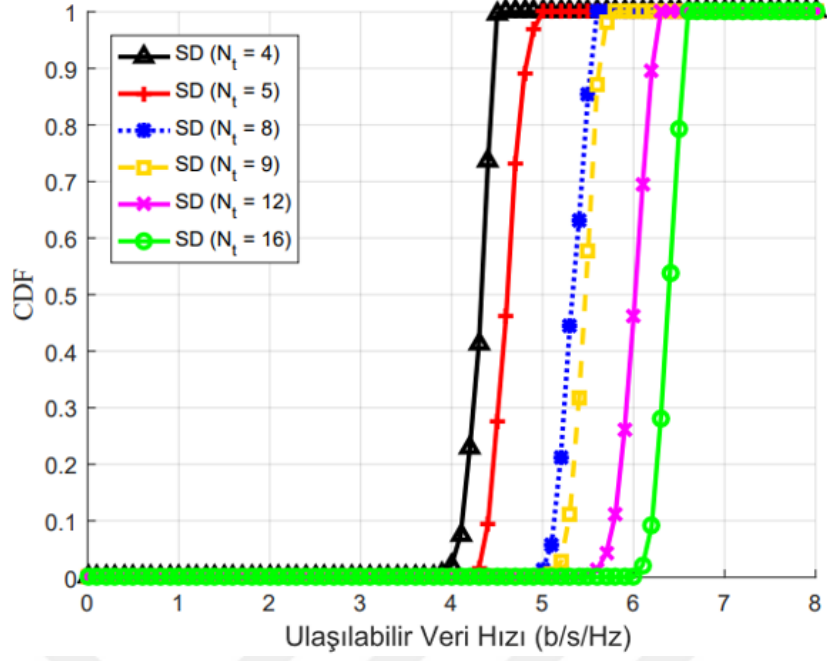
45° yükselme açısıyla SD, SMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin ulaşılabilir veri hızı-CDF grafikleri üzerinde yapılan incelemeler de SMP iletim tekniğinde LED sayısının artması, ulaşılabilir veri hızının azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni, SMP tekniğinin LED sayısının artışına karşı hassas olması ve doğru şekilde yönetilememesi olabilir. Ancak, SD ve SD-aSMP tekniklerinde LED sayısının artması, ulaşılabilir veri hızını önemli ölçüde artırmıştır.

SD tekniği, LED sayısının artmasıyla birlikte daha fazla çeşitlilik ve paralellik sağlayarak iletişim performansını artırır. Bu durum, ulaşılabilir veri hızının LED sayısının artışıyla doğru orantılı olarak yükselmesini sağlar. Aynı şekilde, SD-aSMP tekniği de benzer şekilde LED sayısının artışından faydalanır ve iletişim kapasitesini artırır.

SMP tekniğinde yaşanan ulaşılabilir veri hızının azalması ise genellikle artan LED sayısı ile beraber gelen artan girişim ve kanal korelasyonundan kaynaklanır. Bu durum, SMP tekniğinin LED sayısının artışına uygun olmadığını ve diğer tekniklere göre daha fazla hassasiyet gösterdiğini göstermektedir.

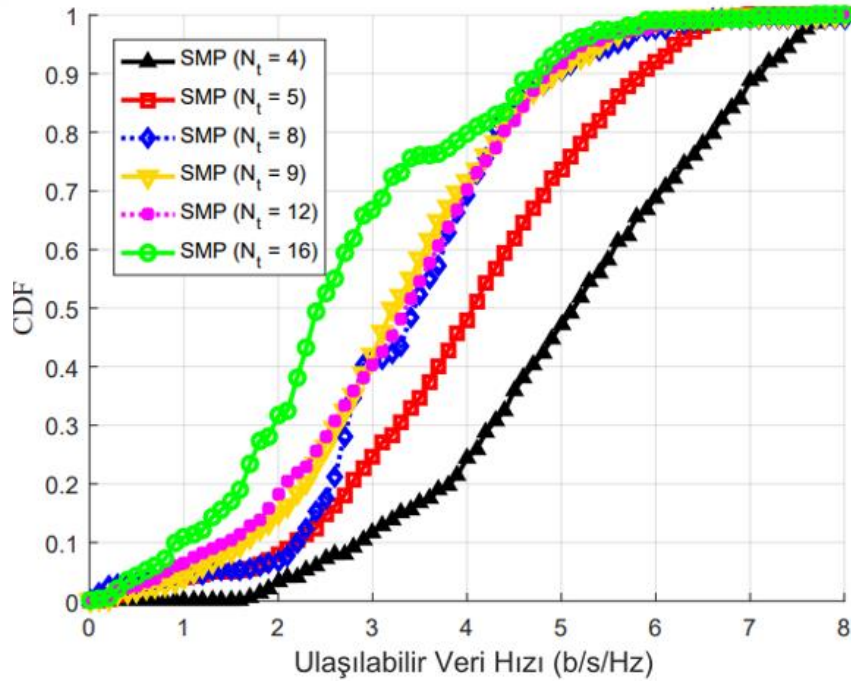
Sonuç olarak, 45° yükselme açısıyla incelenen SD ve SD-aSMP tekniklerinin LED sayısının artışından olumlu etkilendiği ve ulaşılabilir veri hızını artırdığı gözlemlenmiştir. SMP tekniği ise bu koşullarda LED sayısının artışıyla birlikte daha dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gereken bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bilgiler, MIMO-VLC sistemlerinin tasarımında ve optimize edilmesinde önemli bir rehberlik sağlamaktadır.

Şekil 4.28’de ve 60° yükselme açısına sahip SD iletim tekniği için en iyi performansı $N_t = 16$ iken göstermektedir. LED sayısı arttıkça iletişimin optimize olduğu ve daha yüksek performans sağlandığı görülmektedir.



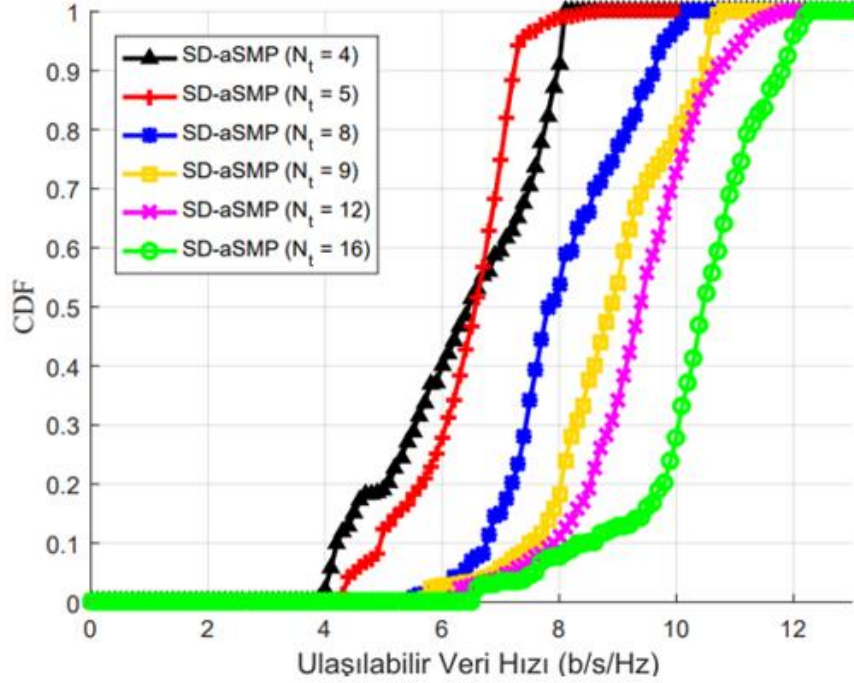
Şekil 4.28. SD iletim tekniğinin 60° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

Şekil 4.29’da yapılan incelemeler sonucu LED sayısının artmasıyla ulaşılabilir hızın da genelinde düşük olup iletişimi olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. En iyi performansı LED sayısının 4 adet olduğu senaryoda göstermiştir.



Şekil 4.29. SMP iletim tekniğinin 60° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

Şekil 4.30’da yapılan incelemelerde SD-aSMP iletim tekniğinde LED sayısının artması iletişim performansını arttırmıştır ve odanın genelinde tüm LED sayıları için yüksek optimizasyon sağlanmıştır.



Şekil 4.30. SMP iletim tekniğinin 60° yükselme açısı ve farklı N_t için CDF grafiği.

Yükselme açısının artması, iletişim kanallarının daha açık ve direkt hale gelmesini sağlar. Bu durum, SD, SMP ve SD-aSMP gibi tekniklerin verimliliğini artırarak iletişim hızını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. LED'lerin yüksek bir yükselme açısına sahip olması, sinyallerin daha etkin bir şekilde iletilmesine ve alınmasına olanak tanımıştır. Bu da iletişim sistemlerinin güvenilirliğini ve hızını artırır.

Ancak, LED sayısının artmasıyla birlikte SMP tekniğinde olumsuz etkiler görülmüştür. Bu durum genellikle artan LED sayısının, iletişim kanallarında artan karışıklığa ve girişim neden olmasıyla açıklanabilir. SMP tekniği, çoklu LED'lerin sinyallerini ayırıştırma yeteneği konusunda bazı zorluklar yaşanır ve bu da iletişim hızında düşüşlere sebep olmuştur.

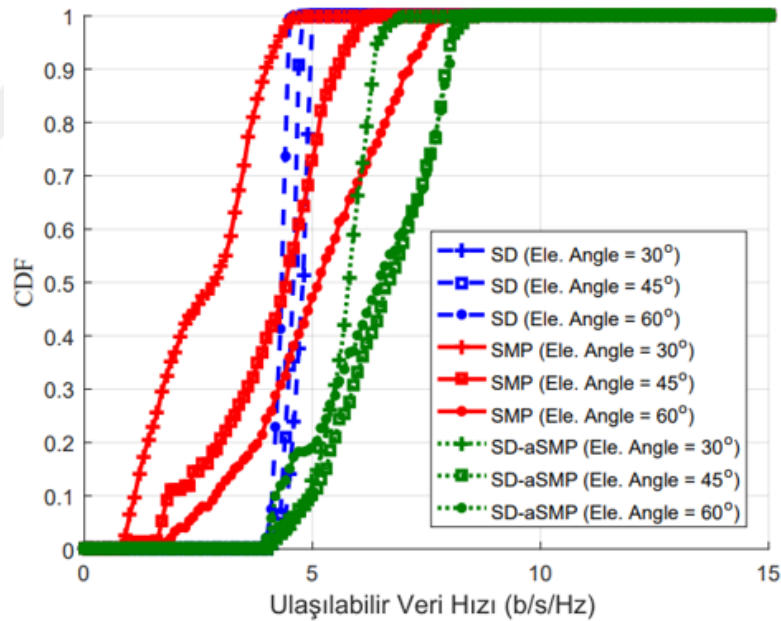
4.4 Farklı Yükselme Açıları İçin SD, SMP ve aSMP İletim Tekniklerinin Ulaşılabilir Hız-CDF Grafikleri

Bu çalışmada, GADR yapısıyla SD, SMP ve aSMP tekniklerinin performansını karşılaştırmak amacıyla, ulaşılabilir hızlarının oda içerisindeki Ulaşılabilir Hız- CDF

grafikleri oluşturulmuştur. Farklı senaryolar altında elde edilebilecek hızların dağılımını incelenmiş, sistem performansının kapsamlı bir analizi yapılmıştır.

Özellikle, farklı LED sayılarının (N_t) ve yükselme açılarının bu teknikler üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar grafiklerle görselleştirilmiştir. Bu analizler, kablosuz iletişim sistemlerinin tasarımında önemli bir rol oynayan hız ve güvenilirlik gibi kritik performans metriklerini optimize etmek için yol gösterici olacaktır.

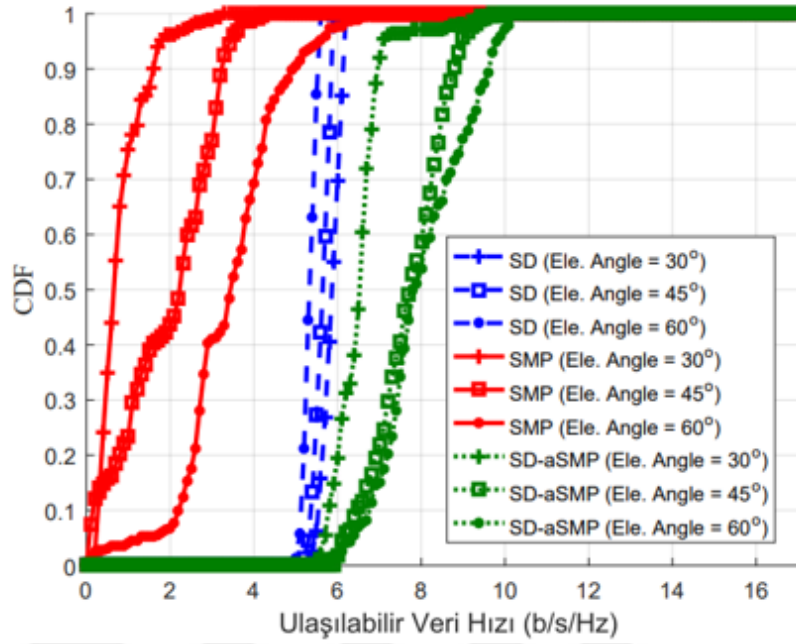
Şekil 4.31’de, $N_t = 5$ için incelendiğinde SD, SMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada SD-aSMP ve SMP iletim tekniklerinin yükselme açılarının artması iletişimin performansını artırırken SD iletim tekniğinde yükselme açısının artması performansı negatif yönde etkilediği grafik üzerinden gözlemlenmiştir. Genel olarak incelendiğinde SD-aSMP iletim tekniği en iyi performansı göstermektedir.



Şekil 4.31. GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.

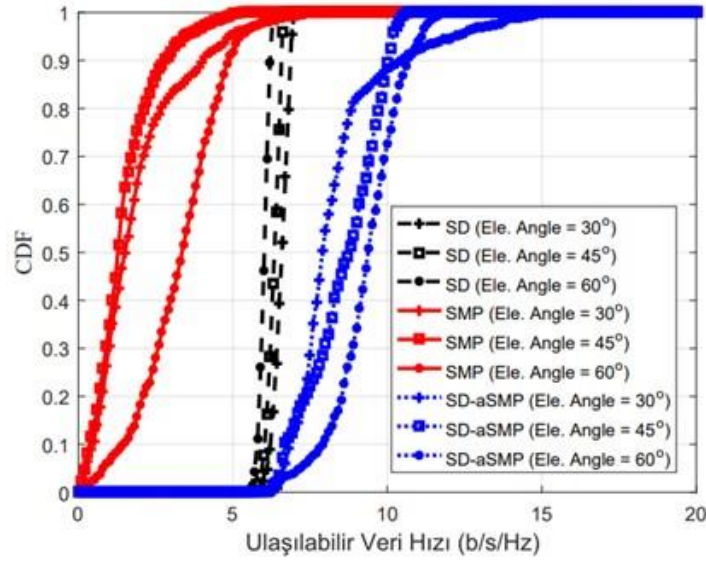
Şekil 4.32’de, $N_t = 9$ için incelendiğinde SD, SMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada SD-aSMP ve SMP iletim tekniklerinde yükselme açısının artması iletişimin performansını artırırken SD iletim tekniğinde yükselme açısının artması performansı negatif yönde etkilediği grafik üzerinden gözlemlenmiştir. Genel olarak incelendiğinde SD-aSMP iletim tekniği en iyi performansı göstermektedir, en düşük performansı ise ulaşılabilir hızın odanın bazı

bölgelerinde ulaşılabilir hızın neredeyse 2 bit/sn/HZ'in altında olduğu SMP iletim tekniği 30° yükselme açısıyla göstermiştir.



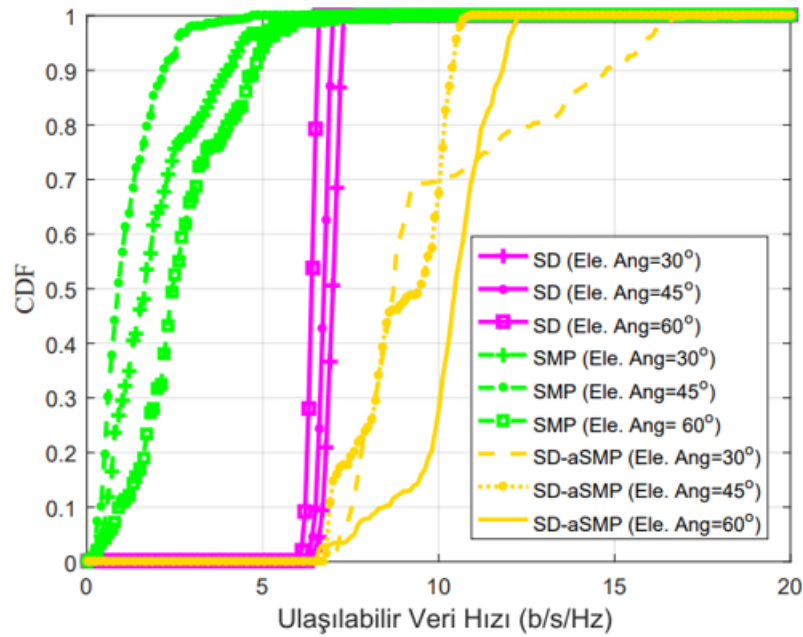
Şekil 4.32. GADR ile 8x9 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.

Şekil 4.33'te $N_t = 12$ için incelendiğinde SD, SMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada SD-aSMP ve SMP iletim tekniklerinde yükselme açısının artması iletişimin performansını artırırken SD iletim tekniğinde yükselme açısının artması performansı negatif yönde etkilediği grafik üzerinden gözlemlenmiştir. Genel olarak incelendiğinde SD-aSMP iletim tekniği en iyi performansı göstermektedir, en düşük performansı ise ulaşılabilir hızın odanın bazı bölgelerinde neredeyse 1 bit/sn/Hz'in altında olduğu SMP iletim tekniği 30° yükselme açısıyla göstermiştir.



Şekil 4.33. GADR ile 12x13 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.

Şekil 4.34'te $N_t = 16$ için SD, SMP, SD-aSMP iletim tekniklerinin performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada SD-aSMP ve SMP iletim tekniklerinde yükselme açısının artması iletişimin performansını artırırken SD iletim tekniğinde yükselme açısının artması performansı negatif yönde etkilediği grafik üzerinden gözlemlenmiştir. Genel olarak incelendiğinde SD-aSMP iletim tekniği 30° yükselme açısı kullanıldığında odanın %25 kısmında en iyi performansı göstermiştir.



Şekil 4.34. GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemaları için ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.

CDF değeri 0.5 olan odanın yarısını ele alırsak, SD şeması için yükselme açısı arttıkça ulaşılabilir hızı azalır. Ancak, SMP için bu tersine döner; yükselme açısı arttıkça ulaşılabilir hızı artar. SD-aSMP durumunda, yükselme açısının 30° 'den 45° 'ye artırılması önemli bir performans artışı sağlar, ancak açısı 45° 'den 60° 'ye artırıldığında CDF değeri 0.5 için anlamlı bir değişiklik olmaz. Ayrıca, odanın %90'ını ele aldığımızda, yükselme açısı arttıkça iyileşme gözlemlenir. Sonuç olarak, artan yükselme açısı toplam alınan gücü azaltır, SNR'yi düşürür ve odanın genelinde SD performansını azaltır. SMP ve SD-aSMP için durum tam tersidir. Yükselme açısının 60° 'ye kadar artırılması, kanal içi korelasyonu azaltarak odanın genelinde performansı artırır. Bu özel durumda, SD-aSMP'nin hibrit yapısı nedeniyle 45° ve 60° yükselme açılarıyla neredeyse aynı performansı sergilediği dikkat çekicidir. Sonuç olarak, en iyi performans, 60° yükselme açısı ile SD-aSMP şeması kullanılarak elde edilir.

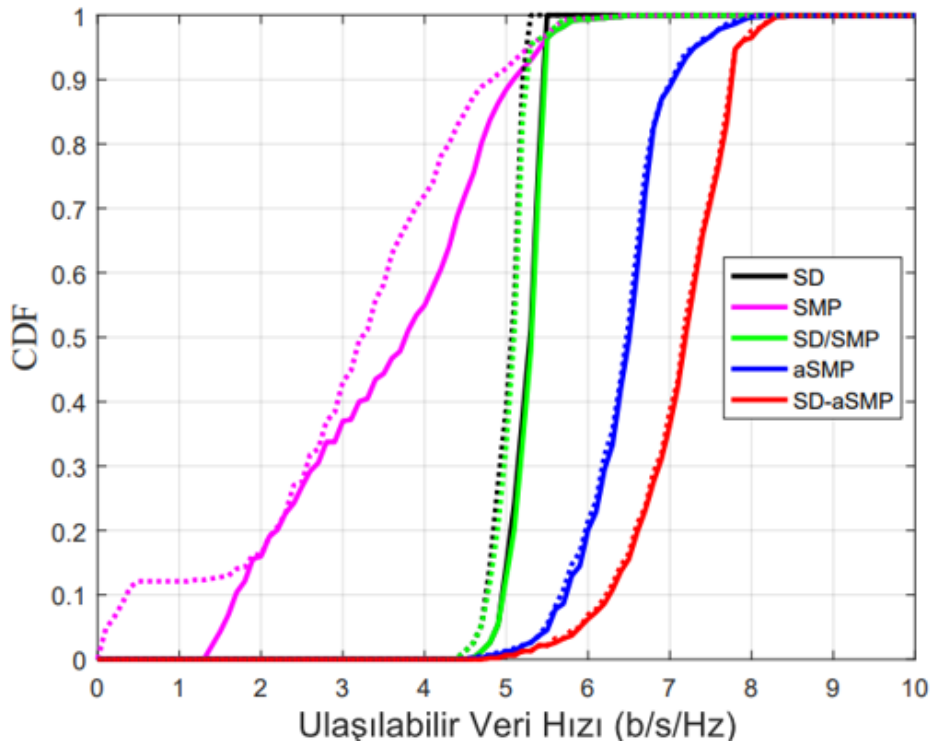
Şekil 4.33'te, tüm oda dikkate alınarak 12x13 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir verimlilik oranlarının CDF'si gösterilmiştir. SMP ve SD-aSMP'nin performansı, odanın genelinde 8x9 MIMO-VLC kurulumuna göre iyileşmiştir, ancak SD performansı neredeyse aynıdır. SMP ve SD-aSMP durumunda, çoğullama, LED sayısı ile doğrusal olarak verimliliği artırır. Ancak, toplam güç sabit ise, LED sayısının artırılması SD performansını iyileştirmez. SMP ve SD-aSMP, alıcıda 60° yükselme açısı ile en iyi performansı elde eder. Bir istisna olarak, alıcıda 30° yükselme açısı ile SD-aSMP, odanın %8'inde en iyi performansı elde eder.

Şekil 4.34'te, alıcıda GADR kullanıldığında 16x17 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir verimlilik oranlarının CDF'si gösterilmektedir. SD-aSMP, alıcının 30° yükselme açısına sahip olduğu odanın %28'inde en iyi performansı elde eder; geri kalan odada ise 60° en iyi sonucu verir. Son olarak, üç farklı LED kurulumu dikkate alındığında, SD'nin SMP'den üstün olduğu ve SD-aSMP'nin tüm yükselme açıları için SD'den üstün olduğu görülmektedir.

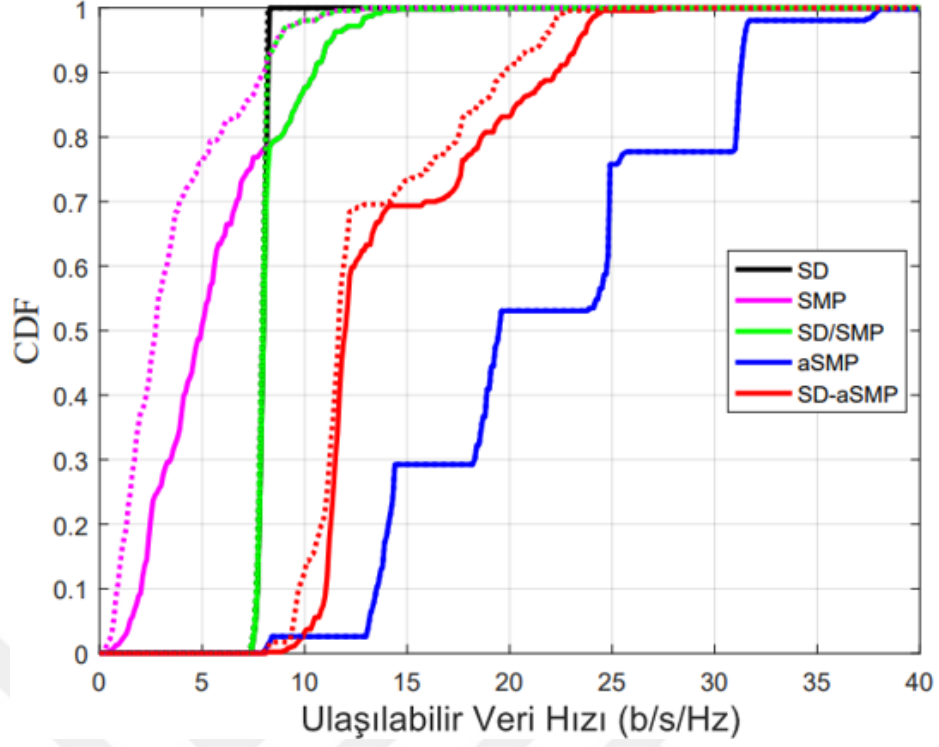
4.5 Farklı N_t ve Yükselme Açıları İçin GADR ve ADR Yapıları ile SD, SMP ve aSMP Tekniklerinin Ulaşılabilir Hız-CDF Grafikleri

Bu çalışmada, GADR ve ADR yapıları kullanılarak SD, SMP, SD/SMP, aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin oda içerisindeki ulaşılabilir hızlarının kümülatif dağılım farkları, farklı N_t sayıları ve farklı yükselme açıları için incelenmiştir.

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 incelendiğinde, 30° yükselme açılarıyla GADR ve ADR yapıları kullanılarak incelenen farklı iletim tekniklerinin ulaşılabilir hızlarının oda içerisindeki kümülatif dağılımları $N_t = 4$ ve $N_t=16$ için karşılaştırılmıştır. Grafiklerde, noktalar ADR'yi temsil ederken çizgiler GADR yapısını temsil etmektedir. Bu analiz sonucunda, aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin $N_t = 16$ için $N_t = 4$ 'ten daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu performans artışı, diğer iletim tekniklerine kıyasla belirgin bir şekilde daha yüksektir.



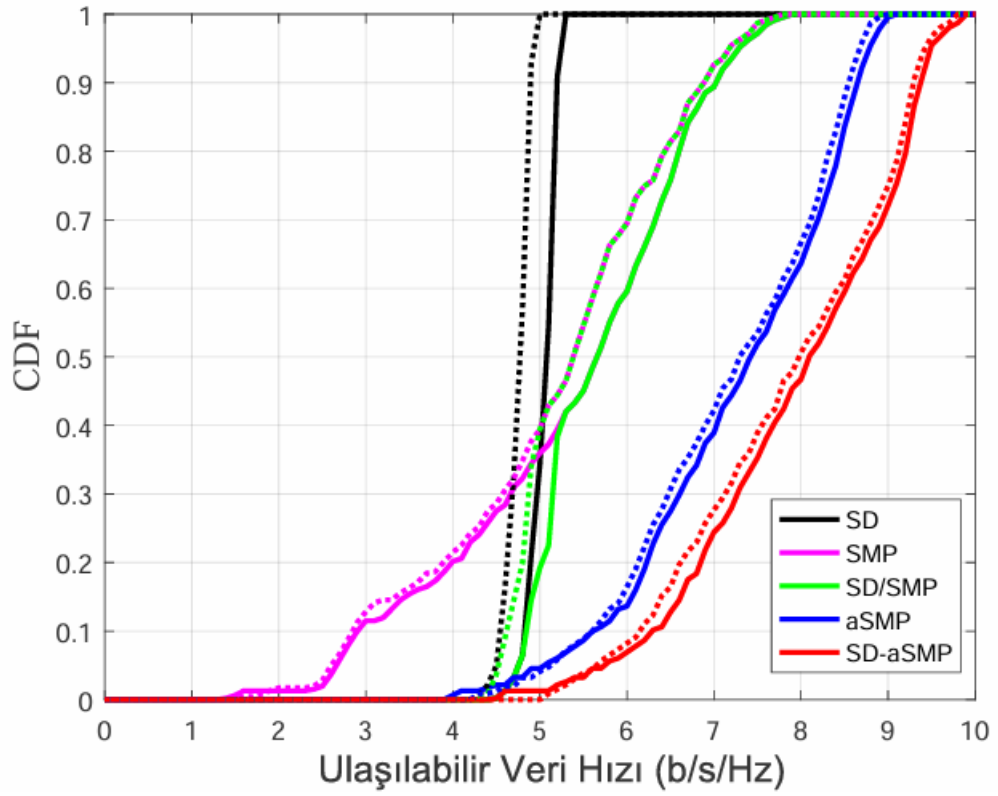
Şekil 4.35. $N_t = 4$ ve 30° yükselme açısında ADR ve GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.



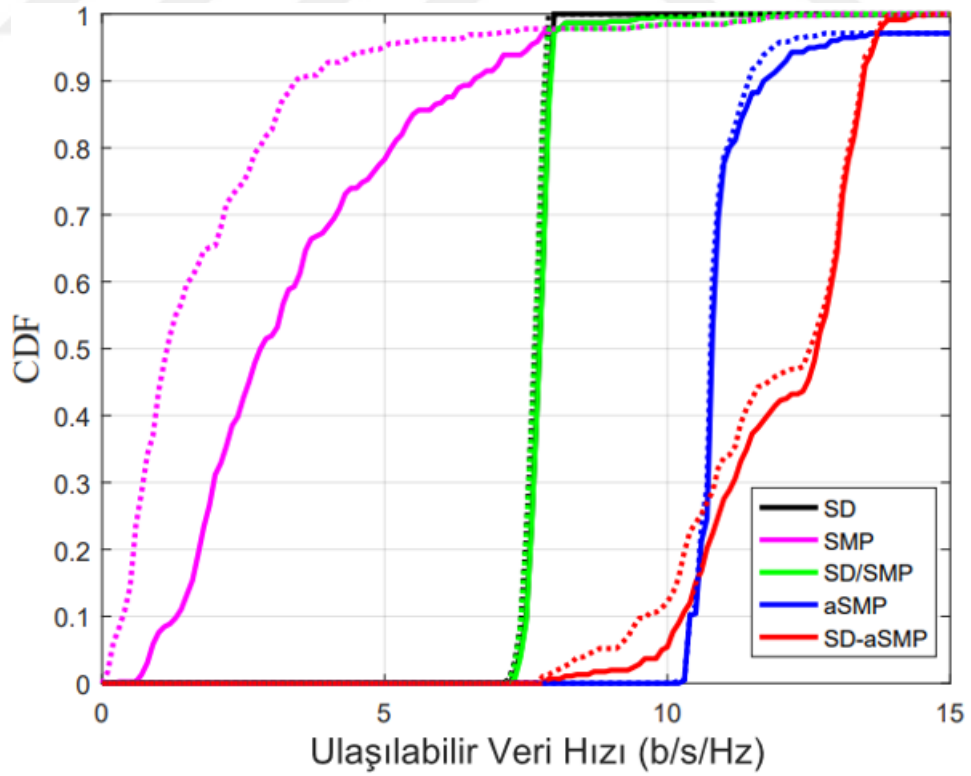
Şekil 4.36. $N_t = 16$ ve 30° yükselme açısında ADR ve GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.

LED sayısının artmasıyla aSMP iletim tekniğinin oda içerisinde SD-aSMP iletim tekniğinden daha iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir. SMP iletim tekniğinin ise SD iletim tekniğinin ulaşılabilir hızına yaklaştığı görülmüştür. Son olarak, GADR yapısının ADR yapısından daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38 incelendiğinde, 45° yükselme açılarıyla GADR ve ADR yapıları kullanılarak incelenen farklı iletim tekniklerinin ulaşılabilir hızlarının oda içerisindeki kümülatif dağılımları $N_t = 4$ ve $N_t = 16$ için karşılaştırılmıştır. Grafiklerde, noktalar ADR'yi temsil ederken çizgiler GADR yapısını temsil etmektedir. Bu analiz sonucunda, aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin $N_t = 16$ için $N_t = 4$ 'ten daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu performans artışı, diğer iletim tekniklerine kıyasla belirgin bir şekilde daha yüksektir. SMP iletim tekniğinde ise LED sayısının artması oda içerisindeki performansını olumsuz etkilemiştir.



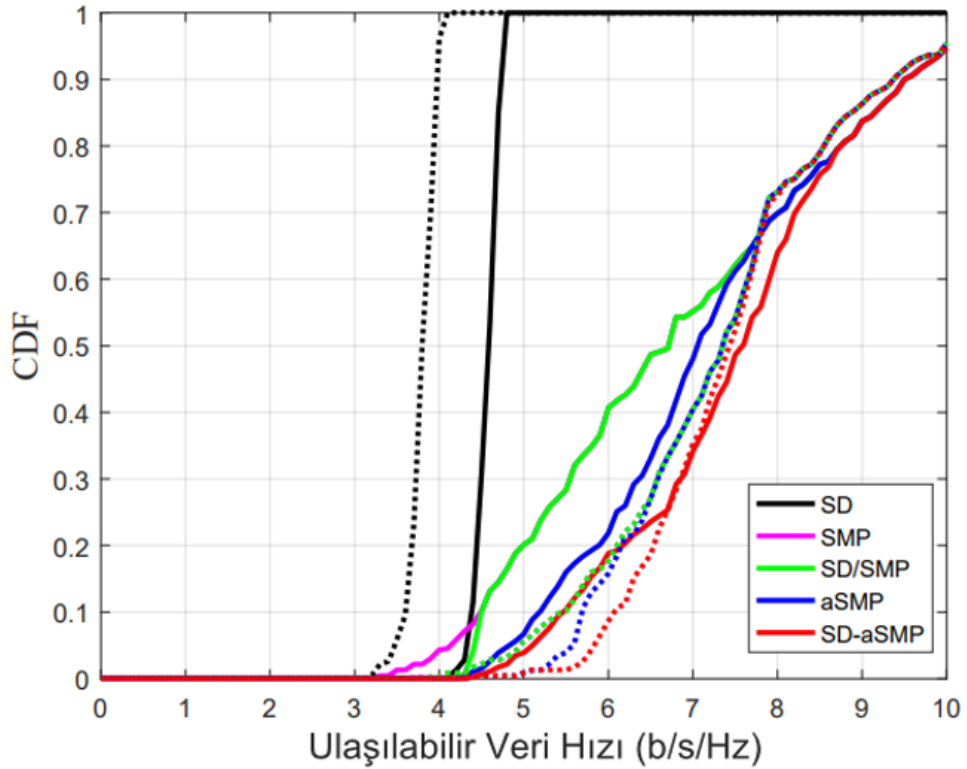
Şekil 4.37. $N_t = 4$ ve 45° yükselme açısında ADR ve GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.



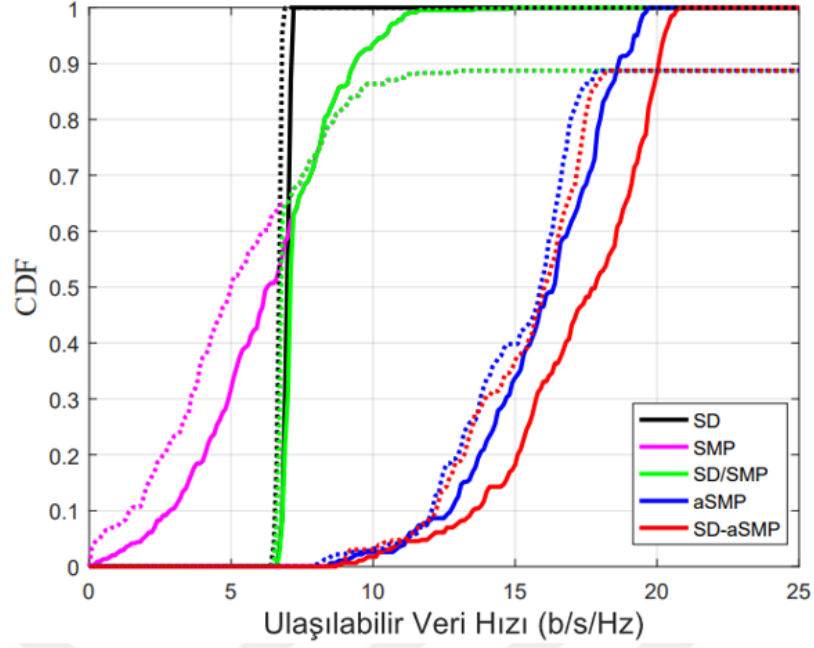
Şekil 4.38. $N_t = 16$ ve 45° yükselme açısında ADR ve GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.

Odanın bazı bölgelerinde aSMP GADR yapısı daha yüksek ulaşılabilir hızlar sağlarken, odanın genelinde en iyi performansı SD-aSMP iletim tekniği göstermiştir. Son olarak, GADR yapısının ADR yapısından daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.39 ve Şekil 4.40 incelendiğinde, 75° yükselme açılarıyla incelenen GADR ve ADR yapılarının $N_t = 4$ ve $N_t=16$ için karşılaştırılmıştır. Grafiklerde, noktalar ADR'yi temsil ederken çizgiler GADR yapısını temsil etmektedir. Bu analiz sonucunda, aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin $N_t = 16$ için $N_t = 4$ 'ten daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu performans artışı, diğer iletim tekniklerine kıyasla belirgin bir şekilde daha yüksektir. SMP iletim tekniğinde ise LED sayısının artması oda içerisindeki performansını olumsuz etkilemiştir.



Şekil 4.39. $N_t = 4$ ve 75° yükselme açısında ADR ve GADR ile 4x5 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.



Şekil 4.40. $N_t = 16$ ve 75° yükselme açısında ADR ve GADR ile 16x17 MIMO-VLC şemalarının ulaşılabilir veri hızlarının CDF grafiği.

LED sayısının artmasıyla beraber ADR yapısıyla incelenen SD iletim tekniğinin performansı, GADR yapısıyla incelenen SD iletim tekniğinin performansına daha yakın bir performans sağlamıştır. $N_t = 4$ iken SD-aSMP ve SD/SMP iletim tekniklerinde kullanılan ADR yapısı GADR yapısından odanın bazı bölgelerinde daha iyi performans göstermiştir.

Bu çalışmada, MIMO-VLC sistemlerinde kullanılan çeşitli iletim tekniklerinin performansı, GADR ve ADR yapıları altında farklı LED sayıları ($N_t = 4$ ve $N_t = 16$) ve farklı yükselme açıları (30° , 45° ve 75°) için detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analizler sonucunda, LED sayısının artmasıyla birlikte genel olarak performansın arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle aSMP ve SD-aSMP iletim teknikleri, $N_t = 16$ için belirgin bir performans artışı göstermiştir. Bu artış, diğer iletim tekniklerine kıyasla oldukça yüksektir. Ancak, SMP iletim tekniğinde LED sayısının artması odanın bazı bölgelerinde performansı olumsuz etkilemiştir.

Yükselme açılarının etkisi de önemli bulgular ortaya koymuştur. 30° , 45° ve 75° açılarında yapılan incelemelerde, genel olarak aSMP ve SD-aSMP tekniklerinin $N_t = 16$ için daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. 30° ve 45° açılarında, aSMP iletim tekniği LED sayısının artmasıyla SD-aSMP'den daha iyi performans göstermiştir. SMP iletim tekniği ise SD iletim tekniğinin performansına yaklaşmıştır.

75° açısında ise, ADR yapısıyla incelenen SD iletim tekniği, GADR yapısıyla incelenen SD iletim tekniğinin performansına daha yakın bir performans göstermiştir.

Genel değerlendirmede, GADR yapısının ADR yapısına kıyasla üstün performans sergilediği görölmüştür. Özellikle aSMP ve SD-aSMP teknikleri, yüksek LED sayıları ve farklı yükselme açıları altında diğer tekniklere göre daha iyi performans göstermiştir. SMP tekniği, düşük LED sayılarında daha etkili olmasına rağmen, yüksek LED sayılarında performans düşüşü yaşamıştır. SD tekniği ise genellikle stabil bir performans sunarken, LED sayısının artmasıyla ADR ve GADR yapıları arasındaki performans farkı azalmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, MIMO-VLC sistemlerinde LED sayısı ve yükselme açısı gibi parametrelerin doğru optimizasyonunun iletim tekniklerinin performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, iç mekân MIMO-VLC sistemlerinin performansını artırmak amacıyla farklı MIMO teknikleri ve alıcı yapıları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle, LED sayısının ve yükselme açısının sistem performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmada, SD, SMP, aSMP ve SD-aSMP gibi MIMO iletim tekniklerinin farklı LED sayıları ve çeşitli yükselme açıları altındaki performansları analiz edilmiştir. Ayrıca, ADR ve GADR alıcı yapılarının veri hızları üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

Analitik ve benzetim sonuçlarının uyumlu olması, elde edilen bulguların güvenilirliğini ortaya koymuştur. Odanın içerisinde farklı pozisyonlardaki SNR değerlerine göre yapılan değerlendirmeler, çeşitli MIMO şemalarının performanslarının kümülatif dağılım fonksiyonları (CDF) grafikleri ve SNR-ulaşılabilir hız grafikleri ile sunulmuştur. Elde edilmiş CDF grafiklerinde, x eksenini belirli bir noktada elde edilebilecek veri hızını temsil ederken, y eksenini ise belirli bir hızın veya daha düşük bir hızın odanın içinde hangi oranda sağlandığını gösterir. y eksenini 0 ile 1 arasında değiştirir; burada 0, hiçbir noktanın bu hızı sağlamadığını, 1 ise tüm noktaların bu hızı veya daha düşük bir hızı sağladığını ifade eder. Bu kapsamda, anahtar benzetim parametreleri belirlenmiş ve 5 m x 5 m x 3 m boyutlarındaki iç mekân ortamında, tavana monte edilen LED'ler ve 0,85 m yükseklikteki alıcı düzleminde konumlandırılan kullanıcı senaryosu dikkate alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar, SD-aSMP ve aSMP iletim tekniklerinin genel olarak en yüksek performansı sağladığını göstermektedir. Özellikle düşük SNR koşullarında SD-aSMP tekniği üstün performans sergilemiştir. SMP iletim tekniği ise belirli yüksek SNR aralıklarında performansını artırarak diğer tekniklerle eşdeğer veya daha iyi sonuçlar elde etmiştir. SD tekniği ise düşük SNR koşullarında daha etkili bulunmuştur.

LED sayısının artırılması ve farklı yükselme açılarıyla yapılan benzetimlerde, SD ve SD-aSMP tekniklerinin performansının yükselme açısının artmasıyla iyileştiği gözlemlenmiştir. Ancak, SMP tekniği için bu durum tersine dönmüş, yükselme açısının artması performansı olumsuz etkilemiştir. Genel olarak, 60° yükselme açısı ile SD-aSMP şeması en iyi performansı sergilemiştir.

GADR yapısının, düşük SNR bölgelerinde ADR'ye göre avantaj sağladığı, yüksek SNR bölgelerinde ise benzer performans sergilediği belirlenmiştir. GADR ve ADR performanslarının yüksek SNR bölgesinde birbirine yaklaştığı, çoğullama kazancının baskın olduğu yüksek SNR bölgesinde görülmüştür. SD-aSMP şeması, düşük ve yüksek SNR bölgelerinde tüm diğer şemalardan daha iyi performans göstermiştir. Bu teknik, düşük SNR bölgesinde çeşitlilik kazancından, yüksek SNR bölgesinde ise çoğullama kazancından yararlanmıştır.

Grafik analizleri, 30° , 45° ve 75° yükselme açıları altında incelenen GADR ve ADR yapılarının $N_t = 4$ ve $N_t = 16$ için performanslarını karşılaştırmıştır. aSMP ve SD-aSMP iletim tekniklerinin $N_t = 16$ için $N_t = 4$ 'e göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu performans artışı, diğer iletim tekniklerine kıyasla belirgin bir şekilde daha yüksektir. Ancak, SMP iletim tekniğinde LED sayısının artması, odanın bazı bölgelerinde performansı olumsuz etkilemiştir. ADR yapısıyla incelenen SD iletim tekniği, LED sayısının artmasıyla veri hızlarının GADR yapısıyla incelenen SD iletim tekniğine yaklaştığı gözlenmiştir. $N_t = 16$ iken, SD-aSMP ve SD/SMP iletim tekniklerinde kullanılan ADR yapısı, odanın bazı bölgelerinde GADR yapısından daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte, SMP iletim tekniğinin SD iletim tekniğinin ulaşılabilir hızına yaklaştığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu tezde yapılan çalışmalar, iç mekân MIMO-VLC sistemlerinin performansını optimize etmek için uyarlanabilir MIMO tekniklerinin ve açısal çeşitlilik sağlayan alıcı yapılarının önemini vurgulamaktadır. SD-aSMP ve aSMP gibi uyarlanabilir teknikler, değişken koşullara uyum sağlayabilme yetenekleriyle yüksek hızlı iletişim sağlama potansiyeline sahip olup, özellikle yüksek SNR koşullarında önemli performans artışları sağlamaktadır. Bu bulgular, MIMO-VLC sistemlerinin gelecekteki uygulamalarında daha verimli ve uyarlanabilir çözümler geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Ghassemlooy, Z., Alves, L. N., Zvanovec, S. ve Khalighi, M.-A., 2017. Visible Light Communications: Theory and Applications. CRC Press, Florida, USA.
2. Armstrong, J., Sekercioglu, Y. A. ve Neild, A., 2013. Visible light positioning: a roadmap for international standardization, IEEE Communications Magazine, 51, 12, 68-73.
3. Barry, J. R., 1994. Wireless Infrared Communications. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA.
4. Telatar, E., 1999. Capacity of multi-antenna Gaussian channels, European Transactions on Telecommunications, 10, 6, 585-595.
5. Arnon, S., vd., 2012, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, Cambridge, İngiltere.
6. Uçar, S., Turan, B., Çöleri Ergen, S., Özkasap, Ö. ve Ergen, M., 2016. "Dimming Support for Visible Light Communication in Intelligent Transportation and Traffic System." In IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, İstanbul, Türkiye.
7. Devereux, H. ve Smalley, M., 1995. Are infra red illuminators eye safe? Security Technology, 1995. Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers 29th Annual 1995 International Carnahan Conference on, 480-481.
8. Khandelwal, K. ve Jain, S. K., 2016. A Review Paper on Li-Fi Technology, IJIRST National Conference on Innovations in Micro-electronics, Signal Processing and Communication Technologies VIMPACT, 1-4.
9. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization., 2011. IARC Classifies Radio Frequency Electromagnetic Fields as Possible Carcinogenic to Humans. (Press Release No. 208). Lyon, Fransa.
10. Kim, H.-S., vd., 2013. An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique, Journal of Lightwave Technology, 31, 1, 134-144.
11. Cailean, A., Cagneau, B., Chassagne, L., Topsu, S., Alayli, Y. ve Blosseville, J.-M., 2012. Visible light communications: Application to cooperation between vehicles and road infrastructures, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 1055-1059.
12. An, J., Sejan, M. A. S. ve Chung, W. Y., 2019. Fine particulate matter monitoring via a visible light communication in DCT-based optical OFDM, Opt. Express, 27, 15062-15078.

13. Sejan, M. A. S., Naik, R. P., Lee, B. G. ve Chung, W. Y., 2022. A Bandwidth Efficient Hybrid Multilevel Pulse Width Modulation for Visible Light Communication System: Experimental and Theoretical Evaluation, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 1991-2004.
14. Duman, T. M. ve Ghrayeb, A., 2008. Coding for MIMO Communication Systems, Wiley, Hoboken, NJ, USA.
15. Fath, T. ve Haas, H., 2013. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments, *IEEE Transactions on Communications*, 61, 2, 733-742.
16. Burton, A., Minh, H., Ghassemlooy, Z., Bentley, E. ve Botella, C., 2014. Experimental demonstration of 50-Mb/s visible light communications using 4×4 MIMO, *IEEE Photonics Technology Letters*, 26, 9, 945-948.
17. Mesleh, R., Elgala, H. ve Haas, H., 2011. Optical spatial modulation, *Journal of Optical Communications and Networking*, 3, 3, 234-244.
18. Ijaz, M., Tsonev, D., McKendry, J. J., Xie, E., Rajbhandari, S., Chun, H., Haas, H., 2015. Experimental proof-of-concept of optical spatial modulation OFDM using micro LEDs, in *Proc. IEEE Int. Conference Communication (ICC) Workshops*, 1338-1343.
19. Deng, P. ve Kaverhad, M., 2017. Software defined adaptive MIMO visible light communications after an obstruction, in *Proc. Opt. Fiber Communication Conference (OFC)*, paper Th1E.5.
20. Narmanlioglu, O., Kizilirmak, R. C., Baykas, T. ve Uysal, M., 2017. "Link adaptation for MIMO OFDM visible light communication systems," *IEEE Access*, 5, 26006-26014.
21. Bao, X., Gu, X., Zhang, W. ve Chen, H.-H., 2019. User-centric quality-of-experience optimization and scheduling of multicolor LEDs in VLC systems, *IEEE Systems Journal*, 13, 3, 2275-2284.
22. Chen, C., Yang, H., Du, P., Zhong, W.-D., Alphones, A., Yang, Y. ve Deng, X., 2020. User-centric MIMO techniques for indoor visible light communication systems. *IEEE Systems Journal*, 14, 3, 3202–3213.
23. Kim, B. W., 2018. Suboptimal LED selection for distributed MIMO visible light communications, *Personal and Ubiquitous Computing*, 22, 1, 105-110.
24. Nuwanpriya, A., Ho, S.-W. ve Chen, C. S., 2015. Indoor MIMO Visible Light Communications: Novel Angle Diversity Receivers for Mobile Users. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33, 9, 1780-1792.
25. A. G. Bell, W. Adams, W. Preece, et al., 1880. Discussion on The Photophone and the Conversion of Radiant Energy into Sound, *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, 9, 34, 375–383.

26. D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally ve R. Parthiban, 2015. LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17, 3, 1649–1678.
27. H. Chen, C. Wu, H. Li, X. Chen, Z. Gao, S. Cui ve Q. Wang, 2016. Advances and Prospects in Visible Light Communications., *Journal of Semiconductors*, 37, 1.
28. G. Pang, T. Kwan, H. Liu ve C.-H. Chan, 1999. Optical Wireless Based on High Brightness Visible LEDs, in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting*, 3, 1693–1699.
29. G. Pang, T. Kwan, C.-H. Chan ve H. Liu, 1999. LED Traffic Light as a Communications Device, in *Proceedings 199 IEEE/IEEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 788– 793.
30. Komine, T. ve Nakagawa, M., 2002. Integrated System of White LED Visible Light Communication and Power-Line Communication, in *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 4, 1762-1766.
31. Pradana, A., Ahmadi, N. ve Adionos, T., 2015. Design and Implementation of Visible Light Communication System Using Pulse Width Modulation, in *International Conference on Electrical Engineering & Informatics (ICEEI)*, 25-30.
32. T. Komine ve M. Nakagawa, 2012. Integrated System of White LED Visible Light Communication and Power-Line Communication, in *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1762–1766.
33. Grubor, J., Randel, S., Langer, K.-D. ve Walewski, J. W., 2008. Broadband Information Broadcasting Using LED-Based Interior Lighting, *Journal of Lightwave Technology*, 26, 24, 3883-3892.
34. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks–Part 15.7: Short Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, 2011. *IEEE Std 802.15.7-*, 1-309, 2011
35. Suh, Y., Ahn, C.-H. ve Kwon, J. K. 2013. Dual-Codeword Allocation Scheme for Dimmable Visible Light Communications, *IEEE Photonics Technology Letters*, 25, 13, 1274-1277.
36. Akram, M., Aravinda, L., Munaweera, M., Godaliyadda, G. ve Ekanayake, M., 2017. "Camera Based Visible Light Communication System for Underwater Applications," in *IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, 1-6.
37. Mossaad, M., 2021. Spatial Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing for Indoor Visible-Light Communication Systems. PhD thesis, McMaster University, Hamilton, Kanada.

38. Aly, B., Elamassie, M., Uysal, M., ve Kınay, E., 2014. Experimental Evaluation of Unipolar OFDM VLC System on Software Defined Platform, in 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL), 1-6.
39. Wang, Q., Mao, T., Wang, Z. ve Wang, J., 2017, Index Modulation-Aided OFDM for Visible Light Communications, in Visible Light Communications, InTech Rijeka, Hırvatistan.
40. Arnon, S., 2014. Optimised Optical Wireless Car-to-Traffic-Light Communication, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 25, 6, 660-665,
41. Luo, P., Ghassemlooy, Z., Le-Minh, H., Bentley, E., Burton, A. ve Tang, X., 2014. Fundamental Analysis of a Car-to-Car Visible Light Communication System, in 2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), IEEE, 1011-1016.
42. Bugra, T., vd., 2018. IEEE 802.15. 13-Compliant Visible Light Communications in Vehicular Networks, in Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Communications, CRC Press, 141-156.
43. Cailean, A. M. ve Dimian, M., 2017. Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications, IEEE Communications Magazine, 55, 4, 169-175.
44. Khan, A. U., 2020. Optimizing the performance of visible light communication system with angular diversity. Yüksek lisans tezi, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye.
45. Chan, E., 2012. Wireless Optical Links for Airplane Applications, Photonics Society Summer Topical Meeting Series, IEEE, 76-77.
46. Park, I.-H., Yoon, H. K., ve Kim, J. Y., 2012. Interference Mitigation Scheme of Visible Light Communication Systems for Aircraft Wireless Applications, IEEE International Conference on Consumer Electronics, 355-356.
47. Guo, F., Yu, F. R., Zhang, H., Li, X., Ji, H. ve Leung, V. C. M., 2021. Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey. IEEE Internet of Things Journal, 8, 15, 11891-11915.
48. Zeng, L., et al., 2009. "High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white led lighting". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 27, 9, 1654-1662.
49. Fath, T. ve Haas, H., 2013. Performance Comparison of MIMO Techniques for Optical Wireless Communications in Indoor Environments. IEEE Transactions on Communications, 61, 2, 733-742.
50. Yesilkaya, A., Basar, E., Miramirkhani, F., Panayirci, E., Uysal, M. ve Haas, H., 2017. "Optical MIMO-OFDM with generalized LED index modulation," IEEE Transactions on Communications, 65, 8, 3429–3441.

51. Vegni, A. M. ve Biagi, M., 2019. Optimal LED placement in indoor VLC networks. *Optics express*, 27, 6, 8504-8519.
52. Nuwanpriya, A. Ho, S.-W., & Chen, C. S., 2015. Indoor MIMO Visible Light Communications: Novel Angle Diversity Receivers for Mobile Users. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33, 9, 1780-1792.
53. Armstrong, J., 2009. OFDM for Optical Communications, *Journal of Lightwave Technology*, 27, 3, 189-204.
54. Celik, Y., 2023. Location-Based Visible Light Communication. 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İstanbul, Türkiye.
55. Harada, R. Geldard, C. T. & Popoola, W. O., 2023. Performance Analysis of Angular Diversity Receivers in Visible Light Communications. *IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Toronto, ON, Kanada.
56. Armstrong, J. ve Schmidt, B. J. C., 2008. Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN, *IEEE Communications Letters*, 12, 5, 343-345.
57. Kahn, J. M. ve Barry, J. R., 1997. Wireless Infrared Communications, *Proceedings of the IEEE*, 85, 2, 265-298.
58. Gesbert, D., Shafi, M., Shiu, D., Smith, P. J., & Naguib, A., 2003. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21, 3, 281-302.
59. Penrose, R. A., 1955. Generalized Inverse for Matrices, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 51, 3, 406-413.
60. Shannon, C. E., 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 3, 379-423.
61. URL-1<https://sl.wikipedia.org/wiki/Slika:EM_spectrumrevised.png>, Erişim Tarihi: 02.04.2024.
62. URL-2<web.archive.org/web/20160331190445/http://www.ict-omega.eu/>, Erişim Tarihi: 27.03.2024.
63. URL-3 <iee802.org/15/pub/IGvlc.html>, Erişim Tarihi: 28.03.2024.
64. URL-4 <<https://cie.co.at/>>, Erişim Tarihi: 04.02.24.
65. URL-5<web.archive.org/web/20160715181135/vlcc.net/modules/xpage1/?ml_lang=en>, Erişim Tarihi: 04.03.2024.

66. URL-6 <analog.com/en/applications/landing-pages/001/jesd204-serial-interface-jedec-standard-data-converters.html>, Erişim Tarihi: 01.04.2024
67. Ardelean, A., 2018. AD-FMCDQA2-EBZ Clocking, URL adres: wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/ad-fmcdqa2-ebz/clocking, Erişim Tarihi: 01.04.2024.
68. URL-7 <www.erso.eu>, Erişim Tarihi: 04.04.2024.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Kardelen HORUNLU

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Elektrik Elektronik
Mühendisliği Bölümü, 2016-2020

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Elektrik Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021-2024

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Liva Grup Elk. Elkt. İnş. Taah. San. Tic. Ltd. Şti. / Yaz Stajı
2. Nesan Otomotiv A.Ş / Yaz Stajı
3. Üniversa/Elektrik Elektronik Teknik Destek ve Satış Mühendisi / Halen

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Bildiriler

1. Horunlu, K. ve Çelik, Y. (2024). Kullanıcı Merkezli Görünür Işık Haberleşmesi.
32st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU),
Mersin, Türkiye, 1-4.