

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ İÇİN ÇOKLU ERİŞİM YÖNTEMLERİ

DOKTORA TEZİ

Yasin ALTUNBAŞ

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ İÇİN ÇOKLU ERİŞİM YÖNTEMLERİ

Yasin ALTUNBAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kadir TÜRK

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Görünür Işık Haberleşmesi İçin Çoklu Erişim Yöntemleri” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır. Tez çalışması kapsamında birden çok kullanıcının bulunduğu görünür ışık haberleşme sistemlerinde toplam veri iletim hızını artırmak, 5G ve 6G’nin gereksinimlerini karşılamak amacıyla çoklu erişim yöntemleri incelenmiştir. İncelenen yöntemler için oluşabilecek belirli kısıtlar altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla çözümler sunulmuştur. Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2022-10241.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen tecrübe ve bilgi birikimini benimle paylaşan ve bu konuda araştırma yapmam için beni teşvik eden danışmanlığımı üstlenen hocam Sayın Prof. Dr. Kadir TÜRK’e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Tuğrul ÇAVDAR ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emin TUĞCU’ya, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan Sayın Prof. Dr. Yunus AKALTUN’a, tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Sena ALTUNBAŞ’a, hayatım boyunca hep yanımda olan ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan başta annem Esmâ Betül ALTUNBAŞ, babam Bekir ALTUNBAŞ, kardeşlerim Hamza Furkan ALTUNBAŞ, Süleyman ALTUNBAŞ ve akademik başarıları ile örnek aldığım dayılarım Prof. Dr. Sinan Mahir KAYIRAN, Uzm. Dr. Sadi KAYIRAN ve yengem Op. Dr. Hale KAYIRAN’a sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen 6 Şubat Kahramanmaraş depreminde hayatlarını kaybeden dedem Süleyman KAYIRAN ve anneannem Muazzez KAYIRAN’a sonsuz şükran ve minnettarlığımı sunarım.

Yasin ALTUNBAŞ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Görünür Işık Haberleşmesi İçin Çoklu Erişim Yöntemleri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Kadir TÜRK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 14/10/2024

Yasin ALTUNBAŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Araştırması	4
1.3. Görünür Işık Haberleşmesi (VLC).....	13
1.3.1. Kanal Modeli.....	17
1.3.2. Gürültü Modeli.....	18
1.4. Çoklu Erişim Yöntemleri	19
1.4.1. Dikgen Çoklu Erişim (OMA)	19
1.4.2. Uzamsal Çoklu Erişim (SDMA).....	20
1.4.3. Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA).....	21
1.4.4. Hız Bölmeli Çoklu Erişim (RSMA).....	32
1.5. Optimizasyon Algoritmaları.....	38
1.5.1. PSO Algoritması	40
1.5.2. SBO Algoritması.....	41
1.5.3. SOS Algoritması	44
1.5.4. DE Algoritması	46
1.5.5. ABC Algoritması	47
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	50
2.1. Tek LED PD-NOMA Tabanlı VLC Sistemi	53
2.2. MIMO-NOMA Tabanlı VLC Sistemi.....	60
2.3. RSMA Tabanlı VLC Sistemi	67
2.3.1. Senaryo 1.....	70

2.3.2. Senaryo 2.....	71
2.3.3. Senaryo 3.....	74
2.3.4. Senaryo 4.....	78
3. BULGULAR.....	82
3.1. Tek LED PD-NOMA Tabanlı VLC Sistemi İçin Bulgular.....	82
3.2. MIMO-NOMA Tabanlı VLC Sistemi İçin Bulgular.....	89
3.3. RSMA Tabanlı VLC Sistemi İçin Bulgular	95
3.3.1. Senaryo 1.....	96
3.3.2. Senaryo 2.....	97
3.3.3. Senaryo 3.....	98
3.3.4. Senaryo 4.....	107
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	108
5. KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİ İÇİN ÇOKLU ERİŞİM YÖNTEMLERİ

Yasin ALTUNBAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Kadir TÜRK
2024, 129 Sayfa

Görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC), görünür banttaki ışığı hem iletişim hem de aydınlatma için kullanan bir kısa menzilli kablosuz optik haberleşme türüdür. VLC sistemlerinin çoğunda verici olarak tercih edilen ışık yayan diyotlar (Light Emitting Diode, LED) iletişim hızını sınırlamaktadır. Gelecek nesil haberleşme standartlarında yer alması beklenen VLC sistemlerin yüksek veri hızlarına ulaşabilmesi ve çoklu erişimi (Multiple Access, MA) desteklemesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında kapalı mekân VLC sistemler için, toplam veri iletişim hızını da yükselten MA yöntemleri incelenmiş ve dikgen olmayan çoklu erişim (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), hız bölmeli çoklu erişim (Rate Splitting Multiple Access, RSMA) yöntemleri için geliştirmeler önerilmiştir. NOMA yönteminde elde edilen bulgulara, hesaplamalar sırasında literatürdeki birçok çalışmada dikkate alınmayan adillik ve aydınlatma gibi çeşitli kısıtlamalar kullanılmıştır. Bu kısıtlamaların birbirlerine ve toplam veri iletim hızına etkisi ortaya koyulmuştur. Geleneksel güç tahsis yöntemlerine göre önerilen meta-sezgisel algoritmaların toplam veri iletim hızı performansına göre üstünlüğü gösterilmiştir. RSMA yönteminde elde edilen bulgulara, RSMA'nın daha düşük karmaşıklıkla NOMA'ya çok yakın performans sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca, toplam veri iletim hızı bakımından RSMA ve NOMA'nın, dikgen çoklu erişime (Orthogonal Multiple Access, OMA) üstünlüğü gösterilmiştir. RSMA, NOMA ve uzamsal çoklu erişimin (Space Division Multiple Access, SDMA) adillik kısıtlaması altında veri iletim hızları açısından avantajları ve sınırlamaları ortaya koyulmuştur. Son olarak, RSMA'nın kusurlu kanal durum bilgisi (Channel State Information, CSI) altında NOMA'ya göre daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Görünür ışık haberleşmesi, Dikgen olmayan çoklu erişim, Hız bölmeli çoklu erişim, Dikgen çoklu erişim, Meta-sezgisel algoritmalar, Adillik, Aydınlatma, Kusursuz ve kusurlu kanal durum bilgisi

PhD. Thesis

SUMMARY

MULTIPLE ACCESS METHODS FOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Yasin ALTUNBAŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Kadir TÜK
2024, 129 Pages

Visible light communication (VLC) is a short-range wireless optical communication method that uses visible light for both communication and illumination. Most VLC systems use light emitting diodes (LEDs) as transmitters, which limits communication speed. In this thesis, multiple access (MA) methods that also increase the sum rate for indoor VLC systems are examined and improvements are proposed for non-orthogonal multiple access (NOMA) and rate splitting multiple access (RSMA) methods. In the findings obtained in the NOMA method, various constraints such as fairness and illumination, which are not considered in many studies in the literature, are used during the calculations. The effects of these constraints on each other and the sum rate are investigated. The proposed meta-heuristic algorithms outperform traditional power allocation methods in terms of sum rate. The results for the RSMA method indicate that RSMA provides performance very close to NOMA with lower complexity. In addition, it is demonstrated that RSMA and NOMA outperform orthogonal multiple access (OMA) in terms of sum rate. The advantages and limitations of RSMA, NOMA, and space division multiple access (SDMA) in terms of sum rate under fairness constraint are shown. Finally, it is demonstrated that RSMA is superior to NOMA under imperfect channel state information (CSI).

Key Words: Visible light communication, Non orthogonal multiple access, Rate splitting multiple access, Meta-heuristic algorithm, Fairness, Illumination, Perfect and imperfect channel state information

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Elektromanyetik spektrum.....	2
Şekil 2. VLC sisteminin blok diyagramı	14
Şekil 3. LoS VLC kanalı geometrisi.....	17
Şekil 4. RF literatüründeki NOMA yöntemlerinin sınıflandırılması (Al-Ahmadi vd., 2018).....	22
Şekil 5. VLC literatüründeki NOMA yöntemlerinin sınıflandırılması (Al-Ahmadi vd., 2018).....	24
Şekil 6. Kullanıcı 1 ve 2'nin verileri.....	25
Şekil 7. BPSK modülasyonlu kullanıcı 1 ve 2'nin verileri.....	26
Şekil 8. Kullanıcı 1 ve 2'nin ölçeklendirilmiş verileri.....	26
Şekil 9. Kullanıcılara iletilecek süperpozisyon kodlu x sinyali.....	27
Şekil 10. Eşik değeri belirlenmiş süperpozisyon kodlu x sinyali	28
Şekil 11. Kullanıcı 1'in verileri x'den çıkartıldıktan sonra SC'li sinyal	29
Şekil 12. İki kullanıcılı PD-NOMA için sistem modeli.....	30
Şekil 13. Girişim seviyesine göre kodu çözülecek ve gürültü olarak ele alınacak girişim miktarı (Mao vd., 2022)	33
Şekil 14. RSMA yöntemlerinin sınıflandırılması (Mao vd., 2022)	34
Şekil 15. OMA, SDMA, NOMA ve RSMA yöntemleri için iki kullanıcılı MISO iletim modeli (Mao vd., 2022).....	35
Şekil 16. PSO algoritması akış diyagramı	41
Şekil 17. SBO algoritması akış diyagramı (Talaat vd., 2021)	43
Şekil 18. SOS algoritması akış diyagramı	45
Şekil 19. DE algoritması akış diyagramı	47
Şekil 20. ABC algoritması akış diyagramı (Karaboğa, 2014)	49
Şekil 21. Tek LED M kullanıcılı iç mekân aşağı yönlü iletim NOMA tabanlı VLC sistem modeli	53
Şekil 22. M kullanıcılı iç mekân aşağı yönlü iletim 2 x 2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modeli	61
Şekil 23. RSMA tabanlı M kullanıcılı MISO VLC sistemleri için alıcı verici mimarisi	67
Şekil 24. Üç LED iki kullanıcılı iç mekân aşağı yönlü iletim VLC sistem modeli	74
Şekil 25. İki LED iki kullanıcılı iç mekân aşağı yönlü iletim VLC sistem modeli	79

Şekil 26.	MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması.....	83
Şekil 27.	MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtı altında toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması.....	86
Şekil 28.	MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi için optik yoğunluk kısıtı altında toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması.....	88
Şekil 29.	M kullanıcılı 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemleri için her bir LED'in ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması.....	90
Şekil 30.	M kullanıcılı 2 x 2 MIMO VLC sisteminde OFDMA ve NOMA kullanılarak elde edilebilir toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	91
Şekil 31.	M kullanıcılı 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sisteminde adillik değerlerinin normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	93
Şekil 32.	2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için PSO algoritmasının GRPA'ya göre toplam veri iletim hızı kazancının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	94
Şekil 33.	2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtının olduğu ve olmadığı durumda PSO algoritması ile elde edilen toplam veri iletim hızı değerlerinin normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	95
Şekil 34.	M kullanıcılı MU-SISO VLC sisteminde RSMA ve NOMA kullanılarak elde edilebilir toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	96
Şekil 35.	MU-SISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve OMA kullanılarak elde edilebilir toplam veri iletim hızının iletim gücüne göre karşılaştırılması	97
Şekil 36.	MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken her bir LED'in ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	99
Şekil 37.	MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken kullanıcı 1 ve 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	100
Şekil 38.	MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması.....	101
Şekil 39.	MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken elde edilen adillik değerlerinin normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	102
Şekil 40.	MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak $F \cong 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ve 1 için her bir LED'in ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	103

Şekil 41.	MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak $F \cong 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ve 1 için kullanıcı 1 ve 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması.....	104
Şekil 42.	MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak $F \cong 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ve 1 için toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması	106



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. pin-PD ve APD'nin karşılaştırılması (Hranilovic, 2005)	16
Tablo 2. Gürültü Parametreleri	19
Tablo 3. SDMA, NOMA ve RSMA için girişim seviyelerinin karşılaştırılması (Mao vd., 2022)	33
Tablo 4. İki kullanıcılı MISO iletim modelinde mesajların akışlara eşleştirilmesi (Clerckx vd., 2020)	37
Tablo 5. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistem modeli için simülasyon parametreleri	57
Tablo 6. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistem modeli için PSO, SBO ve ABC algoritmalarının parametre değerleri	60
Tablo 7. 2 x 2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modeli için simülasyon parametreleri	64
Tablo 8. 2 x 2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi için PSO, SBO, SOS, DE ve ABC algoritmalarının parametre değerleri	66
Tablo 9. Senaryo 1 için PSO algoritmasının parametre değerleri	71
Tablo 10. Senaryo 2 için simülasyon parametreleri	71
Tablo 11. Senaryo 2 için PSO algoritmasının parametre değerleri	73
Tablo 12. Senaryo 3 için simülasyon parametreleri	75
Tablo 13. Senaryo 3 için PSO algoritmasının parametre değerleri	78
Tablo 14. Senaryo 4 için simülasyon parametreleri	79
Tablo 15. Senaryo 4 için PSO algoritmasının parametre değerleri	81
Tablo 16. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken ortalama toplam veri iletim hızı değerleri	84
Tablo 17. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken ortalama adillik, ortalama optik yoğunluk ve ortalama işaretin değişimi değerleri	85
Tablo 18. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtı altında ortalama adillik, ortalama optik yoğunluk ve ortalama işaretin değişimi değerleri ($F \geq 0.7$)	87
Tablo 19. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için optik yoğunluk kısıtı altında adillik, optik yoğunluk ve işaretin değişiminin ortalama değerleri ($CO \leq 4.5$)	89
Tablo 20. 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtı altında ortalama toplam veri iletim hızı değerleri	92
Tablo 21. 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için ortalama adillik değerleri	93

Tablo 22. Kusurlu ve kusursuz CSI altında RSMA ve NOMA yöntemleri için ulaşılabilir toplam veri iletim hızı değerleri	107
---	-----



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

h_m	: Kullanıcı m ile LED arasındaki DC kanal kazancı
A_{PD}	: Fotodedektörün yüzey alanı
C_m	: Kullanıcı m 'nin ortak hızdaki katkısını
C_p	: Birim alanın sabit kapasitesi
H_m	: Kanal matrisi
I_2, I_3	: Gürültü-bant genişliği faktörü
I_{bg}	: Arka plan gürültüsünden kaynaklı akım
P_{max}	: Maksimum güç tahsis katsayılarının toplamı
P_{opt}	: Optik güç
P_r	: Alınan ortalama optik güç
R_{PD}	: Fotodedektörün duyarlılığı
$R_{T,NOMA}$	: Dikgen olmayan çoklu erişim yöntemi için toplam veri iletim hızı
$R_{T,RSMA}$	: Hız bölmeli çoklu erişim için toplam veri iletim hızı
$R_{T,SDMA}$	: Uzamsal çoklu erişim yöntemi için toplam veri iletim hızı
T_k	: Mutlak sıcaklık
$T_s(\theta)$	: Optik filtre kazancı
$W_{c,m}$	: Kullanıcı m 'nin ortak mesajı
W_c	: Ortak mesaj
W_m	: Kullanıcı m 'nin mesajı
$W_{p,m}$	: Kullanıcı m 'nin özel mesajı
g_m	: Alan etkili transistörün geçiş iletkenliği
k_b	: Boltzman sabiti
p_c	: Ortak mesaj için güç tahsis katsayısı
p_m	: Kullanıcı m için güç tahsis katsayısı
r/R	: Normalize edilmiş ofset değeri
Γ_F	: Alan etkili transistörün kanal gürültü faktörü
$\Omega_{1/2}$	: LED'in yarı görüş açısı
θ_{con}	: Fotodedektörün görüş açısı
$\sigma_{atış}^2$	: Atış gürültü varyansı
σ_n^2	: Toplam gürültü varyansı

$\sigma_{\text{Isıl}}^2$	: Isıl gürültü varyansı
5G	: Beşinci nesil
6G	: Altıncı nesil
ABC	: Yapay arı kolonisi
APD	: Çığ fotodedektör
AWGN	: Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
BER	: Bit hata oranı
BOMA	: Yapı taşı seyrek sinyal dizilim tabanlı dikgen çoklu erişim
BPSK	: İkili faz kaydırma anahtarlama
BS	: Baz istasyonunu
CB	: Koordineli hüzmleme
CDMA	: Kod bölmeli çoklu erişim
CD-NOMA	: Kod alanı NOMA
CMD	: Ortak mesaj kod çözme
CoMP	: Koordineli çok nokta
CSI	: Kanal durumu bilgisi
CSIT	: Vericideki kanal durum bilgisi
CSK	: Renk kaydırmalı anahtarlama
DC	: Doğru akım
DCO	: Doğru akım eklemeli optik
DE	: Diferansiyel gelişim
DPCRS	: Kirli kâğıt kodlu hız bölme
DRS	: Dağıtılmış hız bölme
EE	: Enerji verimliliği
ER	: Ergodik hız
ERs	: Enerji alıcıları
ES	: Kapsamlı arama
FET	: Alan etkili transistör
FOV	: Görüş açısı
GRPA	: Kazanç oranı güç tahsisi
HD/FD Relaying	: Yarım çift yönlü/tam çift yönlü aktarma
HRS	: Hiyerarşik hız bölme
IC	: Girişim kanalı

IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IM/DD	: Yoğunluk modülasyonu/doğrudan sezim
IR	: Kızılötesi
IRs	: Bilgi alıcıları
JEITA	: Japonya Elektronik ve Bilgi Teknolojisi Endüstrileri Birliği
JT	: Ortak iletim
LD	: Lazer diyot
LDS	: Düşük yoğunluklu yayılma
LED	: Işık yayan diyot
LoS	: Direkt görüş
LPMA	: Kafes bölmeli çoklu erişim
MA	: Çoklu erişim
MAC	: Çoklu erişim kanalı
MIMO	: Çoklu giriş çoklu çıkış
MISO	: Çok girişli tek çıkışlı
MMF	: Maksimum-minimum adillik
mmWave	: Milimetrik dalga
MU-LP	: Çok kullanıcılı doğrusal ön kodlama
MUSA	: Çok kullanıcılı paylaşım erişimi
NGDPA	: Normalize edilmiş kazanç farkı güç tahsisi
NLoS	: Direkt olmayan görüş
NOMA	: Dikgen olmayan çoklu erişim
OCDMA	: Optik kod bölmeli çoklu erişim
OFDM	: Dikgen frekans bölmeli çokluma
OFDMA	: Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim
OMA	: Dikgen çoklu erişim
OOK	: Açma-kapama anahtarlama
OPA	: Optimum güç tahsisi
OSTAR-RIS	: Optik eşzamanlı iletim ve yansıma yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey
OWC	: Optik kablosuz haberleşme
PAM	: Darbe Genlik Modülasyonu
PD	: Fotodedektör
PDMA	: Örüntü bölmeli çoklu erişim

PD-NOMA	: Güç alanı NOMA
PPM	: Darbe konum modülasyonu
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
QoS	: Hizmet kalitesi
RF	: Radyo frekansı
RGB	: Kırmızı-yeşil-mavi
RS	: Hız bölme
RSMA	: Hız bölmeli çoklu erişim
SAMA	: Ardışık girişim yok etmeye uygun çoklu erişim
SBO	: Saten çardak kuşu optimizasyonu
SC	: Süperpozisyon kodlaması
SCA	: Ardışık dışbükey yaklaşım
SCMA	: Seyrek kodlu çoklu erişim
SDMA	: Uzamsal çoklu erişim
SE	: Spektrum verimliliği
SIC	: Ardışık girişim iptali
SINR	: Sinyal girişim artı gürültü oranı
SISO	: Tek girişli tek çıkışlı
SNR	: Sinyal gürültü oranı
SOS	: Simbiyotik organizma araması
SWIPT	: Eşzamanlı kablosuz bilgi ve güç aktarım ağları
TDMA	: Zaman bölmeli çoklu erişim
THPRS	: Tomlinson-Harashima ön kodlu hız bölme
UAVs	: İnsansız hava araçları
UEP	: Eşit olmayan hata koruması
VLC	: Görünür ışık haberleşmesi
WASR	: Ağırlıklı ortalama toplam veri iletim hızı
WMMSE	: Ağırlıklı minimum ortalama kare hatası
WSR	: Ağırlıklı toplam veri iletim hızı
ZF	: Sıfıra zorlayıcı
A	: Pozitifliği sağlamak amacıyla eklenen doğru akım değeri
CO	: Optik yoğunluk değeri
CR	: Çaprazlama oranı

F	: Adillik değeri
G	: Açık çevrim gerilim kazancı
M	: Toplam kullanıcı sayısı
d	: Verici ve alıcı arasındaki mesafe
$g(\theta)$	: Alıcı optik yoğunlaştırıcı kazancı
lb	: Güç tahsis katsayılarının toplamının alt sınırı
ub	: Güç tahsis katsayılarının toplamının üst sınırı
ξ	: Modülasyon indeksi
π	: Pi sayısı

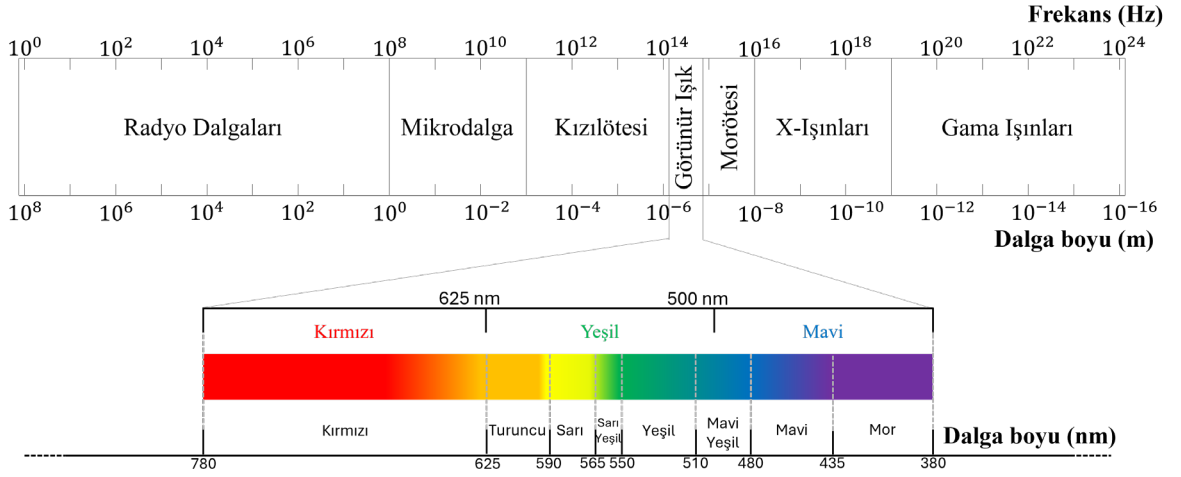


1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde kablosuz iletişim alanında yüksek veri hızlarında haberleşme ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Kullanılan radyo frekans (Radio Frequency, RF) spektrumunun hızla kalabalıklaşması yüksek hızlarda haberleşme gereksinimlerinin karşılanamamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle yeni kablosuz iletişim teknolojilerinin araştırılması hem akademik hem de endüstri çevrelerinde büyük ilgi görmektedir. Son zamanlarda optik kablosuz haberleşme (Optical Wireless Communication, OWC) sistemlerinden biri olan görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC) mevcut RF haberleşmesine bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Rahaim & Little, 2015; Basnayaka & Haas, 2017).

VLC, verileri iletmek için görünür ışık spektrumunu kullanan kısa menzilli bir kablosuz optik iletişim biçimidir (Ghassemlooy vd., 2017). Şekil 1’de elektromanyetik spektrumdaki yeri gösterilen görünür ışık spektrumu, yaklaşık 400 THz’lik oldukça geniş bir frekans aralığını kapsamaktadır. VLC, iç mekanlarda (ofisler, hastaneler, eğitim kurumları vb.) veya dış mekanlarda (sokak aydınlatmaları, trafik yönetimi, kamu alanları ve parklar vb.) kullanılabilir. İç mekân VLC sistemleri veri iletimiyle eş zamanlı olarak aydınlatmayı da sağlar. Işık yayan diyotlar (Light Emitting Diode, LED) yüksek enerji verimliliği ve uzun ömürleri nedeniyle aydınlatma elemanı olarak yaygınlaşmıştır. Ayrıca LED’ler yüksek hızlarda anahtarlanabilir ve bu da onları iyi bir VLC vericisi yapar. Bu nedenle VLC üzerine çalışmalar LED’lerin aydınlatmada yaygınlaşmasıyla hız kazanmıştır. VLC, yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) kullanır (Zukauskas vd., 2014). Düşük maliyeti, RF bandında radyasyon oluşturmaması, oldukça geniş lisanssız banda sahip olması vb. özellikleri nedeniyle VLC teknolojisinin, ofisler, hastaneler, hava alanları, uçak kabinleri vb. ortamlardaki RF sistemlerine alternatif ve/veya tamamlayıcı olması beklenmektedir (Ahsan & Asif, 2017; Albayrak vd., 2020; Chi vd., 2020; Ergul vd., 2015; Feng vd., 2016; Ghassemlooy vd., 2017; Wu vd., 2014).



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum

VLC, veri iletimi için çok geniş bir spektrum kullanmasına rağmen iletişim bant genişliği, LED'lerin anahtarlama frekansları ile sınırlıdır. Bu gibi sınırlamalar nedeniyle yüksek hızlı VLC sistemlerinin geliştirilmesi için çeşitli yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Araştırmacılar VLC sistemlerinin hem çoklu erişimi desteklemesi hem de kapasitesini artırmak için dikgen ve dikgen olmayan çoklu erişim (Orthogonal Multiple Access, OMA/Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), uzamsal çoklu erişim (Space Division Multiple Access, SDMA) ve hız bölmeli çoklu erişim (Rate Splitting Multiple Access, RSMA) şemaları ve çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) gibi teknikler üzerine çalışmalar yapmaktadır (S. Naser vd., 2020; Pathak vd., 2015; L. Zeng vd., 2009).

VLC sistemlerinde kullanılan geleneksel OMA şemaları, zaman bölmeli çoklu erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) (Ho vd., 2018; Hou vd., 2015), optik kod bölmeli çoklu erişim (Optical Code Division Multiple Access, OCDMA) (Guerra-Medina vd., 2012; Prucnal, 2006; Qiu vd., 2018; Salehi, 1989) ve dikgen frekans bölmeli çoklu erişimdir (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) (Armstrong, 2009; Dang & Zhang, 2012; Ling vd., 2018). Kullanılan bu şemaların ortak özelliği, farklı kullanıcılara dikgen kaynakların atanmasıdır. Kablosuz haberleşmeye artan talep ile birden fazla vericinin kullanıldığı MIMO haberleşme yöntemi benimsenmiştir. MIMO yöntemi, SDMA şemasının uygulanmasına olanak sağlayan uzamsal bir boyut oluşturur ve kullanıcılar arasındaki uzamsal ayrımı kullanarak aynı zaman ve frekansta birden fazla kullanıcıya hizmet verir (Mao vd., 2022). VLC sistemlerinde SDMA yol kaybını, gecikme yayılımını ve kullanıcılar

arası girişimi azaltmak için dar görüş açısına sahip alıcılara hizmet vermek amacıyla vericide çok yönlü ışınlar kullanır (Z. Chen vd., 2017; Kim & Lee, 2014).

NOMA yöntemi beşinci nesil (Fifth Generation, 5G) ağlar ve ötesi için önerilen çoklu erişim (Multiple Access, MA) şemalarından biridir (Ding vd., 2014; Benjebbour vd., 2013; Ding vd., 2015). OMA yöntemlerinin aksine NOMA aynı frekans ve zaman kaynaklarını kullanarak birden fazla kullanıcıya hizmet verebilen spektral olarak verimli bir MA yöntemidir (Ding vd., 2014). NOMA'nın üç ana türü bulunmaktadır. Bunlar güç alanı NOMA (Power Domain, PD-NOMA), kod alanı NOMA (Code Domain, CD-NOMA) ve birden fazla alanda NOMA (yani güç alanı, kod alanı ve uzamsal alan NOMA) çoğullamasıdır (Al-Ahmadi vd., 2018; Choi, 2017). VLC sistemlerinde veri hızının artırılması için NOMA yöntemi önerilmiştir (Marshoud vd., 2016). NOMA türleri arasında, alıcıda çoklanmış kullanıcı sinyallerini ayırmak için kanal kazanç farkının kullanıldığı PD-NOMA yöntemi hem RF hem de VLC sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PD-NOMA yönteminde birden çok kullanıcıya ait iletilecek veriler frekans ve zaman alanında ayrılmadan, verici tarafında süperpozisyon kodlaması (Superposition Coding, SC) kullanılarak toplamsal olarak tüm kullanıcılara aynı anda iletilir ve alıcı tarafında ardışık girişim iptali (Successive Interference Cancellation, SIC) yöntemi ile kullanıcılar verilerini elde eder (Ding, Lei, vd., 2017; Marshoud vd., 2016; Tao vd., 2018; Timotheou & Krikidis, 2015; Yin vd., 2016). Böylece her kullanıcı tüm süre boyunca bandın tamamından faydalanabilir. Bu sayede toplam veri iletim hızı, spektrum verimliliği (Spectrum Efficiency, SE) ve düşük iletim gecikmesi dahil olmak üzere birçok avantaj elde edilir (Islam, Avazov, vd., 2017). Bu avantajlardan daha etkin bir şekilde faydalanmak için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar aşağıda Literatür Araştırması başlığı altında verilmiştir.

Hız bölme (Rate Splitting, RS) kavramı üzerine inşa edilen RSMA yöntemi çeşitli koşullar altında SE'yi ve girişime karşı dayanıklılığı daha da geliştirmek için OMA, SDMA ve NOMA'yı kapsaması sayesinde altıncı nesil (Sixth Generation, 6G) ağlarda ortogonal olmayan iletim, girişim yöntemi ve MA şeması olarak umut verici bir yöntemdir (Mao vd., 2022). RSMA'da kullanıcılara iletilen mesaj, ortak mesaj ve özel mesaj olarak ikiye ayrılır. Ortak mesaj tüm kullanıcılar tarafından alınır, özel mesaj yalnızca belirli bir kullanıcının mesajıdır. Ortak mesajı almak için kullanıcıların diğer kullanıcılardan gelen paraziti çözmesi gerekir. Bunun aksine, özel mesajı almak için kullanıcıların yalnızca diğer kullanıcıların özel mesajlarından kaynaklanan paraziti dikkate alması gerekir (Clerckx vd., 2020). Bu nedenle,

ortak ve özel mesajların bölünmesinin ayarlanabilmesi sayesinde, hesaplama karmaşıklığı ve elde edilen veri hızı kontrol edilebilir. Ayrıca RSMA, hem RF (Clerckx vd. 2020) hem de VLC (S. Naser vd., 2020) sistemleri için NOMA ve SDMA'yı birleştirmektedir. Tek katmanlı RSMA tabanlı VLC sistemleri alıcıda bir defa SIC işlemi kullanırken, NOMA tabanlı VLC sistemlerinde alıcıda birden fazla SIC işlemi gerçekleştirilir. Bu nedenle RSMA tabanlı VLC sistemleri NOMA tabanlı VLC sistemlerine göre daha az karmaşıktır ve daha iyi SE sağlaması beklenir. RSMA yöntemi kullanılarak yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. RF ve VLC sistemleri için yapılan çalışmalar literatür araştırması başlığı altında verilmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

NOMA ilk olarak 2013 yılında Saito ve arkadaşları tarafından 5G ağlarının temel performans gereksinimlerine yönelik yüksek toplam veri iletim hızı, düşük gecikme süresi ve devasa bağlantı gibi talepleri karşılamak için gelecek vaat eden MA yöntemi olarak önerilmiştir (Saito vd., 2013). Literatürde NOMA'nın RF ve VLC sistemlerde kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur.

Yeni nesil bir MA türü olan RSMA toplam veri iletim hızı, SE ve daha düşük hesaplama karmaşıklığı gibi avantajları nedeniyle RF sistemlerde büyük ilgi görmektedir. 6G iletişimin temel performanslarına yönelik ultra güvenlik, daha yüksek verim, hizmet kalitesi (Quality of Service, QoS) ve devasa bağlantı gibi talepleri karşılamak amacıyla önerilmiştir (Mao vd., 2022). RSMA'nın RF sistemlerde birçok uygulamasının olmasına rağmen VLC literatüründe sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Genel olarak literatürde RF tabanlı NOMA yöntemi ile alakalı yapılan çalışmalar güç tahsisi, toplam veri iletim hızı, güç tüketimi ve enerji verimliliği gibi konulara odaklanmıştır.

Toplam veri iletim hızının maksimuma çıkarılması NOMA çalışmalarında en yaygın benimsenen amaçtır. Literatürde bu amaca yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Al-Abbasi ve So tarafından 2015 yılında, alt taşıyıcı tabanlı bir NOMA sisteminde toplam veri iletim hızı maksimizasyonu için güç tahsis problemi incelenmiş ve çözüm karmaşıklığını azaltmak için güç tahsis şeması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları NOMA'nın OFDMA'dan da daha iyi performans sergilediğini göstermektedir (Al-Abbasi & So, 2015). 2016 yılında Hanif ve arkadaşları tarafından yayınlanan makalede, aşağı yönlü iletim NOMA tabanlı çok girişli tek çıkışlı (Multiple Input Single Output, MISO) sistem için azaltma maksimizasyonu

teknikçi kullanılarak toplam veri iletim hızını maksimuma çıkaran optimal bir kaynak ön kodlayıcı tasarımı önerilmiştir. Sayısal sonuçlar, NOMA'nın geleneksel OMA şemalarına kıyasla daha iyi performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Hanif vd., 2016). 2016 yılında Zhang ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada, tek girişli tek çıkışlı (Single Input Single Output, SISO) NOMA sistemi için QoS kısıtına bağlı olarak toplam veri iletim hızının maksimuma çıkarılması incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda NOMA'nın OMA'ya göre toplam veri iletim hızı bakımından daha iyi olduğu ve kullanıcı sayısının artmasıyla performans artışının önemli derecede yükseldiği gösterilmiştir (Y. Zhang vd., 2016). 2017 yılında yapılan bir çalışmada Wang ve arkadaşları tarafından, aşağı yönlü iletim NOMA sistemlerinde ağırlıklı toplam veri iletim hızı (Weighted Sum Rate, WSR) maksimizasyonu için güç sırası ve QoS kısıtlamaları altında optimal güç tahsisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada QoS kısıtlamasının olduğu ve olmadığı durumda WSR için güç tahsisleri analitik olarak modellenmiştir (Wang vd., 2017). Kang ve Kim tarafından 2018 yılında, aşağı yönlü iletim NOMA sistemlerinde toplam veri iletim hızı açısından kullanıcı gruplandırması konusu incelenmiş ve kullanıcı gruplandırma problemi için hızlı bir optimal şema önerilmiştir (Kang & Kim, 2018). Manglayev ve arkadaşları tarafından 2016 yılında, optimum güç tahsis (Optimum Power Allocation, OPA) algoritması önerilmiştir. Söz konusu çalışmada farklı adillik değerleri kısıtı altında toplam veri iletim hızını artırmak amaçlanmıştır. Sayısal sonuçlar, NOMA yönteminde önerilen OPA algoritmasının OMA yöntemine göre genel sistem performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca adillik değeri arttıkça toplam veri iletim hızının azaldığı gösterilmiştir (Manglayev vd., 2016). Manglayev ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu çalışma, NOMA yönteminin adillik bakımından incelendiği ilk çalışmalardan biridir.

Artan enerji maliyetleri nedeniyle düşük güç tüketimi, 5G kablosuz ağlar için önemli bir hedeftir. Lei ve arkadaşları tarafından 2016 yılında, aşağı yönlü iletim NOMA sisteminde toplam güç tüketimini en aza indirmek amacıyla güç minimizasyonu algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin NOMA sisteminin performansını artırdığını göstermektedir (Lei vd., 2016). 2016 yılında yapılan bir çalışmada Li ve arkadaşları, aşağı yönlü iletim dikgen frekans bölmeli çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) tabanlı NOMA sistemlerinde QoS kısıtlaması altında toplam iletim gücünü en aza indirmeye yönelik dinamik kaynak tahsisi algoritması önermişlerdir. Simülasyon sonuçları önerilen algoritmanın hem OFDMA hem de mevcut NOMA tekniklerine kıyasla toplam iletim gücünü önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur (X. Li

vd., 2016). Farah ve arkadaşları tarafından 2018 yılında, 5G ve ötesi için dağıtılmış anten sistemlerinde aşağı yönlü iletim gücünü azaltmak için çeşitli kaynak tahsisi teknikleri sunulmuştur. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemlerin tek SIC yöntemine göre üstünlüğünü göstermiştir (Farah vd., 2018).

Enerji verimliliği (Energy Efficiency, EE), elde edilebilir toplam veri iletim hızı ile toplam güç tüketimi arasındaki oran olarak tanımlanır. Literatürde EE probleminin incelendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Zhang ve arkadaşları tarafından 2017 yılında, çok kullanıcı aşağı yönlü iletim NOMA sisteminde QoS kısıtlaması altında EE'nin en üst düzeye çıkarılması amaçlanmıştır. Sayısal sonuçlar NOMA'nın geleneksel OMA şemalarına kıyasla daha iyi EE performansı sergilediğini göstermektedir (Y. Zhang vd., 2017). Fang ve arkadaşları tarafından 2016 yılında, aşağı yönlü iletim NOMA sistemlerinde EE'yi en üst düzeye çıkarmak için alt kanal atama ve güç tahsisi, optimizasyon problemi olarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritma kullanılarak oluşturulan NOMA sisteminin, geleneksel OFDMA sistemine göre daha yüksek toplam veri iletim hızı ve EE sağladığını göstermektedir (F. Fang vd., 2016). Zhang ve arkadaşları tarafından 2018 yılında, aşağı yönlü iletim NOMA sistemleri için EE dinamik güç tahsisi incelenmiştir. Yapılan incelemede QoS ve maksimum iletim gücü kısıtlamaları dikkate alınmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritmaların etkinliğini göstermiştir (H. Zhang vd., 2018). Xiao ve arkadaşları tarafından 2018 yılında, aşağı yönlü iletim NOMA sistemlerinde EE ve SE arasındaki ilişki incelenmiş ve bu problemi çözmek için geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyon (Particle Swarm Optimization, PSO) algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, geliştirilmiş PSO algoritmasının, orijinal PSO algoritması gibi tipik şemalardan daha iyi EE performansı sergilediğini göstermektedir (Xiao vd., 2018).

MIMO kablosuz haberleşme sistemi, vericide ve alıcıda, uzamsal çoğullamayı kullanarak SE'yi artırabilen veya uzamsal çeşitlilik yoluyla iletim güvenilirliğini geliştirebilen birden fazla verici ve alıcı ile oluşturulur. Dolayısı ile NOMA sistemine doğrudan uygulanabilir. MIMO-NOMA çalışmaları genel olarak iki senaryo üzerinden yürütülmektedir. İlk senaryoda sistemde yalnızca iki kullanıcının bulunduğu durum, ikinci senaryoda ise sistemde birden çok kullanıcının bulunduğu durum için çalışmalar yapılmaktadır. Ding ve arkadaşları tarafından 2016 yılında, MIMO yönteminin NOMA sistemlerine uygulanması incelenmiş ve MIMO-NOMA'nın MIMO-OMA'dan daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir (Ding, Adachi, vd., 2016). 2016 yılında Ding ve arkadaşları, sıfıra zorlayıcı (Zero Forcing, ZF) ön kodlayıcı ve sinyal hizalamaya dayalı

algılamayı benimseyerek aşağı yönlü iletim ve yukarı yönlü iletim MIMO-NOMA sistemi önermişlerdir. Önerilen yeni MIMO-NOMA yöntemi önceden önerilen MIMO-NOMA yöntemi çalışmaları ile karşılaştırıldığında daha iyi performans sergilediği sayısal sonuçlar ile gösterilmiştir (Ding, Schober, vd., 2016). Zeng ve arkadaşları tarafından 2017 yılında, MIMO-NOMA ile MIMO-OMA karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar iki kullanıcı ve çok kullanıcı senaryolarında, MIMO-NOMA'nın MIMO-OMA'dan daha iyi olduğunu göstermektedir (M. Zeng vd., 2017).

Literatürde NOMA-VLC sistemleri ile ilgili birçok çalışma da bulunmaktadır. Chen ve arkadaşları tarafından 2019 yılında, NOMA'nın aşağı yönlü iletim VLC sistemleri için daha uygun olduğu gösterilmiştir (C. Chen vd., 2019). PD-NOMA'nın toplam veri iletim hızını OMA yöntemlerine göre daha fazla artırmasından dolayı VLC sistemlerine uygulanması ilgi görmektedir. Genel olarak literatür incelendiğinde farklı güç tahsis yöntemleri, toplam veri iletim hızı, farklı alıcı-verici ve aydınlatma senaryoları üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

2016 yılında Shen ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada, QoS ve adillik kısıtlamaları altında ulaşılabilir toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan hüzmleme tekniği önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen güç tahsis yöntemi normalde RF sistemleri için uygulanmaktadır. Simülasyon sonuçları, düşük optik güçlerde ve yüksek kanal korelasyonlarında OMA tabanlı yöntemlerden daha iyi performans sergilediğini göstermektedir (Shen vd., 2016). Marshoud ve arkadaşları 2016 yılında, NOMA tabanlı VLC sistemlerinde kullanıcıların kanal koşullarını dikkate alan kazanç oranı güç tahsis (Gain Ratio Power Allocation, GRPA) yöntemini önermişlerdir. Simülasyon sonuçları, statik güç tahsisine göre GRPA'nın sistem performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca yazarlar, fotodetektörlerin (Photodetector, PD) görüş açısı (Field of View, FOV) ve LED'lerin yarı güçteki iletim açısının değiştirilmesiyle toplam veri iletim hızının artırılabilirliğini de göstermiştir (Marshoud vd., 2016). Kızılırmak ve arkadaşları tarafından 2015 yılında, gerçekçi iç mekân kanal koşulları altında NOMA yöntemi VLC sistemine uygulanmıştır. Sayısal sonuçlar, ulaşılabilir veri hızı açısından NOMA'nın OFDMA'dan daha iyi performans sergilediğini göstermiştir (Kızılırmak vd., 2015). Yin ve arkadaşları tarafından 2016 yılında, iki kullanıcıli NOMA tabanlı VLC sistemi için kesinti olasılığı ve toplam veri iletim hızının kapalı formda ifadeleri türetilmiştir. Simülasyon sonuçları, NOMA'nın OFDMA'ya göre avantajlarını göstermektedir (Yin vd., 2016). Yang ve arkadaşları tarafından 2016 yılında, VLC sistemleri için kullanıcı adillik kısıtı altında

toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla bir güç tahsis algoritması önerilmiştir. Sayısal sonuçlar, önerilen güç tahsis algoritmasının geleneksel OFDM şemasına ve mevcut şemalara kıyasla daha iyi performans sergilediğini göstermektedir (Z. Yang vd., 2016). Fu ve arkadaşları tarafından 2018 yılında, keyfi sayıda çoğullanmış kullanıcıyla OFDM-NOMA tabanlı VLC sistemi için toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla hem kullanıcılarda hem de alt taşıyıcılarda güç optimizasyonu yapılmıştır. Sayısal sonuçlar, önerilen güç tahsis yönteminin statik güç tahsis yöntemine ve GRPA yöntemine göre önemli performans artışı sergilediğini göstermektedir (Fu vd., 2018). Li ve arkadaşları tarafından 2017 yılında, NOMA tabanlı VLC sistemi için simetrik SC ve simetrik SIC yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin geleneksel NOMA tabanlı VLC sistemlerine kıyasla hata yayılımı etkisini azalttığını göstermektedir. Yapılan bu çalışma, sistem performansı bakımından iyileşmeler olduğunu gösterse de bu çalışmada optimum performans için tam olarak güç tahsis yöntemi belirlenmemiştir (H. Li vd., 2017). Zhang ve arkadaşları tarafından 2017 yılında, QoS kısıtlaması altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak için kullanıcı gruplaması ve güç tahsisi için gradyan projeksiyon (Gradient Projection, GP) algoritması önerilmiştir. Sayısal sonuçlar, NOMA'nın OMA'dan daha yüksek toplam veri iletim hızı sağladığını göstermektedir (X. Zhang vd., 2017).

VLC sistemlerinde, sistem kapasitesini artırmak ve genişletmek için MIMO etkili bir teknik olarak kullanılmaktadır (L. Zeng vd., 2009). NOMA'nın MIMO VLC sistemlerinde kullanımı ile ilgili literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. Lin ve arkadaşları tarafından 2017 yılında, MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi herhangi bir güç tahsis yöntemi dikkate alınmadan deneysel olarak uygulanmıştır (Lin, Ghassemloooy, vd., 2017). Tek LED vericili NOMA tabanlı VLC sistemleri için geliştirilen güç tahsis yöntemleri doğrudan MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemlerine uygulanamaz. Chen ve arkadaşları tarafından 2018 yılında, MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi için normalize edilmiş kazanç farkı güç tahsis (Normalized Gain Difference Power Allocation, NGDPA) yöntemi önerilmiştir. Simülasyon sonuçlarında NGDPA yöntemi GRPA yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Toplam veri iletim hızı bakımından NGDPA'nın GRPA'dan daha iyi olduğu ve hem NOMA-NGDPA'nın hem de NOMA-GRPA'nın OFDMA'dan daha iyi olduğu gösterilmiştir (C. Chen vd., 2018).

Yukarıda verilen çalışmalar incelendiğinde, NOMA ve MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemleri için belirli kısıtlar altında toplam veri iletim hızı gibi sistem performansı artırılmış

olsa da aynı anda adillik, optik yoğunluk gibi birçok kısıtı bir arada dikkate alarak inceleyen çalışma bulunmamaktadır.

Yeni nesil çoklu erişim türü olarak kabul edilen RSMA'nın hız, spektral verimlilik, daha düşük hesaplama karmaşıklığı gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Ayrıca hem NOMA'yı hem de SDMA'yı gerçekleştirebildiğinden büyük ilgi çekmektedir (Mao vd., 2021). Genel olarak literatürde RF tabanlı RSMA yönteminin performansını iyileştirmek için güç tahsisi, toplam veri iletim hızı, güç tüketimi, ön kodlama yöntemi, EE ve SE gibi konularda çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

2016 yılında Clerckx ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada, tek katmanlı RS güçlü bir ortogonal olmayan iletim şeması ve çoklu kullanıcı durumunda kullanıcılar arası girişimi verimli bir şekilde yönetme kabiliyeti nedeniyle gerçekçi senaryolar için üstün SE ve EE elde etmek için önerilmiştir. Ayrıca MIMO sistemler için RSMA kullanımının avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur (Clerckx vd., 2016). Cao ve Yeh tarafından 2007 yılında, çoklu erişim iletişim sorunu hem toplamsal beyaz Gauss gürültü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) kanalı hem de ayırık hafızasız kanal için incelenmiştir. Her kullanıcının bir dizi sanal kullanıcı oluşturduğu ve tüm sanal kullanıcıların kodunun alıcıda başarıyla çözüldüğü bir dağıtılmış hız bölme (Distributed Rate Splitting, DRS) şeması sunulmuştur. Önerilen DRS şeması ile kullanıcıların veri hızını maksimuma çıkarmak amaçlanmıştır (Cao & Yeh, 2007). Mao ve arkadaşları tarafından 2018 yılında, kusurlu veya yetersiz kanal durumu bilgisi (Channel State Information, CSI) altında MISO sistemler için daha genel bir aşağı yönlü iletim RS şeması önerilmiş ve WSR'yi maksimize etmek amacıyla ağırlıklı minimum ortalama kare hata (Weighted Minimum Mean Square Error, WMMSE) algoritması önerilmiştir. Sonuç olarak, RSMA'nın SDMA ile güç alanı NOMA'yı köprülediği yani NOMA ve SDMA'nın, RSMA'nın alt kümesi olduğu ve bunlardan daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir (Mao vd., 2018b). Mao ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yayınlanan çalışmada, eşzamanlı kablosuz bilgi ve güç aktarım ağları (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT) için RS yöntemi önerilmiştir. Çalışmada enerji alıcılarının (Energy Receivers, ERs) minimum toplanan enerji kısıtlaması ve bilgi alıcılarının (Information Receivers, IRs) WSR'sini toplam iletim gücü kısıtlaması altında maksimuma çıkarma problemi için ön kodlayıcı tasarımı incelenmiştir. Problemi çözmek için WMMSE ve ardışık dışbükey yaklaşım (Successive Convex Approximation, SCA) tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Sonuç olarak RS destekli stratejinin, çok kullanıcılı doğrusal ön kodlama (Multi-User Linear Precoding, MU-LP) ve

NOMA yönteminden daha iyi WSR performansına ulaştığı gösterilmiştir. Dolayısıyla RS'nin aşağı yönlü iletim SWIPT ağları için üstün olduğu sonucuna varılmıştır (Mao vd., 2019b). Joudeh ve Clerckx tarafından 2016 yılında, aşağı yönlü iletim çok kullanıcı MISO RSMA tabanlı sistemlerde kusurlu CSIT durumunda toplam veri iletim hızı maksimizasyon problemi olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, iki kullanıcı ergodik hız (Ergodic Rate, ER) bölgesi, ağırlıklı ortalama toplam veri iletim hızı (Weighted Average Sum Rate, WASR) probleminin çözülmesiyle sayısal olarak elde edilmiştir ve ER bölgesini genişlettiği gösterilmiştir. Ayrıca RS tasarımlarının diğer yöntemleri geride bıraktığı ve QoS kısıtlı altında RS kullanımının avantajlarına dikkat çekilmiştir (Joudeh & Clerckx, 2016b). Mao ve arkadaşları tarafından 2018 yılında, iki kullanıcı MISO sistem için tek katmanlı RSMA kullanılarak EE sorunu maksimizasyon problemi olarak ele alınmış ve problemi çözmek için SCA tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Sonuç olarak, RSMA'nın SDMA ve NOMA'ya göre SE ve EE bakımından daha iyi olduğu gösterilmiştir (Mao vd., 2018a). Dai ve arkadaşları tarafından 2016 yılında, baz istasyonundaki (Base Station, BS) kusurlu CSI altında büyük MIMO sisteminde RSMA kullanılarak kullanıcıların ulaşılabilir hızını daha da artırmak için hiyerarşik hız bölme (Hierarchical Rate Splitting, HRS) yöntemi önerilmiştir. RS ve HRS için ön kodlayıcı tasarımı, asimptotik hız performansı ve güç tahsisi konuları incelenmiş ve geleneksel yayın şemalarına göre avantajlarını gösterilmiştir. Simülasyonlar, RS ve HRS'nin girişimi azalttığını ve özellikle kapsamlı MIMO ağlarında önemli hız artışları elde ettiğini göstermektedir. RS ve HRS'nin, vericideki kanal durum bilgisinin (Channel State Information at the Transmitter, CSIT) kusurlu olduğu durumlarda uygulanabilirliği gösterilmiştir (M. Dai vd., 2016). Dai ve Clerckx tarafından 2017 yılında, ilk defa RSMA ve milimetrik dalganın (Millimeter Wave, mmWave) etkileşimi incelenmiş ve geri bildirim karmaşıklığını azaltmak amacıyla mmWave sistemleri için yeni bir hibrit ön kodlama şeması önerilmiştir. Ayrıca RSMA'nın mmWave'de hız performansı kusurlu CSI kapsamında değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, hibrit ön kodlama şeması uygulandığında hız performansının arttığı ve geri bildirim gereksinimlerinin azaldığı gösterilmiştir (M. Dai & Clerckx, 2017). Dai ve arkadaşlarının 2016 yılında yapmış olduğu çalışmaya benzer şekilde Joudeh ve Clerckx tarafından 2017 yılında, çok gruplu çoklu yayın çerçevesindeki maksimum-minimum adillik (Max-Min Fair, MMF) elde etmek amacıyla hibrit bir RSMA ön kodlaması önerilmiştir ve RS'nin geleneksel doğrusal ön kodlamadan daha iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur (Joudeh & Clerckx, 2017). Rahmati ve arkadaşları tarafından 2019 yılında, insansız hava araçları (Unmanned Aerial Vehicles,

UAVs) için aşağı yönlü iletim mmWave senaryosunda NOMA ve RSMA yöntemleri EE açısından incelenmiştir. Sonuç olarak RSMA'nın NOMA'dan daha iyi olduğu ortaya konulmuştur (Rahmati vd., 2019). Joudeh ve Clerckx tarafından 2016 yılında, vericideki kusurlu CSI altında çok kullanıcı bir MISO sistemde MMF problemi incelenmiş ve bu problemi çözmek için WMMSE algoritması önerilmiştir. RS'nin geleneksel stratejilerden daha iyi performans sergilediği sayısal analizlerle gösterilmiştir (Joudeh & Clerckx, 2016a). Hao ve arkadaşları tarafından 2015 yılında, vericide kusurlu CSI altında sonlu oran geri bildirimine sahip iki alıcılı MISO iletişim sistemi için iki RS şeması önerilmiştir. Bu şemalar kullanılarak ergodik toplam veri iletim hızı incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, geri bildirim yükü sabitken her iki şemanın da geleneksel tek kullanıcı ve çok kullanıcı durumun değişimine göre önemli sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio, SNR) kazançları sunduğunu göstermektedir (Hao vd., 2015). 2019 yılında Mao ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada, MISO ve MIMO sistemlerde QoS kısıtlaması dikkate alınarak, RSMA'da WSR, SE ve EE araştırılmıştır. WSR ve EE problemlerini çözmek için sırasıyla WMMSE ve SCA tabanlı algoritmalar önerilmiştir. Sayısal sonuçlar, RS'nin, geleneksel MU-LP, OMA ve PD-NOMA'dan SE ve EE açısından daha iyi olduğunu göstermektedir (Mao vd., 2019a). Yang ve arkadaşları tarafından 2020 yılında, çok kullanıcı aşağı yönlü iletim SISO sistemlerde RSMA için toplam hız maksimizasyonu için SIC kısıtlaması altında optimum hız tahsisi ve güç kontrolü önerilmiştir. Simülasyon sonuçları RSMA'nın toplam veri iletim hızı açısından NOMA'dan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur (Z. Yang vd., 2020). Yang ve arkadaşları tarafından 2021 yılında, çok kullanıcı SISO ve MISO aşağı yönlü iletim RSMA sistemleri için hız talebini karşılamak amacıyla bir toplam hız maksimizasyon problemi formüle edilmiştir. Ortak mesajın ve özel mesajların iletim gücünü birlikte optimize ederek toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amaçlanmıştır. Sonuç olarak RSMA'nın NOMA ve SDMA'dan daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir (Z. Yang vd., 2021).

RSMA tabanlı VLC sistemleri için sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Genel olarak literatür incelendiğinde farklı güç tahsisi, toplam veri iletim hızı, ön kodlama yöntemleri, farklı alıcı-verici senaryoları, enerji ve spektral verimlilik gibi konularda çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

2020 yılında Tao ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada, ortak iletim (Joint Transmission, JT) tabanlı ön kodlamaya sahip çok hücreli VLC için tek katmanlı RSMA'nın uygulanması incelenmiştir. Yapılan çalışmada Lambert radyasyon modeli dikkate alınarak,

çok hücreli iç mekân VLC ağlarında klasik Shannon kapasite formülüne dayalı olarak SE'yi en üst düzeye çıkarmak için doğrusal bir ön kodlama önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, tek katmanlı RSMA'nın PD-NOMA'dan daha iyi SE sağladığını göstermektedir. Ek olarak Lambert modeliyle tek katmanlı RSMA'nın avantajlarının kullanıcı konumlarıyla ilgili olduğu gösterilmiştir (Tao vd., 2020). Naser ve arkadaşları tarafından 2021 yılında, RSMA tabanlı çok hücreli iç mekân VLC sisteminin performansı incelenmiştir. RSMA ve SDMA farklı senaryolar altında EE ve SE bakımından karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, RSMA'nın SDMA gibi diğer yöntemlere kıyasla SE ve EE açısından genel sistem performansını artırdığını göstermektedir (S. A. Naser vd., 2021). Naser ve arkadaşları 2020 yılında, iki kullanıcı bir sistemde RSMA tabanlı VLC sistemleri için vericideki kusurlu CSI, optimal ön kodlama, güç tahsisi vb. durumları incelemişlerdir. Farklı senaryolarda, WSR açısından RSMA, NOMA ve SDMA karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, RSMA'nın NOMA ve SDMA'ya göre elde edilebilir WSR açısından üstünlüğünü göstermektedir (S. Naser vd., 2020). Ma ve arkadaşları tarafından 2021 yılında, RSMA tabanlı MISO VLC ağları için hüzme oluşturma yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen RSMA destekli sistemin SDMA ve NOMA ile karşılaştırıldığında toplam veri iletimi açısından daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir (Ma vd., 2021). Xing ve arkadaşları tarafından 2022 yılında, hem tek hücreli hem de çok hücreli RSMA tabanlı VLC sistemleri için EE optimizasyonu araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ön kodlama ve güç tahsis problemi QoS gereksinimleri, LED'lerin dinamik çalışma aralıkları ve girişimin ortadan kaldırılması gibi kısıtlar altında formüle edilmiştir. Problemi çözmek için SCA algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, RSMA tabanlı VLC sisteminin NOMA ve SDMA tabanlı sistemlerden üstün EE ile daha iyi performans sergilediğini göstermektedir (Xing vd., 2022). Hu ve arkadaşları tarafından 2023 yılında, RSMA tabanlı SISO VLC sistemlerinde toplam veri iletim hızının artırılması araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, QoS ve SIC kısıtlamaları altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla ortak hız tahsisi ve güç kontrolü problemleri formüle edilmiştir. Formüle edilen bu problemleri çözmek için SCA algoritması önerilmiştir. Sayısal sonuçlar, RSMA'nın çok daha az karmaşıklıkla NOMA'ya çok yakın performans sergilediğini göstermektedir (Hu vd., 2023). Lai ve arkadaşları tarafından 2023 yılında, SIC hataları olan çok kullanıcı MISO VLC sistemleri için aşağı yönlü iletim RSMA'nın performansı incelenmiştir. Yapılan çalışmada aşağı yönlü iletim RSMA için SIC hataları altında bit hata oranı (Bit Error Rate, BER) ifadesi türetilmiştir. Hata yayılımını azaltmak amacıyla eşit olmayan hata koruması (Unequal Error Protection, UEP) tabanlı RS ön

kodlayıcı önerilmiştir. Sayısal sonuçlar önerilen RS ön kodlayıcının geleneksel RS ön kodlayıcılara göre üstün BER performansı sergilediğini ortaya koymuştur (Lai vd., 2023). Naser ve arkadaşları tarafından 2022 yılında, çok hücreli MISO VLC sistemlerinde koordineli hüzmelemenin (Coordinated Beamforming, CB) RSMA ile entegrasyonu önerilmiştir. Yapılan simülasyonlarda önerilen CB tabanlı RSMA yöntemi ile CB tabanlı SDMA yöntemi SE ve EE açısından karşılaştırılmış ve CB-RSMA'nın üstünlüğü gösterilmiştir (S. Naser vd., 2022). Maraqa ve arkadaşları tarafından 2024 yılında, optik eşzamanlı iletim ve yansıma yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey (Optical Simultaneous Transmission and Reflection Reconfigurable Intelligent Surface, OSTAR-RIS) tarafından desteklenen birçok kullanıcı iç mekân VLC sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemde toplam veri iletim hızı ve EE performansının iyileştirilmesi için, NOMA ve RSMA yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen OSTAR-RIS RSMA destekli VLC sisteminin hem toplam veri iletim hızı hem de EE açısından OSTAR-RIS NOMA tabanlı VLC sisteminden daha iyi performans sergilediğini göstermektedir (Maraqa vd., 2024).

Belirli kısıtlar altında RSMA tabanlı VLC sistemlerinden daha etkin bir şekilde yararlanmak için güç tahsis yöntemleri, ön kodlama tasarımı gibi konuların kapsamlı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

1.3. Görünür Işık Haberleşmesi (VLC)

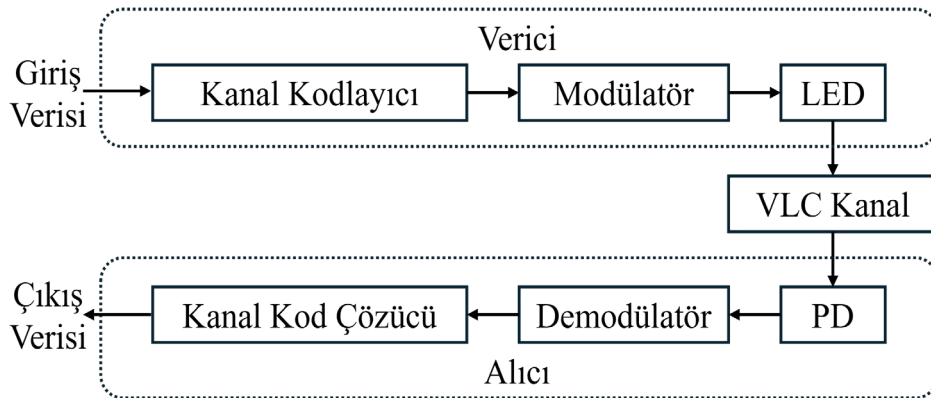
VLC, Şekil 1'de gösterildiği gibi spektrumun görünür bölgesinde (380-780 nm) çalışan ve ışık dalgalarının modülasyonu yoluyla verinin iletildiği kısa menzilli OWC sistemidir (Ghassemloooy vd., 2017). Literatürde 5G ve ötesi ağlarda iletişim için araştırmaların odaklandığı alanlardan biri çok büyük bir lisanssız bant genişliğine sahip olan görünür ışık spektrumunun kullanılmasıdır (Z. Zhang vd., 2019). VLC sistemleri, kablosuz iletişimi sağlamak amacıyla aydınlatma için halihazırda bulunan ışık altyapısından yararlanan bir teknolojidir. VLC, kablosuz sistemlere uygulanabilmesi ve ticarileştirilmesi amacıyla literatürde birçok araştırmacı ve mühendis tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve halen incelenmeye devam edilmektedir. Bu bağlamda, VLC uygulamalarında karşılaşılabilecek zorluklara karşı Japonya Elektronik ve Bilgi Teknolojisi Endüstrileri Birliği (Japan Electronics and Information Technology Industries Association, JEITA) ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics

Engineers, IEEE) tarafından JEITA CP-1221, JEITA CP-1222, JEITA CP-122 ve IEEE 802.15.7 standartları geliştirilmiştir (Khan, 2017).

VLC sistemleri diğer kablosuz haberleşme sistemleriyle karşılaştırıldığında birçok önemli avantaja sahiptir (Hussein & Elmirghani, 2015; Karunatilaka vd., 2015). Bu bağlamda bazı önemli avantajlar aşağıda listelenmiştir.

- VLC lisanssız spektruma sahiptir. Bu sayede kablosuz iletişim maliyeti düşmektedir. Ayrıca VLC spektrumu RF spektrumundan binlerce kat daha büyüktür.
- VLC doğası gereği güvenlidir. Özellikle iç mekân görünür ışık haberleşmesinde görünür ışık duvarlardan geçemez. Bu sayede alıcı-verici arasındaki veri iletişimi dışarı sızmadan fiziksel katmanda yüksek düzeyde güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca RF sistemlerine girişimde bulunmazlar.
- Haberleşme için VLC sistemleri, mevcut aydınlatma sistemlerini kullanır. Bu sayede mevcut aydınlatma sistemlerine ek cihazlar eklenerek VLC sistemi kurulabilir ve diğer sistemlerle karşılaştırıldığında maliyeti daha düşüktür.
- LED'ler geleneksel aydınlatma için kullanılan ışık kaynaklarına göre daha az enerji tüketir ve daha uzun ömürlüdür. VLC sistemlerinde LED'ler enerjilerinin büyük bir kısmını aydınlatma için kullanır ve bu nedenle VLC sistemler enerji tasarrufludur. Bu sayede çevre dostu iletişim teknolojisi olarak ifade edilebilir.

VLC sisteminin blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Görüldüğü üzere bir VLC sistemi LED ışığını modüle eden vericiden ve alınan ışığın değişiminden kullanıcıların verilerini elde eden alıcıdan oluşur. Verici ve alıcı VLC kanalı üzerinden birbirlerine bağlıdır.



Şekil 2. VLC sisteminin blok diyagramı

VLC sistemlerinde verici olarak genellikle LED'ler kullanılır. VLC sistemlerinde kullanılan LED'ler hem aydınlatma hem de haberleşme amacıyla kullanılmaktadır. LED'lerin hızlı anahtarlanma özeliği sayesinde insan gözü herhangi bir fark edilebilir titreşim olmadan sadece ortalama ışık yoğunluğunu fark edebilmektedir. Bu sayede, insan gözü üzerinde herhangi bir olumsuz etki oluşturmaz. Ayrıca aydınlatma standardı sağlanarak kablosuz haberleşmeyi gerçekleştirebilir (Uysal vd., 2016). İç ve dış mekân aydınlatmasında genellikle beyaz ışık kullanılmaktadır. Bunun nedeni beyaz ışık altındaki nesnelerin renklerinin doğal ışık altında görünen renklerine benzemesidir. Temelde sarı fosforlu mavi LED ve kırmızı-yeşil-mavi (Red-Green-Blue, RGB) LED kullanılarak beyaz ışık elde edilebilir. İlk olarak, sarı fosforlu mavi LED, sarı fosforla kaplanmış mavi LED'i kullanır ve düşük maliyeti sayesinde piyasada en yaygın olarak kullanılan beyaz LED'dir. Mavi ışığın sarı fosfor kaplamadan geçmesi ile beyaz ışık oluşur. Sarı fosfor tabakanın kalınlığının değiştirilmesi ile beyaz ışığın farklı çeşitleri oluşturulabilir. Ancak fosforun yavaş tepkisi modülasyon bant genişliğini birkaç MHz ile sınırlar. İkinci olarak, RGB LED kullanarak kırmızı, yeşil ve mavi ışığı doğru oranda birleştirilerek beyaz ışık üretilir (Chow vd., 2011; Le Minh vd., 2009). RGB LED'ler kullanılarak üretilen beyaz ışığın aydınlatma şartlarını sağlaması amacıyla renk kaydırmalı anahtarlama (Colour Shift Keying, CSK) VLC sistemleri için tasarlanmış bir modülasyon türüdür. CSK modülasyonunda RGB LED'ler ile üç farklı renk bandına ayrılan ışık spektrumunun, birbirine bağımlı bir şekilde modüle edilmesiyle haberleşme sonucundaki görünür ışığın istenilen sıcaklıkta beyaz renkli olması ve sabit şiddetli olması sağlanmaktadır (Luo vd., 2017). RGB LED'lerin modülasyon bant genişliği fosforlu mavi LED'lerin bant genişliğine göre daha yüksektir. Buna rağmen fosforlu mavi LED kullanımı, RGB LED kullanımına göre maliyet, uygulama kolaylığı gibi nedenlerle uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

LED'ler hem haberleşme hem de aydınlatma amacıyla kullanıldığından, VLC sistemlerinde kullanılacak modülasyon yöntemlerinin veri hızının yanında aydınlatma talebini de karşılaması gerekmektedir. Işık yoğunluğunun dalgalandığı bir ortamda uzun süre kalındığında göze zarar verdiği bilinmektedir. Bu nedenle VLC sisteminde kullanılacak olan modülasyonun ışık kırışması sorununu çözmesi gerekmektedir. VLC sistemleri IM/DD kullanır (Hranilovic, 2005). LED'ler tarafından yayılan ışığın yoğunluğunun değiştirilmesiyle veri iletimi sağlanır. IM/DD tekniğinde bilginin taşınması için sadece ışık şiddetinin kullanılması, iletimde kullanılan optik sinyallerin, RF sistemlerinden farklı olarak, gerçel ve pozitif değerli olmasını gerektirmektedir (Tuğcu, 2019). VLC sistemlerinde

kullanılan birçok modülasyon metodu bulunmaktadır. Genellikle LED'ler tarafından üretilen ışık açma-kapama anahtarlama (On-Off Keying, OOK) genlik modülasyonu ile modüle edilir, ancak başka modülasyon teknikleri de kullanılabilir. Örneğin darbe konum modülasyonu (pulse position modulation, PPM), OFDM ve CSK gibi modülasyon tekniklerinde kullanılabilir (Luo vd., 2017).

VLC sistemlerinde LED'ler tarafından gönderilen modüle edilmiş ışık sinyalini elde etmek için görüntü sensörleri veya PD'ler kullanılabilir (Pathak vd., 2015). Görüntü sensörü, kamera sensörü olarak da isimlendirilmektedir. Günümüzde akıllı telefonların hemen hemen hepsinde bulunan bu sensör, videoları veya görüntüleri yakalamaya yaramaktadır. Mobil cihazlar bu sayede kolayca VLC alıcılarına dönüştürülebilir. Fakat kamera sensörleri VLC sistemlerinde çok düşük veri hızı sağlamaktadır. PD'ler alınan ışığı yani optik gücü elektrik sinyaline dönüştüren yarı iletken cihazlardır. Bu sayede LED tarafından gönderilen optik sinyal, PD sayesinde elektrik sinyaline dönüştürülür. Yaygın olarak kullanılan iki tür PD bulunmaktadır. Bunlar, basit yapıda ve ucuz olan pin-PD ve çığ fotodedektörlerdir (Avalanche Photodetector, APD). APD'de çıkış akım seviyesi yüksektir fakat karmaşık bir yapıya sahiptir ve nispeten daha pahalıdır. VLC sistemlerinde pin-PD'ler ucuz ve daha basit yapıda oldukları için daha sık kullanılmaktadır (Hranilovic, 2005). APD ve pin-PD arasında genel bir karşılaştırma Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. pin-PD ve APD'nin karşılaştırılması (Hranilovic, 2005)

	pin-PD	APD
Modülasyon Bant Genişliği	10MHz – 10 GHz	100 MHz – 100 GHz
Foto-Akım Kazancı	1	$10^2 - 10^4$
Maliyet	Düşük	Yüksek
Karmaşıklık	Düşük	Yüksek
Fazladan Devre ve Güç Gereksinimi	Gerek yok	Yüksek eğilimleme gerilimi ve devresi gerekli

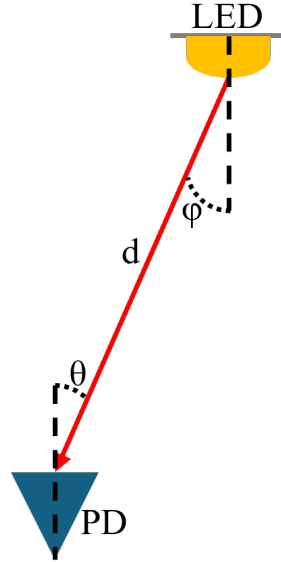
PD'nin yüzey alanı iletilen ışık sinyalini toplayacak kadar geniş olmalıdır. Ancak PD'ye gelen ışık yalnızca vericiden değil aynı zamanda yapay veya doğal ışık kaynaklarından da oluştuğu için alıcı önemli girişimlere maruz kalır. Bu nedenle kullanılan VLC alıcısının performansı, istenmeyen girişimleri ortadan kaldırmak amacıyla optik filtre kullanılarak artırılabilir. Genel olarak VLC alıcısı maliyet, performans gibi gereksinimleri karşılayacak şekilde seçilmelidir. Yüksek kapasiteli VLC sistemleri için en uygun seçenek

PD kullanımıdır (Hranilovic, 2005). Bu nedenle tez çalışmasında alıcı olarak PD kullanılmıştır.

1.3.1. Kanal Modeli

Literatürde OWC kanallarının modellenmesi için, optik verici-alıcı yapıları dikkate alınarak farklı çalışmalar önerilmiştir (Gfeller & Bapst, 1979; Barry vd., 1993; Carruthers & Kahn, 1997; Lopez-Hernandez & Betancor, 1997; Perez-Jimenez vd., 1997; Lopez-Hernandez vd., 2000). Önerilen bu çalışmalar kızılötesi (Infrared Radiation, IR) frekanslar için istatistiksel, matematiksel veya ışın izleme yöntemleri kullanılarak geliştirilmiştir.

Son yıllarda VLC sistemleri ile ilgili yapılan çalışmaların artmasıyla araştırmacılar görünür spektruma yoğunlaşmıştır. Bu nedenle IR kanal modellerini referans alan VLC kanal modelleri geliştirilmiştir. 2011 yılında Lee ve arkadaşları ışın izleme yöntemi ve üç yansımayı dikkate alan iç mekân kanal modeli elde etmişlerdir (Lee vd., 2011). Bu bağlamda VLC kanalı, direkt görüş (Line of Sight, LoS) ve direkt olmayan görüş (Non-Line of Sight, NLoS) durumu için modellenebilir. Şekil 3, iç mekân VLC sistemlerinde sıklıkla kullanılan alıcı-verici senaryosu için LoS bağlantı geometrisini göstermektedir.



Şekil 3. LoS VLC kanalı geometrisi

Burada LED tavana sabit ve zemine paralel olacak şekilde aşağı yönlü ve PD yerden belirli bir yükseklikte ve yukarı yönlü konumlandırılmıştır. Şekil 3'te ϕ ışınım açısını yani

LED'den çıkan ışının yüzey normali ile yaptığı açığı, θ ise ışının PD'ye geliş açısını yani PD'ye ulaşan ışının yüzey normali ile yaptığı açığı göstermektedir. VLC kanal kazancı büyük oranda ışınım açısına (φ) ve geliş açısına (θ) bağlıdır. Yansımaların dikkate alınmadığı Lambertian modelinin ele alındığı varsayılarak, VLC kanal kazancı matematiksel olarak Denklem (1) ile modellenir (Gfeller & Bapst, 1979; Barry vd., 1993; Lee vd., 2011; Yazgan vd., 2018).

$$h_{LoS} = \frac{A_{PD}(k+1)}{2\pi d^2} \cos^k(\varphi) T_s(\theta) g(\theta) \cos(\theta) \quad (1)$$

Denklemde A_{PD} PD'nin alanını, $k = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Omega_{1/2})}$ Lambert indeksini, d verici alıcı arasındaki mesafeyi, $T_s(\theta)$ optik filtre kazancını, $g(\theta)$ alıcı optik yoğunlaştırıcı kazancını temsil etmektedir. Ayrıca $\Omega_{1/2}$ LED'in yarı görüş açısıdır. Alıcının optik yoğunlaştırıcı kazancı $g(\theta)$ Denklem (2)'de verilmektedir.

$$g(\theta) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \theta_{con}}, & 0 \leq \theta \leq \theta_{con} \\ 0, & \theta \geq \theta_{con} \end{cases} \quad (2)$$

Burada n ve θ_{con} sırasıyla PD'nin kırılma indisi ve görüş açısını ifade etmektedir.

1.3.2. Gürültü Modeli

VLC sistemlerinde en önemli zorluklardan biri güneş ışığı, reklam tabelaları ve floresan lambalar gibi ortam ışığının oluşturduğu arka plan gürültüsüdür (Yu vd., 2013). Ortamda mevcut olan arka plan gürültüsü, alıcıda atış gürültüsüne neden olan DC fotoakımına yol açar. Buna ek olarak VLC sistem performansını düşüren bütün sistemlerde bulunan ısı gürültü gibi birçok farklı türde gürültü vardır. Alıcıda alan etkili transistör (Field Effect Transistor, FET) ön yükseltecinin kullanıldığı durumda atış ve ısı gürültü varyansı toplam gürültü varyansını oluşturur (Komine & Nakagawa, 2004; L. Zeng vd., 2008). Atış, ısı ve toplam gürültü varyansı sırasıyla (3), (4) ve (5) numaralı denklemler ile verilmiştir.

$$\sigma_{atış}^2 = 2qR_{PD}P_rB + 2qI_{bg}I_2B \quad (3)$$

$$\sigma_{isl}^2 = \frac{8\pi k_b T_k}{G} C_p A_{PD} I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k_b T_k \Gamma_F}{g_m} C_p^2 A_{PD}^2 I_3 B^3 \quad (4)$$

$$\sigma_n^2 = \sigma_{atış}^2 + \sigma_{isl}^2 \quad (5)$$

Tablo 2, Denklemler (3) ve (4)'te kullanılan parametreleri göstermektedir.

Tablo 2. Gürültü Parametreleri

Parametre	Tanım	Birim
q	Elektrik yükü	C
B	Anahtarlama bant genişliği	$ Mb/s$
I_{bg}	Arka plan gürültüsünden kaynaklı akım	A
I_2	Gürültü-bant genişliği faktörü	—
I_3	Gürültü-bant genişliği faktörü	—
k_b	Boltzman sabiti	J/K
T_k	Mutlak sıcaklık	K
C_p	Birim alanın sabit kapasitesi	F/m^2
G	Açık çevrim gerilim kazancı	—
Γ_F	FET'in kanal gürültü faktörü	—
g_m	FET'in geçiş iletkenliği	$S(Siemens)$
R_{PD}	PD'nin duyarlılığı	A/W

1.4. Çoklu Erişim Yöntemleri

Haberleşme sistemlerinde, aynı iletişim ortamını paylaşan birden fazla kullanıcının verimli ve kesintisiz bir şekilde hizmet alabilmesi için çeşitli MA yöntemleri bulunmaktadır. OMA, SDMA, NOMA ve RSMA gibi yöntemler, bu amaç doğrultusunda çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan MA yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

1.4.1. Dikgen Çoklu Erişim (OMA)

OMA yönteminde kullanıcılara verici tarafından aynı anda hizmet verilmediğinden, kullanıcıların mesajları girişim oluşturmamaktadır. OMA yöntemlerinden bazıları TDMA, FDMA, OFDMA ve CDMA'dır. RF sistemlerinde birden çok kullanıcıyı desteklemek amacıyla geçmişten günümüze bakıldığında farklı çoklu erişim teknikleri kullanılmıştır. 2G hücrel sistemlerde birden fazla kullanıcıyı desteklemek için TDMA ve FDMA, 3G

hücresel sistemlerde CDMA ve 4G ağlarında dikgen frekans bölmeli çoklu erişim OFDMA yöntemleri kullanılmıştır (Al-Ahmadi vd., 2018).

VLC sistemlerinde kullanılan geleneksel ortogonal çoklu erişim yöntemleri, TDMA (Ho vd., 2018; Hou vd., 2015) ve OCDMA (Guerra-Medina vd., 2012; Prucnal, 2006; Qiu vd., 2018; Salehi, 1989) şemalarıdır. TDMA’da, LED’lerin veya lazer diyotların (Laser Diode, LD) kapsama alanlarının örtüşmesinden dolayı oluşan girişimi kaldırmak amacıyla farklı kullanıcılara dikgen olacak şekilde farklı zaman dilimleri ayrılmaktadır. OCDMA’da ise farklı kullanıcıların aynı anda aynı frekans bandını kullanarak iletişim kurmaları için her kullanıcıya farklı dikgen optik kod ataması yapılmaktadır. VLC sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir diğer MA yöntemi de OFDMA (Armstrong, 2009; Dang & Zhang, 2012; Sung vd., 2015; Ling vd., 2018) şemasıdır. OFDMA’da farklı kullanıcılara farklı dikgen frekans alt taşıyıcıları atanmaktadır. Bu alt taşıyıcılar farklı kullanıcılara tahsis edilerek veri iletimi sağlanmaktadır.

OMA’nın avantajları arasında basit alıcı-verici tasarımı ve kullanıcılar arası girişimin önlenmesi yer almaktadır. Fakat OMA’da her verici kaynağı tek bir kullanıcıya hizmet verdiğinden, aynı anda hizmet verilen kullanıcı sayısı verici kaynaklarının toplam sayısı ile sınırlıdır. Bu nedenle SE sınırlanmaktadır (Mao vd., 2022).

1.4.2. Uzamsal Çoklu Erişim (SDMA)

SDMA, kullanıcıları uzamsal alanda ayırmak için doğrusal ön kodlamayı kullanmaktadır. RF sistemlerinde SDMA, çoklu anten ve yönlendirilmiş anten sistemleri kullanılarak uygulanmaktadır. RF haberleşmesinde SDMA genellikle MIMO sistemlerde kullanılmaktadır. SDMA yöntemi MIMO sistemlerde her kullanıcı için farklı yönlendirilmiş sinyaller oluşturarak girişimden kaçınmayı ve verimliliği artırmayı sağlamaktadır. Bu sayede, aynı frekansta ve zamanda birden fazla kullanıcıya hizmet verilebilmektedir (Clerckx & Oestges, 2013).

VLC sistemlerinde SDMA, optik sinyallerin yönlendirilmesi ve optik ön kodlama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. LED’lerin belirli bölgeleri aydınlattığı durumda kullanıcılar arasında uzamsal ayırım sağlanabilir. Bu sayede, aynı frekansta sinyallerin farklı alanlarda iletilmesi sağlanarak aynı ortamda birden fazla kullanıcıya hizmet verilebilmektedir (Carruther & Kahn, 2000; Kim & Lee, 2014; Z. Chen & Haas, 2015; Z. Chen vd., 2017).

SDMA, kusursuz CSI altında ve verici sayısı kullanıcı sayısından fazla olduğu durumda kullanıcı girişimlerini başarıyla bastırabilmektedir. Ayrıca, vericide doğrusal ön kodlama kullandığından ve her alıcı girişimi tamamen gürültü olarak değerlendirildiğinden verici ve alıcı karmaşıklıkları düşüktür. Fakat SDMA’da hizmet verilen kullanıcı sayısı verici sayısından fazla olduğunda performans büyük oranda düşmektedir. Kullanıcılar arasında başarılı bir şekilde girişim yönetimi sağlamak için yeterli sayıda vericiye ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca kusurlu CSI altında SDMA’nın performansı büyük oranda düşmektedir. Çünkü SDMA kusursuz CSI için tasarlanmış bir yöntemdir (Mao vd., 2022). SDMA yönteminde her kullanıcı, girişimi gürültü olarak değerlendirerek yalnızca istenen mesajın kodunu çözer. SDMA tabanlı VLC sistemlerinde kullanıcı m için sinyal girişim artı gürültü oranı (Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR) Denklem (6)’da verilmiştir. Analitik ifadeler verilirken işaretin gücü 1’e normalize edilmiştir.

$$\gamma_m = \frac{h_m^2 p_m}{\sum_{j=1, j \neq m}^M h_m^2 p_j + \sigma_m^2} \quad (6)$$

Burada h_m kullanıcı m ile LED arasındaki kanal kazancını, p_m kullanıcı m ($m = 1, 2, \dots, M$) için elektriksel güç tahsis değerlerini temsil etmektedir. SINR denklemi elde edildikten sonra herhangi bir m kullanıcısı için ulaşılabilir veri iletim hızı ve sistemde bulunan tüm kullanıcıların toplam veri iletim hızı sırasıyla Denklemler (7) ve (8) ile hesaplanabilir.

$$R_m = \frac{B}{2} \log_2(1 + \gamma_m) \quad (7)$$

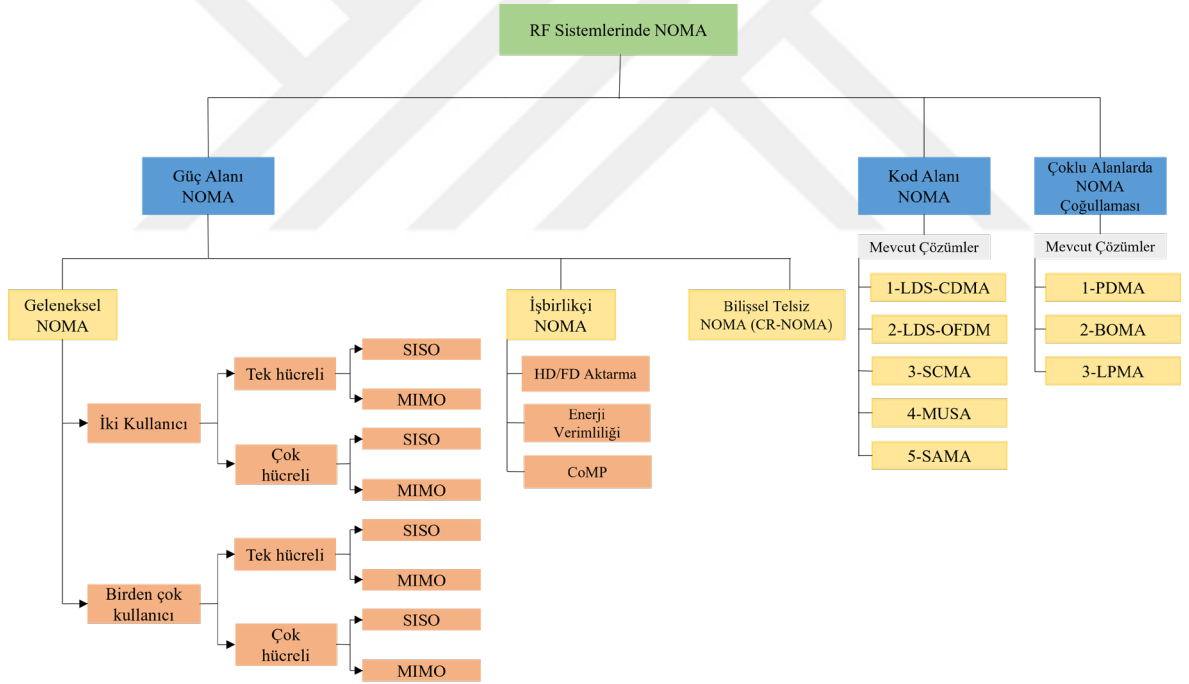
$$R_T = \sum_{m=1}^M R_m \quad (8)$$

1.4.3. Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA)

NOMA 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinde spektrum verimliliğini, veri iletim hızını ve bağlantı sayısını önemli derecede artırabilecek bir çoklu erişim yöntemi olarak tanımlanmıştır (Benjebbour vd., 2013; Ding, Lei, vd., 2017; Ding, Liu, vd., 2017; Ding vd., 2014). 1G’den 4G’ye kadar her kullanıcı dikgen frekans, zaman ve kod alanından yararlanır.

1G'den 4G'ye kadar kullanılan geleneksel MA teknikleri OMA olarak bilinir. OMA şemalarının aksine NOMA'da kullanıcılara ayrılan kaynaklar birbirlerine dik değildir. Yani aynı kaynakların aynı frekans, zaman ve uzay boyutlarında kullanmasına izin verilir. NOMA yönteminin avantajları arasında daha yüksek hücre sınırı verimi sunma, spektral verimliliği artırma, kullanımın adil olarak sağlanması ve düşük iletim gecikmesi yer almaktadır. Fakat bu avantajların sonucunda alıcı uygulama karmaşıklığı ve aynı kaynakları paylaşan kullanıcılar arasında girişim artar (L. Dai vd., 2015; Islam, Avazov, vd., 2017). Alıcı uygulama karmaşıklığını azaltmak için kullanıcı gruplama veya kullanıcı kümeleme yöntemleri kullanılır ve kullanıcılar arasında girişimi azaltma için vericide SC, alıcıda SIC gibi teknikler kullanılır.

RF iletişim sistemindeki NOMA yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 4'te verilmektedir. Şekilde NOMA'nın üç ana kategoriye ayrıldığı görülmektedir.



Şekil 4. RF literatüründeki NOMA yöntemlerinin sınıflandırılması (Al-Ahmadi vd., 2018)

PD-NOMA'da bulunan mevcut çalışmalar geleneksel NOMA, işbirlikçi NOMA ve bilişsel telsiz (Cognitive Radio, CR) NOMA (Y. Liu, Ding, El Kashlan, & Yuan, 2016; M. Zeng vd., 2016) şemalarını içeren sistem modeli kurulumuna göre bölünmüştür. Geleneksel PD-NOMA üzerindeki çalışmalar iki kullanıcı veya çok sayıda kullanıcı içeren ağ yapısına sahip ve tek hücreli veya çoklu hücreli senaryolarda SISO (Shin vd., 2017b; Z. Yang vd.,

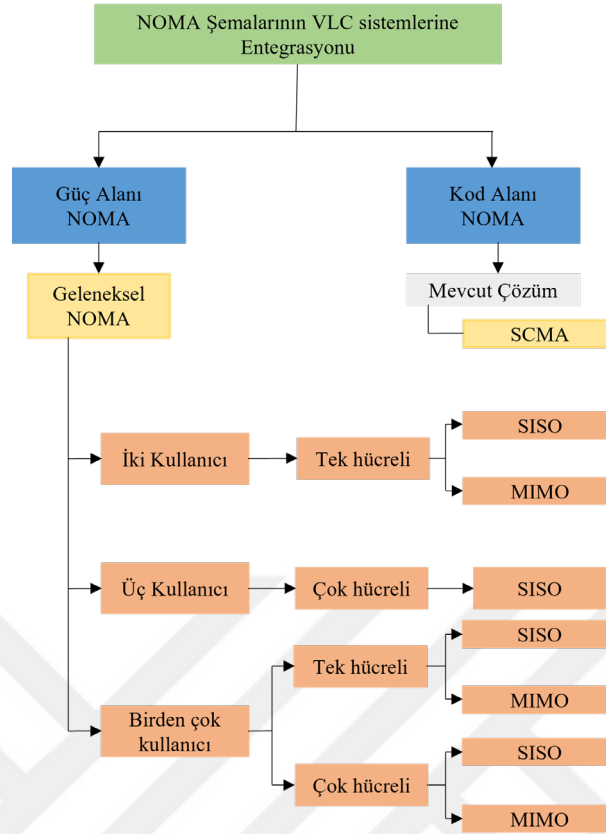
2018) veya MIMO (S. Ali vd., 2017; X. Chen vd., 2014; Ding, Adachi, vd., 2016; Hayashi vd., 2013; Lan vd., 2014; Nguyen vd., 2017) alıcı verici yapısına göre sınıflandırılır. İşbirlikçi PD-NOMA için yapılan çalışmalar arasında yarım çift yönlü/tam çift yönlü aktarma (Half-Duplex/Full-Duplex Relaying, HD/FD Relaying) (G. Liu vd., 2018), EE (Y. Liu, Ding, Elkashlan, & Poor, 2016) ve koordineli çok nokta (Coordinated multi-point, CoMP) (Shin vd., 2017a) bulunmaktadır. Kod alanı NOMA, aynı zaman-frekans kaynak bloğu içinde aynı anda birden fazla iletimi desteklemek için farklı kullanıcılara farklı kodlar atar (Cai vd., 2018). Kod alanı NOMA için mevcut çözümler arasında düşük yoğunluklu yayılma (Low-Density Spreading, LDS)-kod bölmeli çoklu erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) (Hoshyar vd., 2008), LDS-OFDM (Al-Imari vd., 2014), seyrek kodlu çoklu erişim (Sparse Code Multiple Access, SCMA) (Nikopour & Baligh, 2013), çok kullanıcı paylaşım erişimi (Multi-User Sharing Access, MUSA) (Yuan vd., 2016) ve ardışık girişim yok etmeye uygun çoklu erişim (Successive Interference Cancellation Amenable Multiple Access, SAMA) (X. Dai vd., 2014) bulunur. Çoklu alanlarda NOMA çoğullaması için kullanılan yöntemler arasında örüntü bölmeli çoklu erişim (Pattern Division Multiple Access, PDMA) (S. Chen vd., 2017), yapı taşı seyrek sinyal dizilim tabanlı dikgen çoklu erişim (Building Block Sparse-Constellation Based Orthogonal Multiple Access, BOMA) (D. Fang vd., 2016) ve kafes bölmeli çoklu erişim (Lattice Partition Multiple Access, LPMA) (D. Fang vd., 2016) bulunur.

VLC sistemlerinde veri iletim hızının artırılması için NOMA yöntemi önerilmiştir (Marshoud vd., 2016). NOMA VLC sistemlerinde:

- Mevcut LED'lerin sınırlı anahtarlama frekansına sahip olması nedeniyle yüksek veri hızı sağlanması,
- Yayılma kanalının yarı statik yapısı nedeniyle kanallar arası güç paylaşımı için kanal kazançlarının güvenilir bir şekilde tahmin edilmesinin sağlanması,
- Aydınlatma kısıtlamaları altında OMA yöntemlerine göre daha yüksek SNR sağlanması,

gibi avantajlara sahiptir (Kızılırmak vd., 2015; Yin vd., 2015).

VLC literatüründe bulunan NOMA yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 5'te verilmektedir. Şekilde VLC sistemleri için NOMA'nın iki ana kategoriye ayrıldığı görülmektedir.

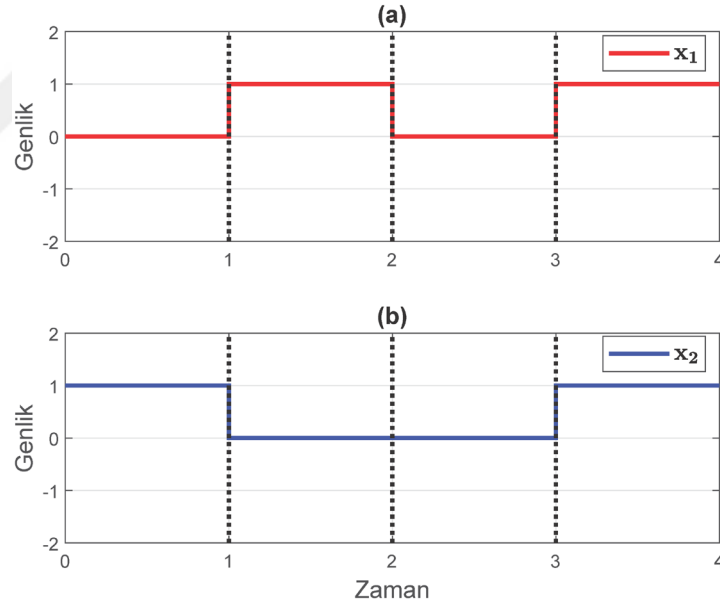


Şekil 5. VLC literatüründeki NOMA yöntemlerinin sınıflandırılması (Al-Ahmadi vd., 2018)

RF sistemlerine benzer şekilde VLC sistemlerinde de araştırmaların büyük bir kısmı PD-NOMA'ya odaklanmıştır. Geleneksel PD-NOMA üzerindeki çalışmalar iki kullanıcı tek hücreli SISO (Kızılırmak vd., 2015; Shen vd., 2017) ve MIMO (Lin, Ghassemlooy, vd., 2017), üç kullanıcı çok hücreli SISO (Marshoud vd., 2016; Guan vd., 2016; Huang vd., 2017) birden çok kullanıcı tek hücreli SISO (Yin vd., 2015; Z. Yang vd., 2016; Marshoud vd., 2017; Yin vd., 2016; Lin, Ye, vd., 2017; Tao vd., 2018) ve MIMO (Mitra & Bhatia, 2017) ve çok hücreli SISO (X. Zhang vd., 2017; Fu vd., 2018) ve MIMO (C. Chen vd., 2018) bulunmaktadır. VLC sistemlerinde kod alanı NOMA yöntemi kullanılarak yapılan az sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin, çözüm olarak SCMA'nın kullanıldığı Lin ve arkadaşlarının 2018 yılında yapmış olduğu çalışma incelenebilir (Lin vd., 2018). Tez çalışması kapsamında VLC sistemlerinde PD-NOMA kullanılmıştır. Bu nedenle PD-NOMA yöntemi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

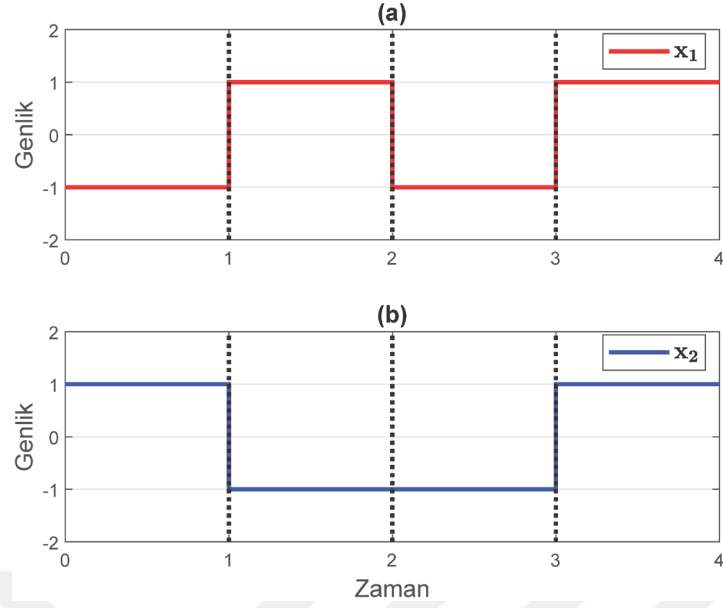
NOMA'da birden fazla kullanıcının aynı frekansı kullanarak aynı anda haberleşmeyi sağlaması büyük ilgi görmektedir. NOMA yöntemi iki temel işlem üzerine kurulmuştur. Bunlar verici tarafında SC ve alıcı tarafında SIC işlemidir. SC, verici tarafından çeşitli

alıcılara aynı anda bilgi iletme yöntemidir. Başka bir ifadeyle, vericinin aynı anda birden fazla kullanıcıya veri göndermesini sağlar. Birden fazla kullanıcının bulunduğu bir sistemde kullanıcıların sinyalleri üst üste bindirilir ve oluşan yeni sinyal kanal üzerinden iletilir (Chung, 2021; Islam, Zeng, vd., 2017). SC ilk defa 1972’de Cover tarafından önerilmiştir (Cover, 1972). 2012 yılında Vanka ve arkadaşları SC’nin performansını daha da iyileştirmek amacıyla deneysel bir platform tasarlayarak yazılım radyo sistemi kullanmışlardır (Vanka vd., 2012). Yapılan bu çalışma SC’nin pratikte uygulanmasını desteklemektedir. NOMA sistemlerinde SC’yi uygulamak için, kanal kazançları kötü olan kullanıcılara daha yüksek güç, kanal kazançları iyi olan kullanıcılara ise daha düşük güç tahsisi yapılır. Örneğin, iki kullanıcının bulunduğu bir sistemde x_1 kullanıcı 1’in x_2 ise kullanıcı 2’nin verilerini temsil etmekte ve her kullanıcıya 4 bit veri gönderileceği varsayımı yapılsın. Bu varsayım basit bir örnek olarak SC’nin çalışma prensibinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Şekil 6 (a) kullanıcı 1’in Şekil 6 (b) kullanıcı 2’nin verilerini göstermektedir.



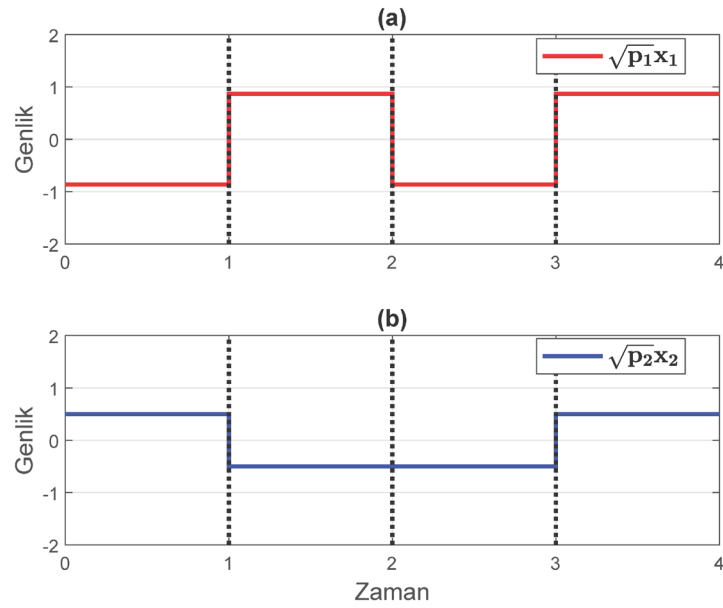
Şekil 6. Kullanıcı 1 ve 2'nin verileri

Verici tarafından iletilecek olan x_1 ve x_2 'nin verilerine ikili faz kaydırma anahtarlama (Binary Phase-Shift Keying, BPSK) modülasyonu uygulanmıştır. Şekil 7 (a) kullanıcı 1'in Şekil 7 (b) kullanıcı 2'nin modüle edilmiş verilerini göstermektedir.



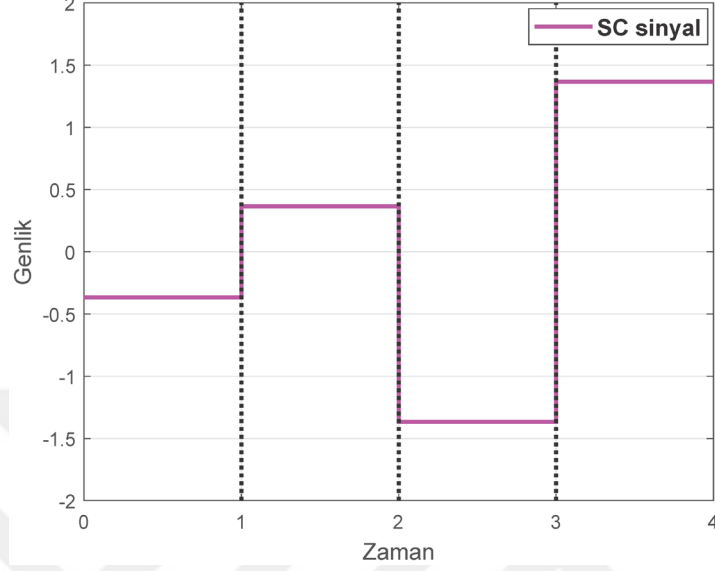
Şekil 7. BPSK modülasyonlu kullanıcı 1 ve 2'nin verileri

NOMA'nın doğası gereği verici tarafında SC'nin yapılması gerekmektedir. SC üst üste koymak, eklemek anlamına gelmektedir. Bu bağlamda modüle edilmiş x_1 ve x_2 'nin verilerini ölçeklendirmek amacıyla sabit güç tahsisi kullanılmıştır. Toplamı 1 olacak şekilde $p_1 = 0.75$ ve $p_2 = 0.25$ olarak seçilmiş ve iletilecek olan veriler ölçeklendirilmiştir. Şekil 8 (a) ve (b) sırasıyla kullanıcı 1 ve 2'nin ölçeklendirilmiş verilerini göstermektedir.



Şekil 8. Kullanıcı 1 ve 2'nin ölçeklendirilmiş verileri

Ölçeklendirilmiş sinyaller $\sqrt{p_1}x_1$ ve $\sqrt{p_2}x_2$ toplanarak Şekil 9’da verilen x yani SC’li sinyal elde edilir.



Şekil 9. Kullanıcılara iletilecek süperpozisyon kodlu x sinyali

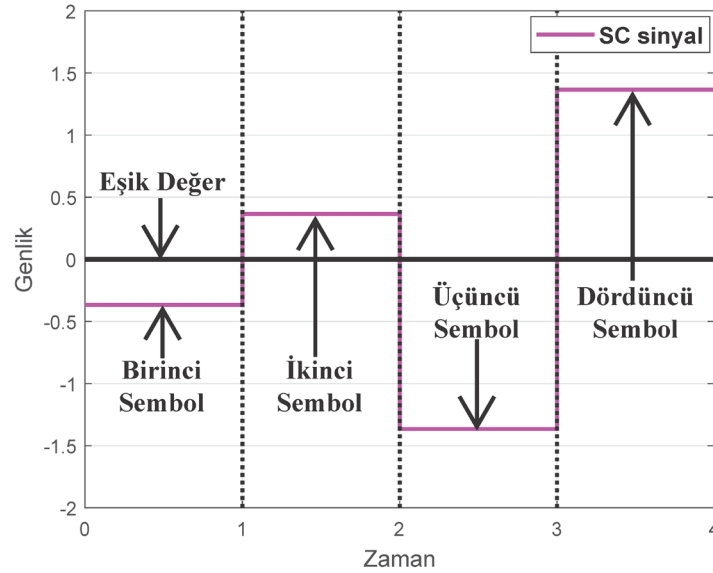
Şekil 9’da verilen x sinyali kanaldan kullanıcılara iletilen süperpozisyon kodlu NOMA sinyalidir. SIC kullanılarak x ’ten x_1 ve x_2 ’nin verileri elde edilebilir.

Birden fazla kullanıcının bulunduğu bir haberleşme sisteminde kullanıcı sinyallerinin birbirlerine oluşturduğu girişimi alıcı tarafında çözmek amacıyla SIC yöntemi kullanarak kullanıcıların verileri elde edilebilir (Saito vd., 2013; Choi, 2017). SIC yönteminin ana fikri üst üste gelen sinyallerin ardışık olarak çözülmesidir. SIC, kullanıcı sinyallerinin azalan güç seviyelerine göre kodunun çözüldüğü tekrarlı bir algoritmadır. Bu durumda ilk olarak güç seviyesi en yüksek olan kullanıcıya ait veriler çözülür. Daha sonra bir sonraki en yüksek güç seviyesi olan kullanıcının kodu çözülür ve bu işlem tüm kullanıcıların verilerinin kodu çözülene kadar tekrarlanır. Daha iyi anlaşılması amacıyla iki kullanıcılı NOMA tabanlı bir sistemde SIC adımları aşağıda verilmiştir.

- Adım 1: En yüksek güç verilen kullanıcının kodunu çözmek için kullanıcılara iletilen x sinyalinin kodu doğrudan çözülür. Örneğin birinci kullanıcıya verilen güç ikinci kullanıcıya verilen güçten büyükse ($\sqrt{p_1} > \sqrt{p_2}$) x ’in doğrudan kodunun çözülmesi x_1 ’i verir.

- Adım 2: Adım 1’de kodu çözülen birinci kullanıcının sinyali (x_1) güç tahsisi ile çarpılarak x sinyalinden çıkartılır. Örneğin, birinci adımda kodu çözülen x_1 sinyali ($\sqrt{p_1}x_1$) x ’ten çıkartılır. Bu durumda $x - \sqrt{p_1}x_1$ elde edilir.
- Adım 3: Düşük güç verilen ikinci kullanıcının verilerini elde etmek için adım 2’de elde edilen sinyalin kodu çözülmelidir. Bu durumda $x - \sqrt{p_1}x_1$ ’in kodunun çözülmesi x_2 ’yi verir.

SIC yöntemi için verilen adımların daha iyi anlaşılması amacıyla örnek olarak Şekil 9’da verilen SC’li sinyalden kullanıcı verilerini elde etmek için SIC yöntemi uygulanmıştır. Verilen örnekte Şekil 9’u elde etmek için kullanıcıların güç tahsis katsayıları $p_1 = 0.75$ ve $p_2 = 0.25$ olarak seçilmiştir. Bu durumda birinci kullanıcıya tahsis edilen güç ikinci kullanıcıya tahsis edilen güçten daha fazla olduğu için adım 1 uygulanarak x ’in kodu doğrudan çözülerek x_1 elde edilir. Verici tarafında BPSK modülasyonu kullanılmıştı. Bu nedenle alıcı tarafında doğrudan x ’e BPSK demodülasyonu uygulanarak x_1 elde edilir. BPSK demodülasyonu için eşik değeri sıfır olarak seçilmiştir. Bu durumda her sembol için eğer genlik değeri sıfırın üzerinde ise 1 aksi durumda 0 olarak seçilecektir. Şekil 10’da x sinyalinin grafiği verilmiştir.

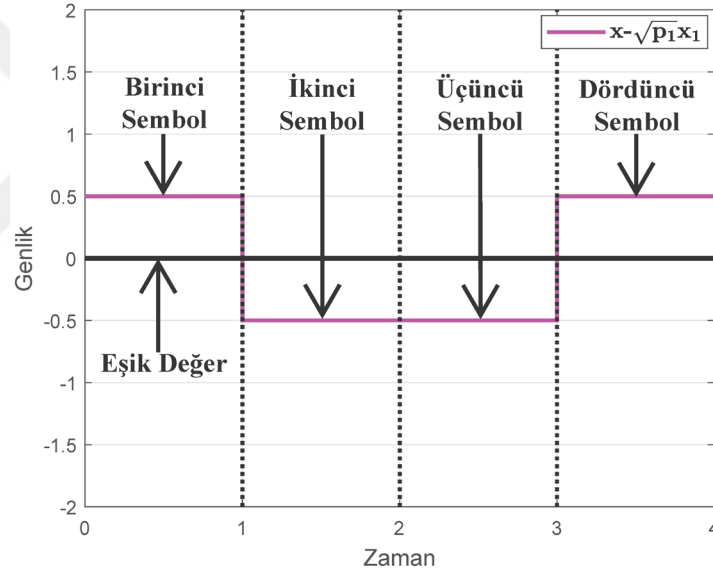


Şekil 10. Eşik değeri belirlenmiş süperpozisyon kodlu x sinyali

Şekil 10’da birinci ve üçüncü sembolün eşik değerin altında, ikinci ve dördüncü sembolün eşik değerin üstünde olduğu görülmektedir. Bu nedenle birinci ve üçüncü bitlerin

0 ve ikinci ve dördüncü bitlerin 1 olduğuna karar verilir. Böylece Şekil 6 (a)'da verilen x_1 sinyali elde edilmiş olur. Başka bir ifadeyle, x sinyaline doğrudan demodülasyon uygulanarak x_1 elde edilmiştir. Bu durumda x 'in x_2 bileşenine sahip olduğu göz ardı edilmiştir. Çünkü birinci kullanıcıya daha yüksek güç tahsisi verildiğinden x_2 parazit olarak değerlendirilmiş ve görmezden gelinmiştir.

SIC sürecinin birinci adımı tamamlandıktan sonra ikinci adıma geçilir. İkinci adımda ilk olarak x_1 ile birinci kullanıcıya tahsis edilen güç çarpılarak x 'den çıkartılır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta x_1 modüle edilmiş formda x 'de bulunur. Bundan dolayı x 'den çıkartılması gereken x_1 'in modüle edilmiş formda yani demodülasyon yapılmadan önceki formda olması gerekir. İkinci adım gerçekleştirildikten sonra Şekil 11 ile gösterilen durum elde edilir.

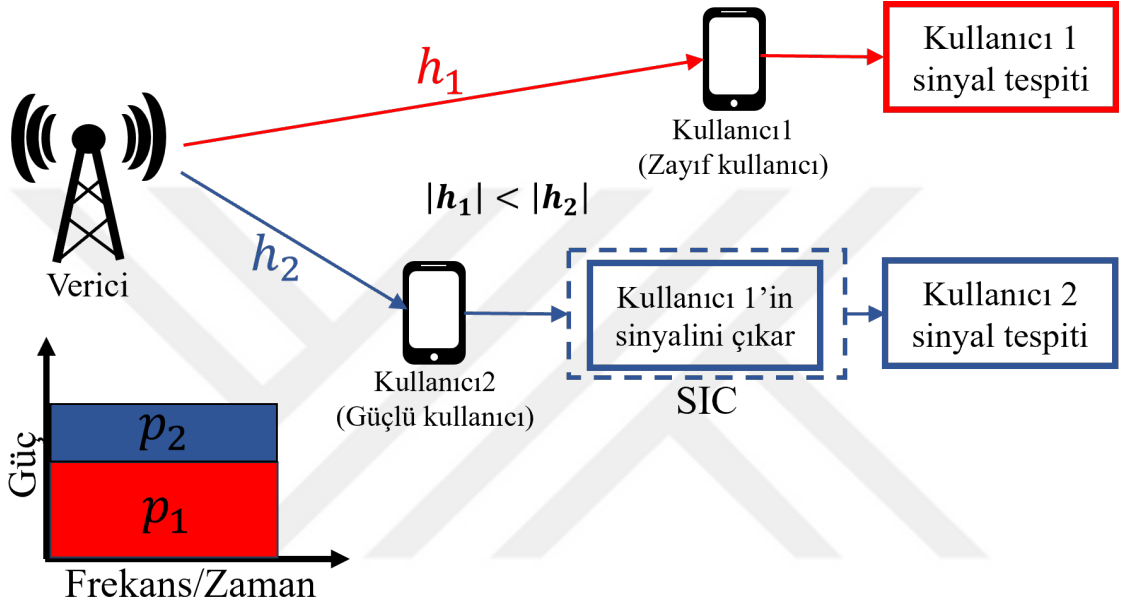


Şekil 11. Kullanıcı 1'in verileri x 'den çıkartıldıktan sonra SC'li sinyal

Bu işlem sonucunda SIC sürecinin ikinci adımı da tamamlanmıştır. Üçüncü adımda Şekil 11'de birinci ve dördüncü sembolün eşik değerinin üstünde, ikinci ve üçüncü sembolün eşik değerinin altında olduğu görülmektedir. Bu nedenle birinci ve dördüncü bitlerin 1 ve ikinci ve üçüncü bitlerin 0 olduğuna karar verilir. Böylece Şekil 6 (b)'de verilen x_2 sinyali elde edilmiş olur.

PD-NOMA yönteminde aynı zaman, kod ve frekans alanında birden fazla kullanıcının verileri üst üste bindirilerek vericiden toplamsal olarak çıkar. PD-NOMA'da farklı kullanıcıların sinyallerine farklı güçler tahsis edilir. Sinyaller farklı güç seviyelerinde

iletildiği için güç tahsisi kritik bir öneme sahiptir. Güç tahsisi, kullanıcıların toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla kanal kazançlarına göre belirlenir. Kanal kazancı düşük olan kullanıcı zayıf kullanıcı olarak kabul edilir ve bu nedenle Şekil 12’de gösterildiği gibi vericideki toplam iletim gücünün büyük bir kısmı zayıf kullanıcıya tahsis edilmelidir. PD-NOMA’nın temel prensibi, verici tarafında SC ve alıcı tarafında SIC yöntemlerinin kullanılmasına dayanır.



Şekil 12. İki kullanıcılı PD-NOMA için sistem modeli

Şekil 12, bir verici ve iki kullanıcının bulunduğu aşağı yönlü iletim PD-NOMA sistemini göstermektedir. Şekilde kullanıcı 2'nin kanal kazancının kullanıcı 1'den daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durumda kullanıcı 1 zayıf ve kullanıcı 2 güçlü kullanıcıdır. PD-NOMA prensibine göre vericide kullanıcı 1 ve 2'nin sinyalleri farklı güç seviyelerinde SC uygulanarak iletilir. Bu durumda, vericiden iletilen SC'li sinyal Denklem (9)'da verilmiştir.

$$x = \sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2 \quad (9)$$

Denklemden p_1 ve p_2 ($p_1 > p_2$) sırasıyla kullanıcı 1 ve kullanıcı 2'nin güç tahsis katsayısını, x_1 ve x_2 kullanıcı 1 ve kullanıcı 2'nin modüle edilmiş sinyalini temsil eder. Kullanıcı 1 ve kullanıcı 2'de alınan sinyal sırasıyla Denklemler (10) ve (11)'de verilmiştir.

$$y_1 = h_1 x + n_1 \quad (10)$$

$$y_2 = h_2 x + n_2 \quad (11)$$

Sırasıyla h_1 ve h_2 kullanıcı 1 ve kullanıcı 2'nin kanal kazancını ve n_1 ve n_2 AWGN'yi temsil eder. Kullanıcı 1'de alınan sinyalin açık hali Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1 x + n_1 \\ &= h_1 (\sqrt{p_1} x_1 + \sqrt{p_2} x_2) + n_1 \\ &= h_1 \sqrt{p_1} x_1 + h_1 \sqrt{p_2} x_2 + n_1 \end{aligned} \quad (12)$$

$p_1 > p_2$ olduğundan, y_1 'in doğrudan kodunun çözülmesi x_1 sinyalini verecektir. Burada x_2 bileşenini içeren terim bir girişim oluşturmaktadır. Uzak kullanıcı için SINR Denklem (13)'te verilmiştir.

$$\gamma_1 = \frac{p_1 |h_1|^2}{p_2 |h_1|^2 + \sigma_1^2} \quad (13)$$

Kullanıcı 1 için ulaşılabilir veri iletim hızı Denklem (14)'te verilmiştir.

$$R_1 = \log_2(1 + \gamma_1) = \log_2 \left(1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{p_2 |h_1|^2 + \sigma_1^2} \right) \quad (14)$$

Kullanıcı 2'de alınan sinyalin açık hali Denklem (15)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} y_2 &= h_2 x + n_2 \\ &= h_2 (\sqrt{p_1} x_1 + \sqrt{p_2} x_2) + n_2 \\ &= h_2 \sqrt{p_1} x_1 + h_2 \sqrt{p_2} x_2 + n_2 \end{aligned} \quad (15)$$

Kullanıcı 2 daha iyi bir kanal kazancına sahip olduğundan, ilk olarak kullanıcı 1'in sinyalini tespit eden, kaldıran ve ardından kendi sinyalini tespit eden SIC yöntemini kullanır. Kullanıcı 1'in mesajının (SIC yönteminden önce) kodunun çözülmesi için kullanıcı 2'deki SINR Denklem (16)'da verilmiştir.

$$\gamma_{1 \rightarrow 2} = \frac{p_1 |h_2|^2}{p_2 |h_2|^2 + \sigma_2^2} \quad (16)$$

Kullanıcı 2'nin kullanıcı 1'in sinyalini algılama oranı Denklem (17)'de verilmiştir.

$$R_{1 \rightarrow 2} = \log_2(1 + \gamma_{1 \rightarrow 2}) = \log_2 \left(1 + \frac{p_1 |h_2|^2}{p_2 |h_2|^2 + \sigma_2^2} \right) \quad (17)$$

Kullanıcı 1'in sinyalinin SIC kullanılarak kaldırılmasından sonra kullanıcı 2'nin SNR'ı Denklem (18)'de verilmiştir.

$$\gamma_2 = \frac{p_2 |h_2|^2}{\sigma_2^2} \quad (18)$$

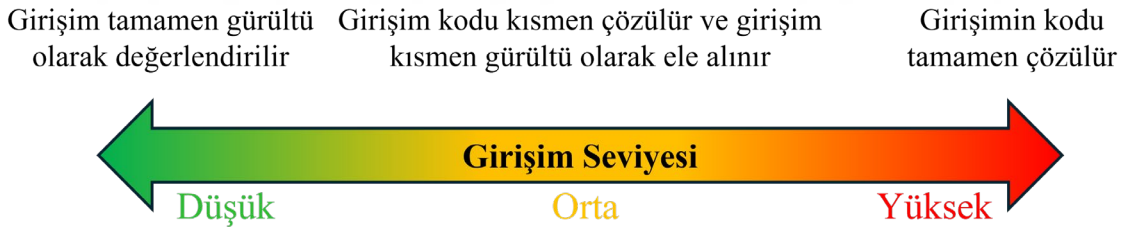
Kullanıcı 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızı Denklem (19)'da verilmiştir.

$$R_2 = \log_2(1 + \gamma_2) = \log_2 \left(1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{\sigma_2^2} \right) \quad (19)$$

1.4.4. Hız Bölmeli Çoklu Erişim (RSMA)

RSMA, spektral verimliliği ve çeşitli koşullar altında girişime karşı dayanaklılığı daha da artırmasından dolayı 6G için aday MA şeması olarak ileri sürülmüştür (Mao vd., 2022). RS fikri ilk olarak Carleial tarafından 1979 yılında iki kullanıcılı SISO girişim kanalı (Interference Channel, IC) için tanıtılmıştır (Carleial, 1978). RSMA yöntemi ise ilk olarak Rimoldi ve Urbanke tarafından 1996 yılında SISO çoklu erişim kanalı (Multiple Access Channel, MAC) için tanıtılmıştır (Rimoldi & Urbanke, 1996). RSMA yönteminde vericide RS alıcıda SIC kullanır. Bu yöntemde kullanıcı mesajları ortak ve özel bölümlere ayrılır. Bu sayede RSMA yöntemi girişimin kodunu kısmen çözme ve girişimi kısmen gürültü olarak işleme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle RSMA, QoS ve veri iletim hızı için umut vericidir. Vericide ortak mesajlar birleştirilerek ortak akışlara kodlanır ve kullanıcılar tarafından kodunun çözülmesi gerekir. Benzer şekilde özel mesajlar özel akışlarla kodlanır ve bu sayede yalnızca ilgili kullanıcı tarafından kodu çözülür. Alıcıda her kullanıcı ortak akışların kodunu çözer, SIC uygular ve kendi özel akışının kodunu çözer. Daha sonra her kullanıcı, kendi mesajını elde etmek için kendi özel ve ortak mesajını birleştirir (Mao vd., 2018b).

Mevcut MA yöntemlerinde girişim yönetim yaklaşımları OMA'da kullanıcılara dikgen kaynaklar tahsis ederek girişimin önlenmesi, SDMA'da girişimi gürültü olarak ele almak ve NOMA'da kod çözme girişimi olarak sınıflandırılabilir. Yeni nesil MA şemalarının, kodu çözülecek veya gürültü olarak ele alınacak girişim miktarının, girişim düzeyine göre uyarlanabilir olması öngörülmektedir. Şekil 13'te gösterildiği gibi girişim düzeyi orta olduğunda girişim kısmen çözülür ve kısmen gürültü olarak işlenir. RSMA, özel durumlar olarak OMA ve NOMA'yı içeren genel bir MA yöntemidir. Tablo 3'te gösterildiği gibi, RSMA'nın esnek yapısı tüm girişim seviyelerinde iyi performans göstermesini sağlar. Girişimin düşük veya yüksek olduğu durumlarda RSMA ortak ve özel akışların güçlerini ayarlayarak otomatik olarak SDMA veya NOMA gerçekleştirebilir. RSMA doğal olarak SDMA ve NOMA arasında köprü oluşturur. Sonuç olarak RSMA yöntemi, birden çok vericinin kullanıldığı haberleşme sistemlerinde ortaya çıkan kusurlu CSIT'e karşı doğası gereği sağlamdır. Ayrıca girişimi tamamen gürültü olarak ele almak ve girişimin kodunu tamamen çözmek gibi iki uçta çalışmak yerine girişim seviyesine uyum sağlar. Bu sayede RSMA, mevcut MA şemalarını kapsayarak onlardan daha iyi performans gösterebilen genel bir MA yöntemidir (Mao vd., 2022).

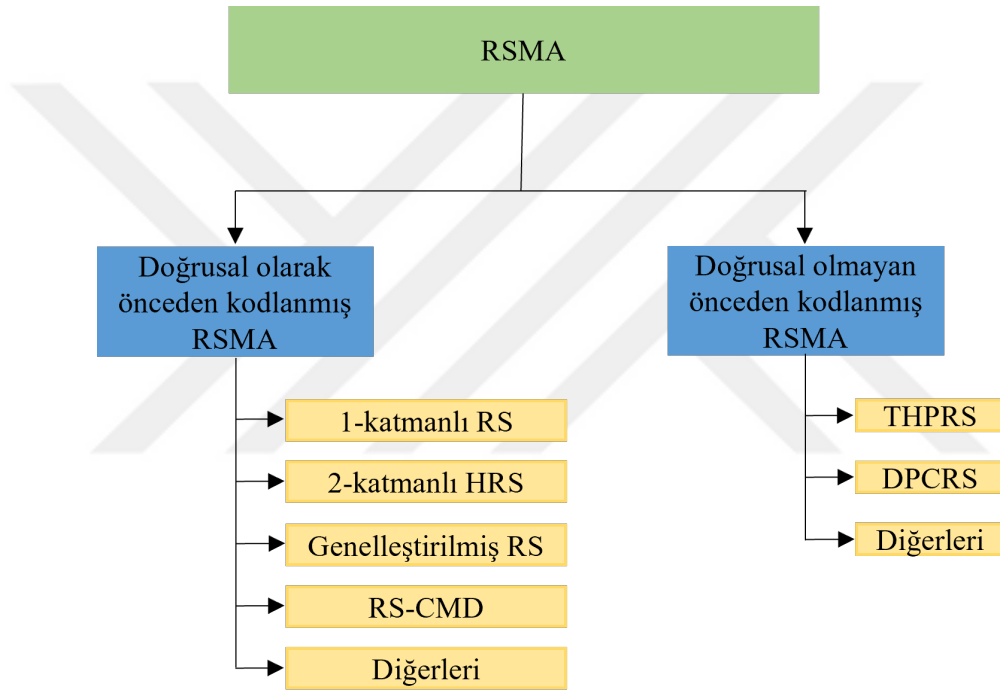


Şekil 13. Girişim seviyesine göre kodu çözülecek ve gürültü olarak ele alınacak girişim miktarı (Mao vd., 2022)

Tablo 3. SDMA, NOMA ve RSMA için girişim seviyelerinin karşılaştırılması (Mao vd., 2022)

Girişim Seviyeleri	SDMA	NOMA	RSMA
Düşük	Uygun	Tam uygun değil	Uygun
Orta	Tam uygun değil	Tam uygun değil	Uygun
Yüksek	Tam uygun değil	Uygun	Uygun

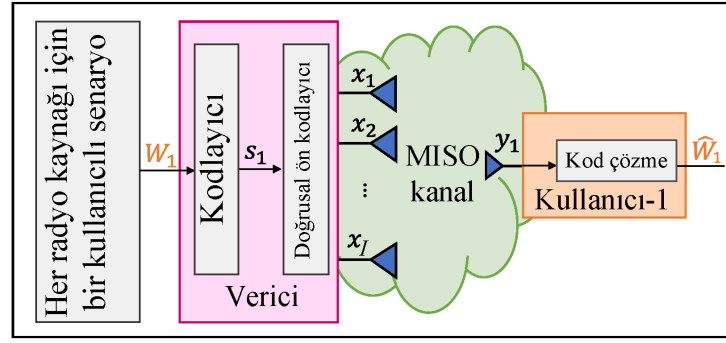
Şekil 14'te RSMA yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere doğrusal olarak önceden kodlanmış RSMA tek katmanlı RS, iki katmanlı HRS (M. Dai vd., 2016), genelleştirilmiş RS (Mao vd., 2018b), RS-ortak mesaj kod çözme (Common Message Decoding, CMD) (Alameer Ahmad vd., 2019) ve diğer yöntemlerden oluşmaktadır. Doğrusal olmayan önceden kodlanmış RSMA Tomlinson-Harashima ön kodlu hız bölme (Tomlinson-Harashima Precoded Rate Splitting, THPRS) (Flores vd., 2018, 2021), kirli kâğıt kodlu hız bölme (Dirty Paper Coded Rate Splitting, DPCRS) (Mao & Clerckx, 2020) ve diğer yöntemler olarak sınıflandırılmıştır.



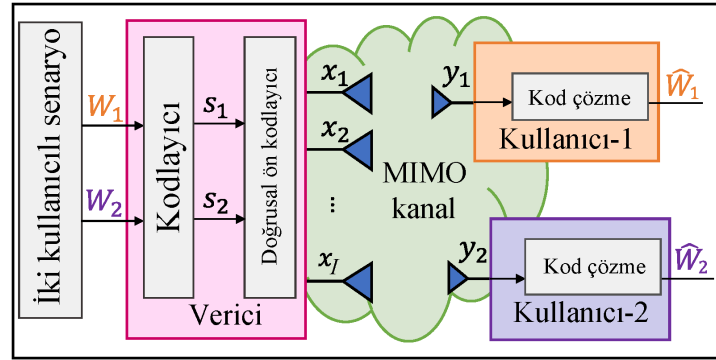
Şekil 14. RSMA yöntemlerinin sınıflandırılması (Mao vd., 2022)

Tez çalışması kapsamında tek katmanlı RS kullanılmıştır. Bu nedenle tek katmanlı RS yöntemi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. RSMA yöntemlerinin temelini tek katmanlı RS oluşturmaktadır. Tek katmanlı RS mükemmel CSIT (Mao vd., 2018a; Clerckx vd., 2020; H. Chen vd., 2020; Flores vd., 2020; Zhou vd., 2022; Matthiesen vd., 2021), kusurlu CSIT (Hao vd., 2015; Joudeh & Clerckx, 2016b; Piovano vd., 2016; Lu vd., 2018; Medra & Davidson, 2018; Joudeh & Clerckx, 2016a) ve çok antenli BC (Dizdar vd., 2020, 2021; Flores vd., 2020; Mao vd., 2021; Yin vd., 2021) için literatürde birçok çalışmada incelenmiştir.

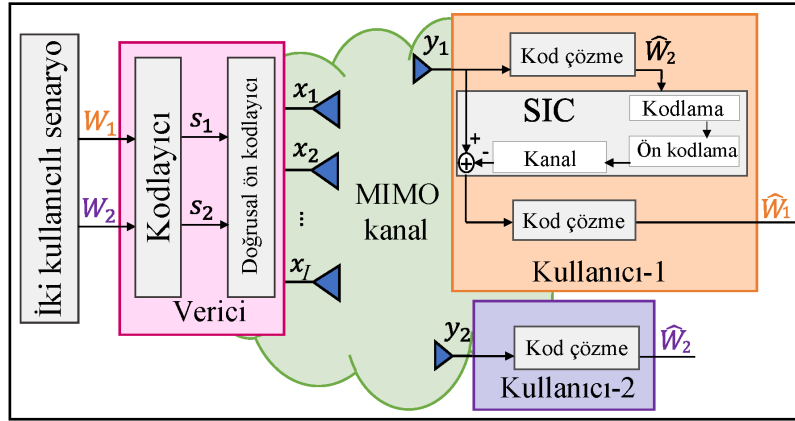
OMA, SDMA, NOMA ve RSMA yöntemlerini karşılaştırmak için Şekil 15'te vericinin I adet antenle donatıldığı iki kullanıcı bir örnek verilmiştir.



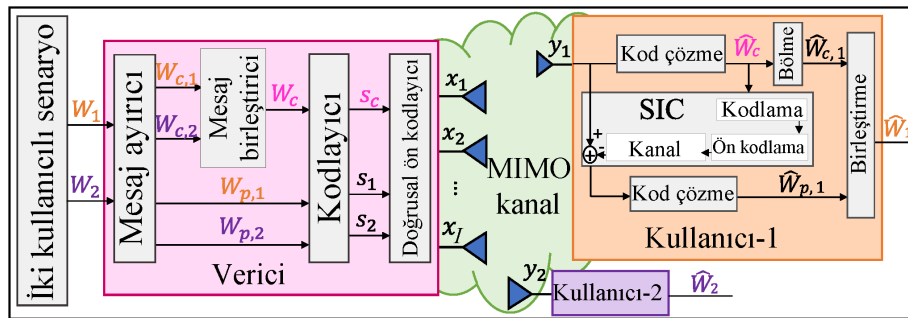
(a) OMA



(b) SDMA



(c) NOMA (SC-SIC)



(d) RSMA (1-katmanlı RS)

Şekil 15. OMA, SDMA, NOMA ve RSMA yöntemleri için iki kullanıcı MISO iletim modeli (Mao vd., 2022)

Şekil 15 (a)'da OMA için kullanıcı 1'in radyo kaynağının tamamını kullandığı görülmektedir. Bu durumda kullanıcı 2'nin iletişim için beklemesi gerekmektedir. Şekil 15 (b)'de SDMA için, vericide iki kullanıcının mesajı birbirlerinden bağımsız iki akış halinde doğrusal olarak önceden kodlanır. Her kullanıcı diğer akıştan gelen girişimi gürültü olarak değerlendirir ve kendi akışının kodunu doğrudan çözer. Şekil 15 (c)'de NOMA için, kullanıcı mesajları bağımsız olarak akışlar halinde kodlanır ve vericide SC kullanılarak üst üste bindirilerek kullanıcılara iletilir. Bu durumda kanal durumuna göre bir kullanıcının (yani kullanıcı 2'nin) veri akışının kodunun her iki kullanıcı tarafından çözülmesi gerekir. Şekil 15 (d)'de RSMA için verici, her kullanıcının W_m mesajını ortak $W_{c,m}$ ve özel $W_{p,m}$ olarak iki kısma böler. $W_{c,1}$ ve $W_{c,2}$ ortak mesaj W_c 'de birleştirilir. Bu durumda W_1 ve W_2 'den üretilen üç mesaj W_c , $W_{p,1}$ ve $W_{p,2}$ vericide birbirlerinden bağımsız doğrusal olarak önceden kodlanır. Her kullanıcı öncelikle tüm özel akışları gürültü olarak değerlendirerek ortak akış s_c 'nin kodunu çözer. Alınan sinyalden kodu çözülen ortak akış çıkartıldıktan sonra her kullanıcı diğer kullanıcıların özel akışlarını gürültü olarak değerlendirerek amaçlanan özel akışın (s_m) kodunu çözer (Clerckx vd., 2016; Mao vd., 2022).

Tablo 4'te tek katmanlı RS, OMA, SDMA ve NOMA için mesajların akışlara eşleştirilmesi gösterilmiştir. RS yöntemi mesaj bölünmesini ve güç tahsisini ortak akışa ve özel akışa ayarlar. Ortak akış, girişimin bir kısmının kodunun çözülmesine ve geri kalan kısmın diğer kullanıcıların özel akışlarına gürültü olarak işlenmesine olanak tanır. RSMA yönteminde, W_m 'nin doğrudan s_m 'ye kodlanacağı şekilde ortak akışa ($p_c = 0$) güç tahsis edilmemesiyle Şekil 15 (b)'de gösterilen SDMA elde edilir. Ortak mesaj kullanılarak alıcıda hiçbir girişimin kodu çözülmez ve s_1 ile s_2 arasındaki girişim tamamen gürültü olarak değerlendirilir. Benzer şekilde RSMA'nın Şekil 15 (c)'de gösterilen NOMA yöntemine indirgenmesi için W_2 'nin s_c 'ye ($W_c = W_2$) ve W_1 'in s_1 'e kodlanması ve s_2 'nin ($p_2 = 0$) kapatılmasıyla ulaşılır. Bu durumda kullanıcı 1, kullanıcı 2'nin mesajının yarattığı girişimi tamamen çözer. OMA'da kanal kazancı daha yüksek olan kullanıcıya ilk iletim yapılır. Bu durumda kullanıcı 1'in kanal kazancı kullanıcı 2'nin kanal kazancından daha yüksek olduğu varsayılarak yalnızca kullanıcı 1 planlandığında elde edilir ($p_c = 0, p_2 = 0$).

Tablo 4. İki kullanıcılı MISO iletim modelinde mesajların akışlara eşleştirilmesi (Clerckx vd., 2020)

	s_1	s_2	s_c
SDMA	W_1	W_2	-
NOMA	W_1	-	W_2
OMA	W_1	-	-
Tek katmanlı RS	$W_{p,1}$	$W_{p,2}$	$W_{c,1} W_{c,2}$

Amaçlanan kullanıcı tarafından kodu çözülür ve diğer kullanıcı tarafından gürültü olarak değerlendirilir

Her iki kullanıcı tarafından kodu çözülür

RSMA yönteminde her kullanıcının mesajı W_m olmak üzere, ortak mesaj $W_{c,m}$ ve özel mesaj $W_{p,m}$ olarak ikiye ayrılır. Tüm kullanıcıların ortak mesajları, tek bir ortak mesaj W_c 'de birleştirilir ve tüm kullanıcılar tarafından paylaşılan kod çizelgesi kullanılarak ortak bir s_c akışında kodlanır. W_c 'nin tüm kullanıcılar tarafından çözülmesi gerekir. Tüm kullanıcıların özel mesajları ayrı ayrı s_m akışına kodlanır ve sadece ilgili kullanıcı tarafından çözülür. Tek bir vericiden kullanıcılara iletilecek olan sinyal Denklem (20)'de verilmiştir.

$$x = \sqrt{p_c} s_c + \sum_{m=1}^M \sqrt{p_m} s_m \quad (20)$$

Kullanıcı m 'de alınan sinyal Denklem (21)'de verilmiştir.

$$y_m = h_m \sqrt{p_c} s_c + h_m \sum_{j=1}^M \sqrt{p_j} s_j + n_m \quad (21)$$

Her m kullanıcısı ilk önce tüm özel akışlardan gelen paraziti gürültü olarak değerlendirerek ortak akış s_c 'nin kodunu $\hat{W}_c$ 'ye çözer. $\hat{W}_c$ daha sonra SIC kullanılarak alınan sinyalden çıkarılır. Böylece m kullanıcısı, diğer özel akışlardan kalan paraziti gürültü olarak değerlendirerek kendi özel akışı s_m kodunu $\hat{W}_{p,m}$ 'ye çözer. Kullanıcı m , $\hat{W}_{c,m}$ 'yi $\hat{W}_c$ 'den çıkararak ve $\hat{W}_{c,m}$ 'yi $\hat{W}_{p,m}$ ile $\hat{W}_m$ 'de birleştirerek orijinal mesajı yeniden oluşturur. Kullanıcı m için sırasıyla ortak ve özel akışların kodunun çözülmesine yönelik veri iletim hızları Denklemler (22) ve (23)'te verilmiştir. Analitik ifadeler verilirken gönderilen işaretin güç normalizasyonu 1'e eşit kabul edilmiştir.

$$R_{c,m} = \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_c}{h_m^2 \sum_{j=1}^M p_j + \sigma_m^2} \right) \quad (22)$$

$$R_{p,m} = \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_m}{h_m^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M p_j + \sigma_m^2} \right) \quad (23)$$

Tüm kullanıcıların ortak mesajı s_c 'yi başarılı bir şekilde çözebilmesi için, tüm kullanıcıların ortak hızlarının minimum değeri seçilmelidir. Bu durumda ortak mesajın hızı Denklem (24)'te gösterildiği gibi seçilmelidir.

$$R_c = \min\{R_{c,1}, \dots, R_{c,M}\} \quad (24)$$

C_m , m kullanıcısının ortak hızdaki katkısı Denklem (25) ile ifade edilmiştir.

$$\sum_{m=1}^M C_m = R_c \quad (25)$$

Ortak mesaj hızı C_m ve özel mesaj hızı $R_{p,m}$ verildiğinde m kullanıcısının toplam veri iletim hızı Denklem (26) ile hesaplanabilir.

$$R_{m,toplam} = C_m + R_{p,m} \quad (26)$$

1.5. Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon, bir problemin çözümü olarak en iyi değeri bulma süreci olarak tanımlanabilir. Birçok optimizasyon yöntemi vardır. Genel olarak optimizasyon algoritmaları deterministik ve yaklaşık metot olarak iki kategoriye ayrılabilir. Deterministik algoritmalar belirli bir giriş için her zaman aynı çıktıyı üreten algoritmalar ve global optimum değerine kesin olarak ulaşır. Yaklaşık metot algoritmaları sezgisel ve meta-sezgisel olarak iki gruba ayrılabilir. Bu algoritmalar işlem yükü yüksek ve çok karmaşık optimizasyon problemlerinde oldukça fazla tercih edilmektedir. Yaklaşık metot algoritmalarının her çalışmasında, çözüm çok farklı olmasa da popülasyondaki dizeler veya çözümler farklı olur ve global optimum değerine çok yakın değerlere ulaşır. Bazı sezgisel algoritmalar tek bir problemi çözmek için kullanılırken meta-sezgisel algoritmalar, çok

1.5.1. PSO Algoritması

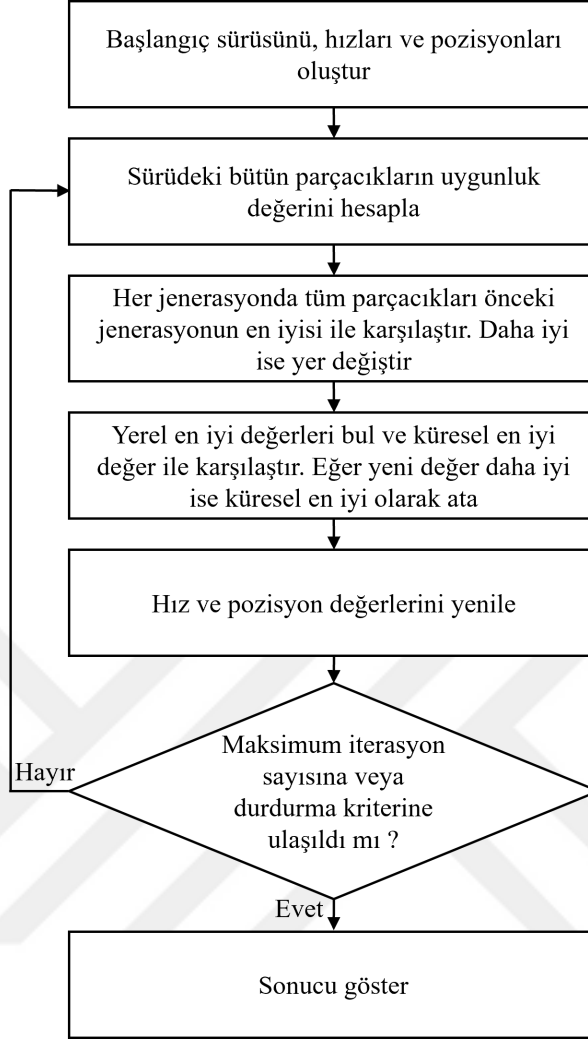
1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından PSO algoritması önerilmiştir (Kennedy & Eberhart, 1995). Bu algoritma, yiyecek kaynaklarını bulmada kuş sürülerinin veya balık sürülerinin davranışlarından esinlenen popülasyona dayalı meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. PSO algoritması rastgele çözümler üreterek başlar ve her rastgele çözüme parçacık denir. Tüm parçacıklar bir araya gelerek sürüyü oluşturur. Sürüde bulunan her parçacığın kendine ait bir başlangıç noktası ve hızı vardır. Her parçacık arama uzayında, kişisel en iyi yani parçacığın şu ana kadar bulduğu en iyi çözüme ve küresel en iyi yani sürüdeki herhangi bir parçacığın bulduğu en iyi çözüme göre hareket eder. Her iterasyonda sürüde bulunan her parçacık hızını ve konumunu mevcut kişisel ve küresel en iyi değerine göre günceller. Parçacığın yeni konumu değerlendirilerek kişisel ve küresel en iyi değerler buna göre güncellenir. Bu süreç maksimum iterasyon sayısı veya istenilen bir çözüme ulaşma gibi bir durum kriteri sağlanana kadar devam eder. Parçacık hızları algoritmanın her iterasyonunda Denklem (29)'da gösterildiği gibi güncellenir.

$$V_{i,t+1} = \omega V_{i,t} + c_1 r_1 (pbest_{i,t} - X_{i,t}) + c_2 r_2 (gbest^t - X_{i,t}) \quad (29)$$

Burada $V_{i,t+1}$ i 'inci parçacığın $t + 1$ iterasyonu için hesaplanan hız vektörünü, ω eylemsizlik ağırlığını, c_1 ve c_2 ivmelenme katsayısını, r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında rastgele sayıları, $pbest_{i,t}$ i 'inci parçacık için şimdiye kadar elde edilen kişisel en iyi konumu, $gbest^t$ popülasyon için şimdiye kadar elde edilen küresel en iyi konumu ve $X_{i,t}$ t 'inci iterasyon için i 'inci parçacığın mevcut konumunu temsil etmektedir. Hız vektörleri güncellendikten sonra parçacıkların konumları güncellenir. Bir parçacığın yeni konumu Denklem (30)'da gösterildiği gibi hız vektörünün mevcut konuma eklenmesiyle güncellenir.

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + V_{i,t+1} \quad (30)$$

Burada, $X_{i,t+1}$ $t + 1$ iterasyonundaki parçacık i 'nin yeni konumunu ifade etmektedir. Tüm bu adımlardan sonra algortmada bir iterasyon tamamlanmış olur. PSO algoritmasının akış diyagramı Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. PSO algoritması akış diyagramı

1.5.2. SBO Algoritması

SBO algoritması Moosavi ve Bardsiri tarafından 2017 yılında geliştirilmiştir (Moosavi & Bardsiri, 2017). Bu algoritma saten çardak kuşlarının vahşi doğada üreme davranışlarından esinlenilerek oluşturulmuş bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. Erkek saten çardak kuşları özenle bir çardak inşa ederek dişi saten çardak kuşlarının beğenisini kazanmaya çalışır. Ayrıca erkek saten çardak kuşları kendi çardaklarının seçilme olasılığını artırmak için çevresindeki çardaklardan çeşitli materyalleri kendi çardaklarına taşıyabilirler. Bu nedenle erkek saten çardak kuşları yuvanın zarar görmesini önlemek amacıyla rakiplerinin çabalarına karşı direnmelidir. Dişi saten çardak kuşu ise var olan çardaklar arasında en dikkat çekici olanı belirleyerek oraya yerleşir. Dişi saten çardak kuşunun çardak seçme olasılığı Denklem (31) ile hesaplanır.

$$Prob_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{NB} fit_n} \quad (31)$$

Burada fit_i , i 'inci çözümün uygunluğunu ve NB çardak sayısını temsil etmektedir. Uygunluk değeri fit_i Denklem (32) ile hesaplanır.

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)} & , \quad f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)| & , \quad f(x_i) < 0 \end{cases} \quad (32)$$

Burada $f(x_i)$ i 'inci konumdaki (i 'inci çardak) amaç fonksiyonunun değeridir. Erkek saten çardak kuşu en iyi çözüme yaklaşmak için çardağın konumunu her iterasyonda Denklem (33)'te gösterildiği gibi günceller.

$$x_{ik}^{t+1} = x_{ik}^t + \lambda_k \left(\left(\frac{x_{jk} + x_{elite,k}}{2} \right) - x_{ik}^k \right) \quad (33)$$

Burada x_{ik}^t t 'inci iterasyondaki i 'inci bireyin k boyutlu bileşenini, x_{jk} şu ana kadar bulunan en uygun konumun k boyutlu bileşenini, $x_{elite,k}$ tüm popülasyonun mevcut küresel optimal konumunun k boyutlu bileşenini, λ_k Denklem (34) ile hesaplanan adım miktarını temsil etmektedir.

$$\lambda_k = \frac{\alpha}{1 + G_j} \quad (34)$$

Burada α en büyük adım boyunu ve G_j Denklem (31) ile elde edilen çardak seçme olasılığını temsil etmektedir. Çoğu durumda güçlü erkek saten çardak kuşu, zayıf erkek saten çardak kuşundan malzeme çalar ve hatta çardaklarını yok eder. Bu nedenle algoritmanın her iterasyonunun sonunda rastgele değişiklikler Denklem (35)'te gösterildiği gibi normal dağılıma uygundur.

$$x_{ik}^{t+1} \sim N(x_{ik}^t, \varsigma^2) \quad (35)$$

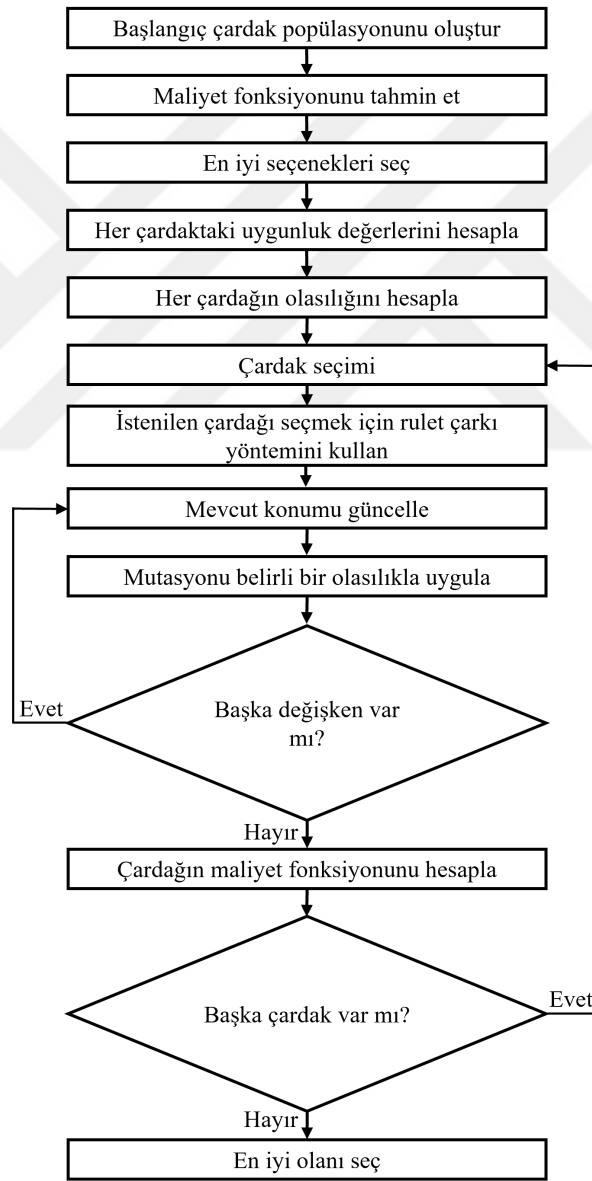
Denklem (35) Denklem (36) olarak ifade edilebilir.

$$N(x_{ik}, \varsigma^2) = x_{ik}^t + \left(x_{ik}^t * N(0,1) \right) \quad (36)$$

Burada ς alan genişliğinin bir oranıdır ve Denklem (37) ile hesaplanır.

$$\varsigma = z * (ub - lb) \quad (37)$$

Burada ub üst sınır, lb alt sınır, z yayılma faktörünü ifade etmektedir. SBO algoritmasının akış diyagramı Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. SBO algoritması akış diyagramı (Talaat vd., 2021)

1.5.3. SOS Algoritması

2014 yılında Cheng ve Prayogo tarafından SOS algoritması önerilmiştir (Cheng & Prayogo, 2014). Bu algoritma, doğadaki organizmalar arasındaki simbiyotik ilişkiden esinlenen popülasyona dayalı meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. SOS algoritması başlangıç, karşılıklı, ortaklık ve asalaklık aşaması olmak üzere dört adımda yürütülür. Başlangıçta her organizma Denklem (38) ile arama uzayında rastgele oluşturulur.

$$Org_{i,z} = l_z + rand(0,1) * (ub_z - lb_z) \quad (38)$$

Burada $i = 1, 2, 3, \dots, NP$, $z = 1, 2, 3, \dots, D$ ve NP ekosistemdeki organizma sayısı ve D ise optimize edilecek parametre sayısıdır. Ayrıca ub_z ve lb_z sırasıyla i 'inci organizmanın üst ve alt sınırını temsil etmektedir. Başlangıç aşamasından sonra karşılıklı aşamasında iki organizma karşılıklı olarak etkileşime girer ve her iki organizmada etkileşimden yararlanır. Her iki organizma karşılıklı etkileşime dayanarak hayatta kalma oranını artırmaya çalışır. Karşılıklı aşamasının matematiksel modeli Denklemler (39) ve (40) ile gösterilmektedir.

$$Org_i^{t+1} = Org_i^t + rand(0,1) * (Org_{best} - MV * BF_1) \quad (39)$$

$$Org_j^{t+1} = Org_j^t + rand(0,1) * (Org_{best} - MV * BF_2) \quad (40)$$

Burada Org_{best} ekosistemdeki uygunluk değerine göre en iyi organizmayı, BF_1 ve BF_2 keyfi olarak 1 veya 2 değerini alan fayda faktörlerini ve MV karşılıklı ilişkiyi temsil etmektedir. MV Denklem (41) ile hesaplanır.

$$MV = \frac{Org_i^t + Org_j^t}{2} \quad (41)$$

Yeni organizmaların (Org_i^{t+1} ve Org_j^{t+1}) aday çözümleri yani uygunluk değeri mevcut organizmaların (Org_i^t ve Org_j^t) uygunluk değerinden daha iyi ise güncellenir. Karşılıklı aşamasından sonra ortaklık aşamasına geçilir. Ortaklık aşaması, bir organizmanın başka bir organizmadan yararlandığı, diğerinin ise bu etkileşimden olumlu ya da olumsuz yönde etkilenmediği bir ilişkidir. Org_i^t organizması başka bir organizma olan Org_j^t ile etkileşime

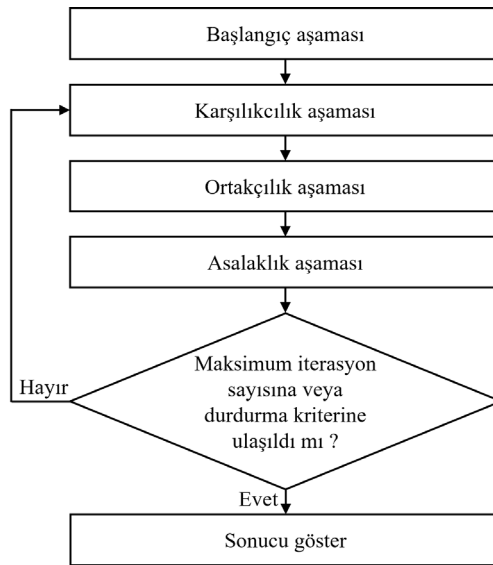
girer ve Org_i^t bu etkileşimden faydalanırken Org_j^t ise bu etkileşime duyarsız olan nötr organizmadır. Ortakçılık aşamasında yeni deneme çözümü Org_i^{t+1} Denklem (42) ile hesaplanır.

$$Org_i^{t+1} = Org_i^t + rand(-1,1) * (Org_{best} - Org_j^t) \quad (42)$$

Burada Org_{best} ekosisteki en iyi organizmayı temsil etmektedir. Denklem (42) ile hesaplanan uygunluk değeri önceki uygunluk değerinden daha iyi ise ekosistemdeki konum güncellenir. Son olarak asalaklık aşamasında bir organizma başka bir organizmaya zarar vererek faydalanır. Asalaklık vektörünü oluşturmak için Org_i organizma boyutundan $\{1, 2, 3, \dots, D\}$ rastgele bir boyut seçilir. Denklem (43) kullanılarak rastgele seçilen boyutlar değiştirilerek asalaklık vektörü oluşturulur.

$$Org_{i,d} = l_d + rand(0,1) * (u_d - l_d) \quad (43)$$

Oluşturulan asalaklık vektörüne ekosistemde rastgele seçilen başka bir organizma olan Org_j ev sahipliği yapar. Asalaklık vektörünün uygunluk değeri Org_j 'den daha iyi ise asalaklık vektörü Org_j 'yi yok eder ve Org_j 'nin ekosistemdeki yerini üstlenir. Ters durumda Org_j ekosistemde kalır ve asalaklık vektörü ekosistemden ayrılır. SOS algoritmasının akış diyagramı Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 18. SOS algoritması akış diyagramı

1.5.4. DE Algoritması

DE algoritması, 1995 yılında Storn ve Price tarafından önerilen popülasyona dayalı meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir (Storn & Price, 1997). DE algoritması başlangıç, mutasyon, çaprazlama ve seçim aşamasından oluşmaktadır. Başlangıç aşamasında rastgele değerlere sahip bir $N * D$ matrisi oluşturulur. X_i vektörünün i 'inci elemanı Denklem (44) ile oluşturulur.

$$X_{i,j} = lb[j] + rand \cdot (ub[j] - lb[j]) \quad (44)$$

Burada $i = 1, 2, 3, \dots, N$, $j = 1, 2, 3, \dots, D$ ve N popülasyon sayısı ve D ise kromozom uzunluğu yani optimize edilecek parametre sayısıdır. Ayrıca $lb[j]$ ve $ub[j]$ sırasıyla j 'inci sütunun alt ve üst sınırını temsil etmektedir. Başlangıç aşamasından sonra mutasyon aşamasında mevcut popülasyondaki her X_i vektörü için Denklem (45) ile mutant vektör V_i oluşturulur.

$$V_i = X_{r1} + FM \cdot (X_{r2} - X_{r3}) \quad (45)$$

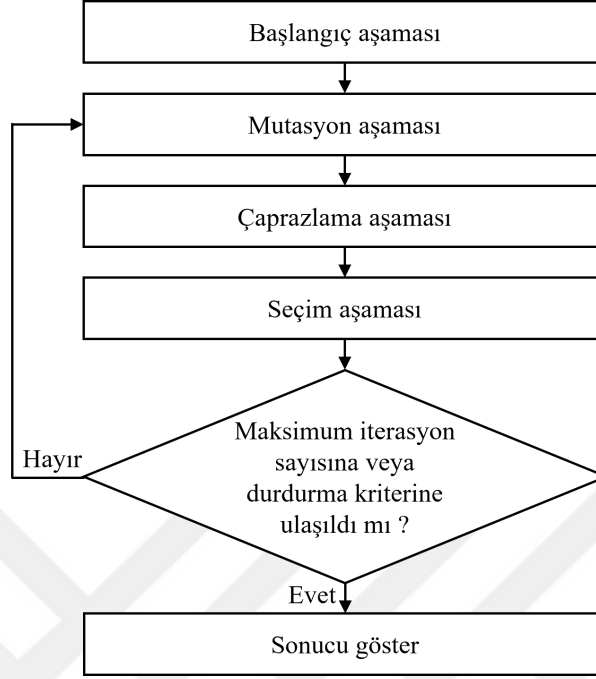
Burada FM mutasyon faktörüdür ve kullanıcı tarafından belirlenir. r_1 , r_2 ve r_3 indisleri i indisinden farklı olan ve aynı zamanda birbirinden farklı rastgele seçilmiş popülasyon indisleridir. Mutasyon aşamasından sonra, mevcut popülasyon çeşitliliğini artırmak için çaprazlama aşaması uygulanır. Çaprazlama aşamasının temel amacı X_i ve V_i arasında Denklem (46) ile U_i deneme vektörünü üretmektir.

$$U_i = \begin{cases} V_{i,j}, & \text{eğer } (rand(j) \leq CR \vee j = j_{rand}) \\ X_{i,j}, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (46)$$

Burada CR çaprazlama oranıdır ve kullanıcı tarafından belirlenir. j_{rand} , $[1, D]$ içerisinde rastgele seçilmiş bir indekstir. Son olarak, sonraki nesillerde popülasyon büyüklüğünü sabit tutmak için Denklem (47) ile seçim işlemi uygulanır.

$$X_i = \begin{cases} U_i, & \text{eğer } f(U_i) \leq f(x_i) \\ X_i, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (47)$$

Burada $f(x)$ optimize edilecek amaç fonksiyonudur. DE algoritmasının akış diyagramı Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. DE algoritması akış diyagramı

1.5.5. ABC Algoritması

ABC algoritması, bal arılarının doğadaki davranışlarından esinlenen sürü zekasına dayalı bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir (Karaboga & Basturk, 2007). Bu algortmada görevli arılar, gözlemci arılar ve kâşif arılar olmak üzere üç grup bulunmaktadır. Görevli arılar rastgele besin kaynaklarını keşfederler yani optimizasyon probleminin potansiyel çözümlerini aramak için kullanılırlar. Her besin kaynağına bir görevli arı atanır. Besin kaynağı tükendiğinde görevli arı kâşif arıya dönüşür ve rastgele besin kaynağı aramaya başlar. Algoritmanın başlangıcında çözümler Denklem (48)’de gösterildiği gibi rastgele üretilir ve her çözüm bir besin kaynağını temsil etmektedir.

$$X_{ij} = X_j^{min} + rand(0,1)(ub_j - lb_j) \quad (48)$$

Burada $i = 1, \dots, SN$, $j = 1 \dots D$ ve SN besin kaynağı sayısını yani görevli arı sayısını ve D ise optimize edilecek parametre sayısını temsil eder. Ayrıca lb_j ve ub_j sırasıyla j ’inci parametrenin alt ve üst sınırını temsil etmektedir. Görevli arılar çalıştığı besin kaynağının

çevresinde yeni bir besin kaynağı belirler ve bunun kalitesini değerlendirir. Eğer komşu besin kaynağının uygunluk değeri yani çözüm kalitesi mevcut uygunluk değerinden daha iyi ise görevli arı mevcut kaynaktan ayrılarak komşu kaynağa doğru yönelir. Mevcut çözüme komşu olan kaynağın yeni besin konumu Denklem (49) ile hesaplanır.

$$\vartheta_{ij} = X_{ij} + \phi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \quad (49)$$

Burada $k \in 1, \dots, SN$ ve $j \in 1, \dots, D$ rastgele seçilen parametrelerdir ve birbirlerinden farklı olması gerekmektedir. ϕ_{ij} , $[-1, 1]$ aralığında düzgün dağılımlı rastgele üretilmiş bir değerdir. Denklem (49)'da görüldüğü gibi X_{ij} ve X_{kj} arasındaki fark azaldıkça X_{ij} değerindeki değişim miktarı da azalacaktır. Böylece bölgesel optimum çözüme yaklaştıkça değişim miktarı da adaptif olarak azalmaktadır. Bu işlem sonucunda elde edilen parametre değeri (ϑ_{ij}) önceden belirlenmiş parametre sınırlarını aşarsa j 'inci parametreye ait olan alt veya üst sınır değerine ayarlanır. Yeni bir kaynağı temsil eden ϑ_i parametre vektörünün kalitesi hesaplanarak Denklem (50)'de gösterildiği gibi bir uygunluk değeri atanmaktadır.

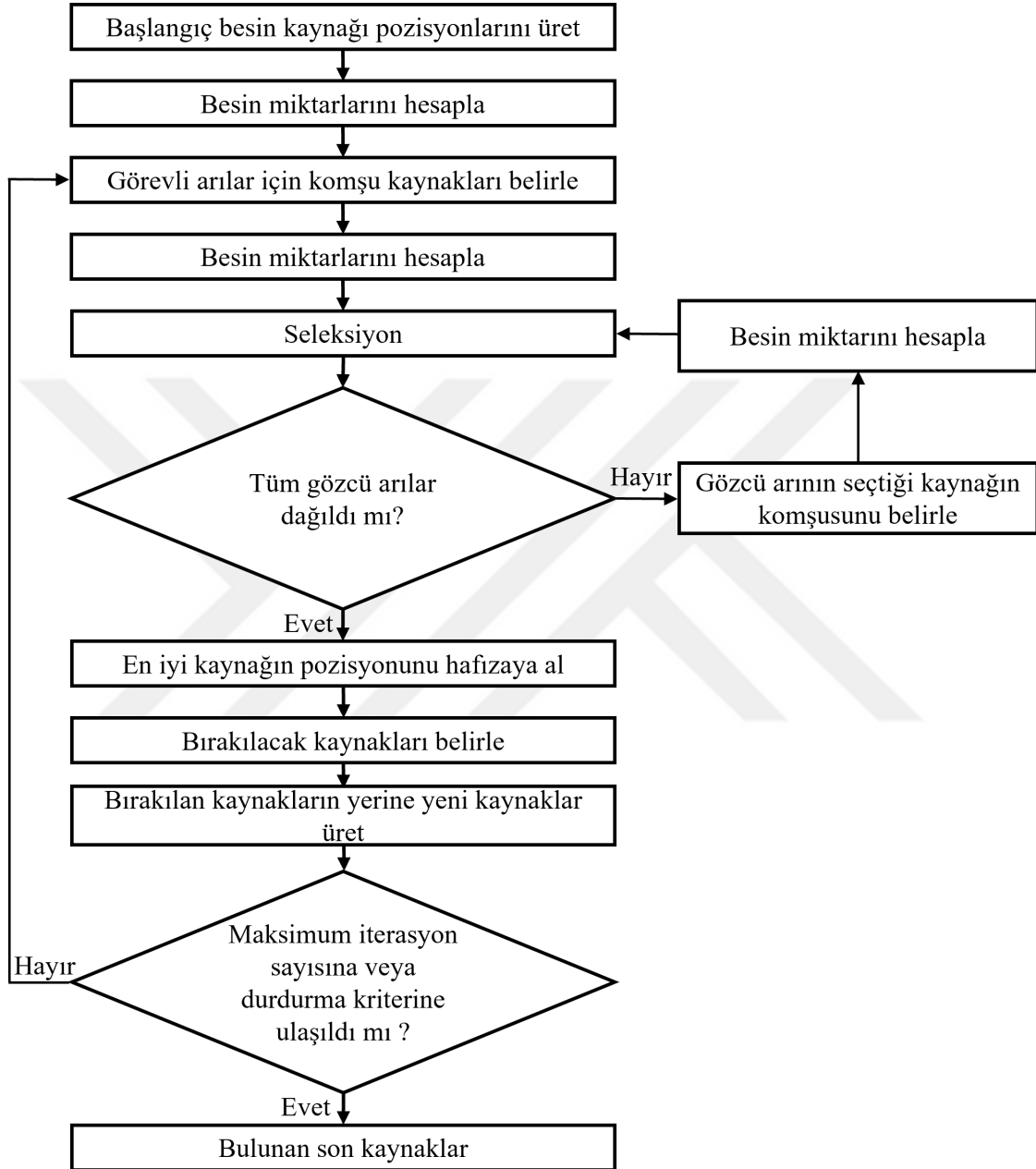
$$uygunluk_i = \begin{cases} 1/(1 + f_i) & , \quad f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i) & , \quad f_i < 0 \end{cases} \quad (50)$$

Burada f_i , ϑ_i besin kaynağı için hesaplanan amaç fonksiyonu değeridir ve abs , bir sayının mutlak değerini veren fonksiyondur. X_i ile ϑ_i arasında besin kalitesine göre yani uygunluk değerine göre açgözlü seçme işlemi uygulanır. Yeni bulunan ϑ_i çözümü daha iyi ise görevli arı hafızadan eski kaynağın yerini silerek ϑ_i kaynağının yerini hafızaya alır. Aksi takdirde görevli arı X_i kaynağına gitmeye devam eder. Görevli arılar kovana dönerek buldukları kaynağın besin kalitesini gözcü arılara aktarırlar. Gözcü arılar besin kalitesi yani uygunluk değeri ile orantılı bir olasılıkla bir bölge seçerler. Uygunluk değerine bağlı seçme işlemi rulet çarkı yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Her bir kaynağın gözcü arılar tarafından seçilme olasılığı Denklem (51) kullanılarak hesaplanır.

$$q_i = \frac{uygunluk_i}{\sum_{j=1}^{SN} uygunluk_j} \quad (51)$$

Burada q_i gözcü arıların i 'inci besin kaynağını seçme olasılığını, $uygunluk_i$ i 'inci kaynağın kalitesini ifade etmektedir. Denklem (51)'e göre bir kaynağın besin miktarı arttıkça yani

uygunluk değeri arttıkça bu kaynak bölgesini seçecek gözcü arı sayısı da artacaktır. ABC algoritmasının akış diyagramı Şekil 20’de verilmiştir (Karaboğa, 2014).



Şekil 20. ABC algoritması akış diyagramı (Karaboğa, 2014)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gelecek nesil haberleşme standartlarında yer alması beklenen VLC sistemlerinde yüksek veri hızları ve MA için NOMA ve RSMA yöntemleri incelenmiştir. Bölüm 1.2’de, NOMA ve RSMA yöntemleri ile ilgili yapılan çalışmaların büyük oranda RF sistemler üzerine olduğu görülmektedir. NOMA ve özellikle RSMA yönteminin VLC sistemlerine entegrasyonunu inceleyen çok az sayıda çalışma bulunmaktadır.

NOMA ve RSMA yöntemlerinde belirli kısıtlamalar altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak tezin ana amacıdır. Bölüm 1.2’de verildiği gibi yapılan birçok çalışmada farklı güç tahsis yöntemlerinin önerildiği görülmektedir. Literatürde önerilen bu yöntemler incelendiğinde adillik, optik yoğunluk ve QoS gibi kısıtları ayrı ayrı dikkate alan çalışmaların olduğu görülmekte fakat birden fazla kısıtı dikkate alarak önerilen bir çalışma bulunmamaktadır. Oysa bu durum gerçekçi değildir. Çünkü oluşturulan sistemin gereksinimlerine göre birçok kısıt ortaya çıkmaktadır. Toplam veri iletim hızını artırmaya çalışırken sistem gereksinimlerine göre ortaya çıkan tüm kısıtlamalar dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda NOMA ve RSMA yöntemlerinde güç tahsis katsayılarının belirlenmesi için meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları önerilmiştir. Yapılan tez çalışmasında meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayanan bir çözüm geliştirilmiştir. Böylece birden çok kısıt dikkate alınarak kullanıcıların güç tahsis katsayılarının hesaplanabileceği ortaya konulmuştur. Yürütülen tez çalışması ile önerilen çözümün belirli kısıtlar altında hem NOMA hem de RSMA yöntemlerinde toplam veri iletim hızını iyileştirebileceği ortaya konulmuştur.

Tezde iç mekân VLC sistemlerinin birden fazla kullanıcıya hizmet verdiği durumda toplam veri iletim hızını artırmak amacıyla önerilen NOMA ve RSMA yöntemleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu bağlamda yapılan araştırmanın hedefleri aşağıdaki maddeler ile verilmiştir.

- Birden fazla kullanıcının bulunduğu bir ortamda kullanıcılara aynı anda hizmet verebilmek için MA yöntemlerinin kullanılması hedeflenmiştir.
- Farklı senaryolarda NOMA ve RSMA tabanlı VLC sistemlerinde toplam veri iletim hızını belirli kısıtlar altında artırmak için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanılması hedeflenmiştir.
- VLC sistemlerinde MA yöntemlerinin veri iletim hızına olan etkilerinin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Son yıllarda işlemcilerin ucuzlaması ve hesaplama güçlerinin artmasıyla birlikte meta-sezgisel algoritmaların kullanımı yaygınlaşmıştır. Meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının, MA yöntemlerinde verilen kısıtlar altında toplam veri iletim hızının artırılması için kullanıcıların güç tahsis katsayılarını belirleyen bir çözüm olması hedeflenmiştir.

VLC sistemine NOMA ve RSMA yöntemleri uygulanarak çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hem NOMA hem de RSMA birden fazla kullanıcıya aşağı yönlü iletim VLC sistemine uygulanmıştır. Ayrıca, MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemine yönelik yapılan çalışmada, NOMA yöntemi OFDMA yöntemi ile karşılaştırılmıştır. RSMA tabanlı VLC sistemlerinde ise NOMA ve RSMA yöntemleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Ek olarak, Bölüm 2.3.3'te RSMA, NOMA ve SDMA yöntemleri arasında bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir.

OFDMA, VLC sistemlerinde yüksek veri iletim hızları ve etkin spektrum kullanımı sağlamak için tercih edilen bir MA yöntemidir. OFDMA, frekans bölümlü çoklu erişim prensibine dayanarak mevcut frekans spektrumunu daha verimli bir şekilde kullanmayı amaçlamaktadır. Bu yöntemde, veri iletimini dikgen alt taşıyıcılar üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu alt taşıyıcılar farklı kullanıcılara tahsis edilerek veri iletimi sağlanmaktadır. VLC sistemlerinde OFDMA'nın kullanılması yüksek spektrum verimliliği, kullanıcılar arası düşük girişim gibi avantajlar sağlamaktadır (Sung vd., 2015; Yin vd., 2016).

SDMA tabanlı VLC sistemleri, kullanıcıların uzamsal konumlarını kullanarak aynı frekansta veri iletimi yapabilen bir yöntemdir. SDMA özellikle birden fazla kullanıcıya aynı anda hizmet vermek için kullanılmaktadır ve her kullanıcının farklı alanlarda yer aldığı durumlarda etkili olmaktadır. VLC sistemlerinde SDMA'nın uygulanabilirliği, ışık kaynağının yönlendirilmesine ve alıcıların konumlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu yöntem, her kullanıcının belirli bir ışık kaynağından veri almasını ve aynı frekansta veri iletimini mümkün kılarak spektrum verimliliğini artırmaktadır. Sonuç olarak SDMA, yüksek kapasiteli ve yüksek kaliteli veri iletimini destekleyerek VLC sistemlerinin performansını artırmakta ve çoklu erişiminde önemli avantajlar sunmaktadır (Z. Chen & Haas, 2015; Bawazir vd., 2018).

Tez çalışması kapsamında ilk olarak MU-SISO aşağı yönlü iletim NOMA tabanlı VLC sistem modeli ve çalışmada kullanılan simülasyon parametreleri verilmiştir. Kullanıcıların güç tahsis katsayılarını hesaplamak için literatürde önerilen güç tahsis yöntemleri ve yapılan

bu çalışma için oluşturulan optimizasyon problemlerinin matematiksel ifadeleri verilmiştir. Oluşturulan optimizasyon problemlerini çözmek amacıyla meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Hesaplamalar sırasında literatürdeki birçok çalışmada dikkate alınmayan adillik ve optik yoğunluk gibi kısıtların olduğu ve olmadığı durumlar incelenerek her durum için oluşturulan optimizasyon probleminin matematiksel ifadeleri ve kullanılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının parametreleri verilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda kullanılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ES algoritması ile karşılaştırılmıştır. ES algoritması tüm olası çözümleri sistematik bir şekilde deneyerek en iyi çözümü bulmayı hedefler. Bu yöntem genellikle problem uzayının boyutu küçük ve karmaşıklığın az olduğu durumlarda kullanılır. Çünkü büyük boyutlu problemler için oldukça zaman alıcıdır. Bu nedenle ES algoritması, sadece adillik ve optik yoğunluk kısıtının olmadığı durum için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının optimum değere ne kadar yaklaştığını göstermek amacıyla MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistem modelinde kullanılmıştır.

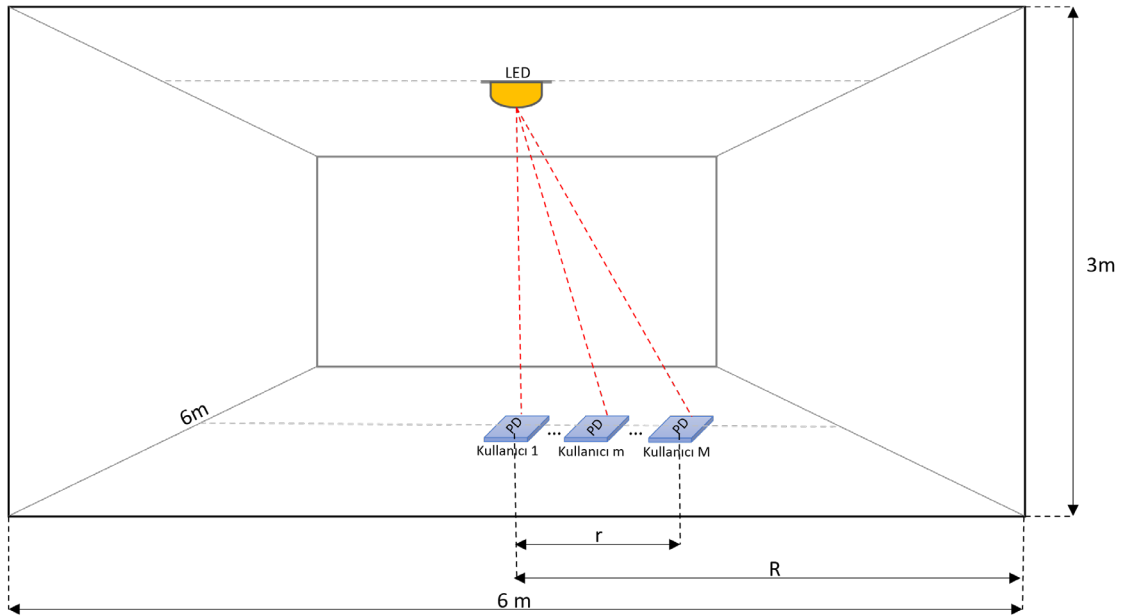
Tez çalışması kapsamında NOMA tabanlı aşağı yönlü iletim VLC sistemi için incelenen son durum 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modelidir. Bu kapsamda ilk olarak oluşturulan sistem modeli açıklanarak matematiksel ifadeleri ve bu sistem modeli için kullanılan simülasyon parametreleri verilmiştir. Tek LED NOMA tabanlı VLC sistem modelinde açıklanan geleneksel güç tahsis yöntemleri MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modeline göre yeniden düzenlenerek verilmiştir. Ayrıca yapılan bu çalışma için oluşturulan optimizasyon problemlerinin matematiksel ifadeleri literatürdeki birçok çalışmada dikkate alınmayan adillik kısıtının olduğu ve olmadığı durumlar için incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında aşağı yönlü iletim MU-SISO ve MU-MISO RSMA tabanlı VLC sistemleri için matematiksel ifadeleri ve M kullanıcılu MU-MISO RSMA tabanlı VLC sistem modelinin alıcı verici mimarisi verilmiştir. MU-SISO ve MU-MISO sisteminin kullanıldığı durum için farklı senaryolar oluşturulmuştur. Oluşturulan ilk senaryoda tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistem modeli ve simülasyon parametreleri kullanılarak aşağı yönlü iletim RSMA tabanlı VLC sisteminde toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak için optimizasyon problemi oluşturulmuş ve matematiksel ifadesi verilmiştir. Oluşturulan ikinci senaryoda MU-SISO RSMA ve NOMA tabanlı VLC sistem modelini oluşturmak için simülasyon parametreleri verilmiştir. İkinci senaryo için yapılan çalışmada toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik optimizasyon problemleri oluşturulmuş ve bu problemlerin matematiksel ifadeleri verilmiştir. Oluşturulan

üçüncü senaryoda MU-MISO VLC sistem modeli ve simülasyon parametreleri verilmiştir. Yapılan çalışmada farklı kısıtlar altında RSMA, NOMA ve SDMA için optimizasyon problemi oluşturulmuş ve matematiksel ifadeleri verilmiştir. Oluşturulan son senaryo için MU-MISO VLC sistem modeli oluşturulmuş ve simülasyon parametreleri verilmiştir. Yapılan son çalışmada kusursuz ve kusurlu CSI altında RSMA ve NOMA yöntemi karşılaştırılmıştır. Oluşturulan dört farklı senaryoda optimizasyon problemlerini çözmek için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından PSO algoritması kullanılmıştır.

2.1. Tek LED PD-NOMA Tabanlı VLC Sistemi

İç mekân VLC sistemlerinde kullanıcılar odanın farklı noktalarında bulunabilir. Bu nedenle kullanıcı konumlarına göre farklı durumlar oluşmaktadır. Oluşabilecek farklı durumlara göre Şekil 21’de basitleştirilmiş bir sistem modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan sistem modeli sayesinde simülasyonlarda, normalize edilmiş ofset değeri 0 ile 1 arasında değiştirilmektedir. Bu sayede kullanıcıların birbirine göre farklı konumlarında olduğu durumlar hesaplamalara dahil edilmektedir. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistem modelinde Şekil 21’de gösterildiği gibi verici olarak tek LED ve alıcı olarak M adet kullanıcı bulunmaktadır.



Şekil 21. Tek LED M kullanıcıli iç mekân aşağı yönlü iletim NOMA tabanlı VLC sistem modeli

Şekil 21 ile gösterilen sistemde, tüm kullanıcıların LED hattına paralel bir hat üzerinde yerden 0.85 m yüksekte olduğu ve kullanıcı 1'in LED'in altına sabitlendiği varsayılmıştır. Daha sonra, bulgular için Chen ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada kullanılan normalize edilmiş ofset kullanılmıştır (C. Chen vd., 2018). Şekilde kullanıcı 1'in konumu ile sistem kapsamının sınırı arasındaki mesafe $R = 3m$ ve kullanıcı 1 ile M kullanıcısı arasındaki mesafe r ile verilmiştir. Kullanıcı M 'nin kullanıcı 1'e göre normalize edilmiş ofseti r/R olarak belirlenir ve kullanıcı m 'nin kullanıcı 1'e göre normalize edilmiş ofseti $(m-1)r/(M-1)R$ olarak belirlenir. Normalize edilmiş ofsetin sıfıra yakın olduğu (kullanıcıların kullanıcı 1'e yakın olduğu) durum, alınan sinyal güçlerinin birbirine yakın olduğu anlamına gelmektedir. Normalize edilmiş ofsetin 1'e yakın olduğu durum, kullanıcıların tüm çizgiye yayıldığını ve birbirlerinden uzaklaştığını ifade etmektedir. Bu nedenle simülasyonlarda normalize edilmiş ofset değeri 0 ile 1 arasında değiştirilmektedir.

NOMA yönteminde kullanıcılara iletilecek sinyal, verici ile alıcı arasındaki mesafeye göre farklı güç seviyelerine ayarlanır ve SC kullanılarak vericiden toplamsal bir şekilde tek bir sinyal olarak çıkar. Şekil 21'den de görüldüğü üzere kullanıcıların kanal kazançlarının sırasıyla $h_1 \geq h_2 \geq \dots \geq h_M$ şeklinde azalan sırada olduğu varsayılır. Bilgi teorisi prensibine göre, en düşük kanal kazancına sahip kullanıcının mesaj sinyali daha yüksek güç seviyesine ayarlanır. Bu durumda kullanıcılar için kod çözme sırası $U_1 \leq U_2 \leq \dots \leq U_M$ olacaktır. Vericiden tüm kullanıcılara iletilen toplamsal x_{NOMA} sinyali Denklem (52) ile verilmiştir.

$$x_{NOMA} = \sum_{m=1}^M \sqrt{p_m} s_m + A \quad (52)$$

Burada M toplam kullanıcı sayısını, m kullanıcı indisini, p_m kullanıcı m için güç tahsis katsayısını, s_m kullanıcı m için mesaj sinyalini ve A pozitifliği sağlamak amacıyla eklenen doğru akım (Direct Current, DC) değerini temsil etmektedir. Yapılan çalışmada darbe genlik modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM) kullanılmıştır. Tüm kullanıcılar için mesaj sinyalinin 4-PAM olduğu ve ortalaması sıfır olan $[-\delta, \delta]$ aralığında değiştiği varsayılmıştır. Burada δ modülasyon seviyesine bağlı olarak değişen ve $\delta \geq 0$ koşulunu sağlayan bir katsayıdır (Schreiber, 2004). İletilecek x_{NOMA} sinyalinin pozitif olması gerektiğinden, Denklem (53) ile verilen kısıtlama sağlanmalıdır.

$$\sum_{m=1}^M \sqrt{p_m} \leq \frac{A}{\delta} \quad (53)$$

Ayrıca LED'in çalışma aralığı ve göz güvenliği için iletilecek sinyalin değeri Denklem (54)'te verildiği gibi Z ile sınırlandırılmalıdır.

$$\sum_{m=1}^M \sqrt{p_m} \leq \frac{Z - A}{\delta} \quad (54)$$

Vericiden gelen toplamsal mesaj sinyali VLC kanalından geçer. VLC kanalı için Denklem (1)'de verilen LoS bileşeni dikkate alınmıştır. VLC kanalından geçen sinyale sıfır ortalamalı ve σ_m^2 varyanslı (AWGN) gürültü n_m eklenir. Daha sonra alıcı, başlangıçta eklenen DC değeri kaldırır ve bu durumda m kullanıcısındaki alınan sinyal Denklem (55) ile ifade edilir.

$$y_{m,NOMA} = sh_m + n_m \quad (55)$$

Burada $s = \sum_{m=1}^M \sqrt{p_m} s_m$, ($s = x - A$) DC değeri kaldırıldıktan sonra elde edilen kullanıcı verilerini ve h_m LED ile kullanıcı m arasındaki optik kanal kazancını temsil eder. NOMA yönteminde en kötü kanal kazancına sahip kullanıcı kendi kodunu doğrudan çözer ve diğer kullanıcılar kendi verilerini elde etmek için SIC yöntemini kullanır. Oluşturulan sistem modelinde kanal kazançları ve kod çözme sırası dikkate alındığında kullanıcı m kendi sinyalini çözmeden önce tüm l . kullanıcıların sinyalini çözer ve $m + 1 \leq l \leq M$, bunları alınan sinyalden çıkarırken, ilk $m - 1$ kullanıcının girişimlerini gürültü olarak ele alır. Kullanıcı m 'nin SINR değeri Denklem (56)'da verildiği gibi ifade edilebilir. Analitik ifadeler verilirken gönderilen işaretin güç normalizasyonu 1'e eşit kabul edilmiştir.

$$\gamma_{m,NOMA} = \frac{p_m h_m^2}{BN_0 + \sum_{l=1}^{m-1} p_l h_m^2} \quad (56)$$

Burada B bant genişliğini ve N_0 gürültü spektral yoğunluğunu temsil eder. SINR denklemi elde edildikten sonra herhangi bir m kullanıcısı için ulaşılabilir veri iletim hızı ve sistemde

bulunan tüm kullanıcıların toplam veri iletim hızı sırasıyla Denklemler (57) ve (58) ile hesaplanabilir.

$$R_{m,NOMA} = \frac{B}{2} \log_2(1 + \gamma_{m,NOMA}) \quad (57)$$

$$R_{T,NOMA} = \sum_{m=1}^M R_{m,NOMA} \quad (58)$$

Adillik, sistem kapasitesinin kullanıcılar arasında ne kadar adil paylaşıldığını gösterir. Adillik değeri 1'e yaklaştıkça, kullanıcıların veri iletim hızı da birbirine yaklaşır (Manglayev vd., 2016). Tek LED NOMA tabanlı VLC sistem modeli için adillik matematisel ifadesi Denklem (59) ile verilmiştir.

$$F = \frac{(\sum_{m=1}^M R_m)^2}{M \sum_{m=1}^M R_m^2} \quad (59)$$

LED'den kullanıcılara iletilecek Denklem (52) ile verilen x_{NOMA} sinyalinin gücü maksimum ve ortalama parlaklık değerini belirler. Bu durumda $\sqrt{p_m}$ ifadesine bağılı olarak optik yoğunluk değeri kullanılarak maksimum parlaklık değeri değiştirilebilir. Optik yoğunluk değeri Denklem (60) ile hesaplanabilir.

$$CO = \sum_{m=1}^M \sqrt{p_m} \quad (60)$$

Yapılan çalışmada eklenen DC değeri ve modülasyona göre optik yoğunluk değeri $CO = \frac{1}{8} \min\{A, Z - A\}$ şeklinde ifade edilebilir. 4-PAM kullanılan bir VLC sisteminde $\delta = \frac{3\sqrt{5}}{5}$ olarak alınmıştır (Schreiber, 2004). Bu durumda optik yoğunluk değeri ile maksimum parlaklık arasındaki ilişki Denklem (61)'de verilmiştir.

$$Max\ Parlaklık \propto \left(2CO \frac{3\sqrt{5}}{5}\right)^2 \quad (61)$$

Yapılan bu çalışma için simülasyon parametreleri Tablo 5 ile verilmiştir.

Tablo 5. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistem modeli için simülasyon parametreleri

Parametreler	Değerler
Oda boyutu	(6,6,3) <i>m</i>
LED konumu	(3,3,3) <i>m</i>
PD yüksekliği	0.85 <i>m</i>
PD yüzey alanı	1 <i>cm</i> ²
PD FOV açısı	72°
PD kırılma indeksi	1.5
Optik filtre kazancı	1
Optik lens kazancı	2.5
LED'in görüş açısının yarısı	60°
Sistem bant genişliği	30 <i>MHz</i>
Gürültü yoğunluğu	10 ⁻¹⁹ <i>A</i> ² / <i>Hz</i>
Modülasyon tipi	4 – <i>PAM</i>
δ (Schreiber, 2004)	3 $\sqrt{5}$ /5

Genel olarak verilen denklemler incelendiğinde PD-NOMA sistemlerinde kullanıcıların güç tahsis katsayılarının belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Özellikle PD-NOMA tabanlı VLC sistemlerinde kullanıcıların güç tahsis katsayılarının belirlenmesi toplam veri iletim hızı, adillik ve optik yoğunluk gibi haberleşme ve aydınlatma açısından birçok değeri etkilediğinden büyük bir önem arz etmektedir.

PD-NOMA yönteminde toplam veri iletim hızı kullanıcıların güç tahsis katsayıları ile değiştirilebilir. Bu nedenle, PD-NOMA yöntemindeki en önemli zorluklardan biri en yüksek toplam veri iletim hızı elde etmek için kullanıcıların güç tahsis katsayılarının belirlenmesidir. Yapılan çalışmada, PD-NOMA tabanlı VLC sistemlerinde adillik ve optik yoğunluk kısıtlamalarının dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar altında güç tahsis katsayılarını belirlemek için meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmış ve bunlar literatürde önerilen GRPA (Marshoud vd., 2016) ve NGDPA (C. Chen vd., 2018) yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

GRPA yönteminde, kullanıcıların kanal kazanç oranlarına göre kullanıcıların güç tahsis katsayıları belirlenir. GRPA yönteminden türetilen NGDPA yöntemi, toplam veri iletim hızını daha da iyileştirmek için önerilmiştir. Kullanıcıların güç tahsis katsayısı, kod

çözme sırasına göre ($U_1 \leq U_2 \leq \dots \leq U_M$) GRPA ve NGDPA için sırasıyla Denklemler (62) ve (63) ile hesaplanır.

$$p_m = \left(\frac{h_{m+1}}{h_1} \right)^{m+1} p_{m+1} \quad (62)$$

$$p_m = \left(1 - \frac{h_{m+1}}{h_1} \right)^m p_{m+1} \quad (63)$$

Aşağı yönlü iletim PD-NOMA tabanlı VLC sisteminde, toplam veri iletim hızını önerilen geleneksel yöntemlere göre daha fazla artırmak için meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Farklı kısıtların olduğu ve olmadığı durumlar için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının matematiksel ifadeleri oluşturulmuştur. Oluşturulan tüm optimizasyon problemlerinde toplam veri iletim hızı amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır.

İncelenen ilk durumda güç kontrolü ve kod çözme sırası kısıtlamaları altında, adillik ve optik yoğunluk kısıtının dahil edilmediği durum için optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (64) ve (65) ile verilmiştir.

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_m} \sum_{m=1}^M R_{m,NOMA} \quad (64)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M p_m \leq P_{max} \\ U_1 < U_2 < \dots < U_M \\ p_m \geq 0 \end{cases} \quad (65)$$

Burada P_{max} maksimum güç tahsis katsayılarının toplamını temsil etmektedir. Oluşturulan bu durum için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının optimum değere ne kadar yaklaştığını göstermek amacıyla ES algoritması kullanılmıştır. Kullanılan ES algoritması için arama yapılacak adım boyutu iki ve üç kullanıcının bulunduğu sistemde 0.001 dört ve beş kullanıcının bulunduğu sistemde problem boyutu büyüdüğünden dolayı 0.01 alınarak tüm değerlerin olası kombinasyonları belirtilen kısıtlar altında denenmiştir. Kısıtları sağlayan kombinasyonlar için Denklem (64) ile verilen amaç fonksiyonunun değerleri hesaplanır ve en büyük değer bulunmaktadır.

İkinci durum için birinci durumda oluşturulan optimizasyon problemine adillik kısıtı eklenmiştir. Bu durumda oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtların matematiksel ifadesi sırayla Denklemler (66) ve (67) ile verilmiştir.

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_m} \sum_{m=1}^M R_{m,NOMA} \quad (66)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M p_m \leq P_{max} \\ U_1 < U_2 < \dots < U_M \\ F \leq \frac{(\sum_{m=1}^M R_m)^2}{M \sum_{m=1}^M R_m^2} \\ p_m \geq 0 \end{cases} \quad (67)$$

Son durumda birinci durumda oluşturulan optimizasyon problemine optik yoğunluk kısıtı eklenmiştir. Bu durumda oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (68) ve (69) ile verilmiştir.

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_m} \sum_{m=1}^M R_{m,NOMA} \quad (68)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M p_m \leq P_{max} \\ U_1 < U_2 < \dots < U_M \\ \sum_{m=1}^M \sqrt{p_m} \leq CO \\ p_m \geq 0 \end{cases} \quad (69)$$

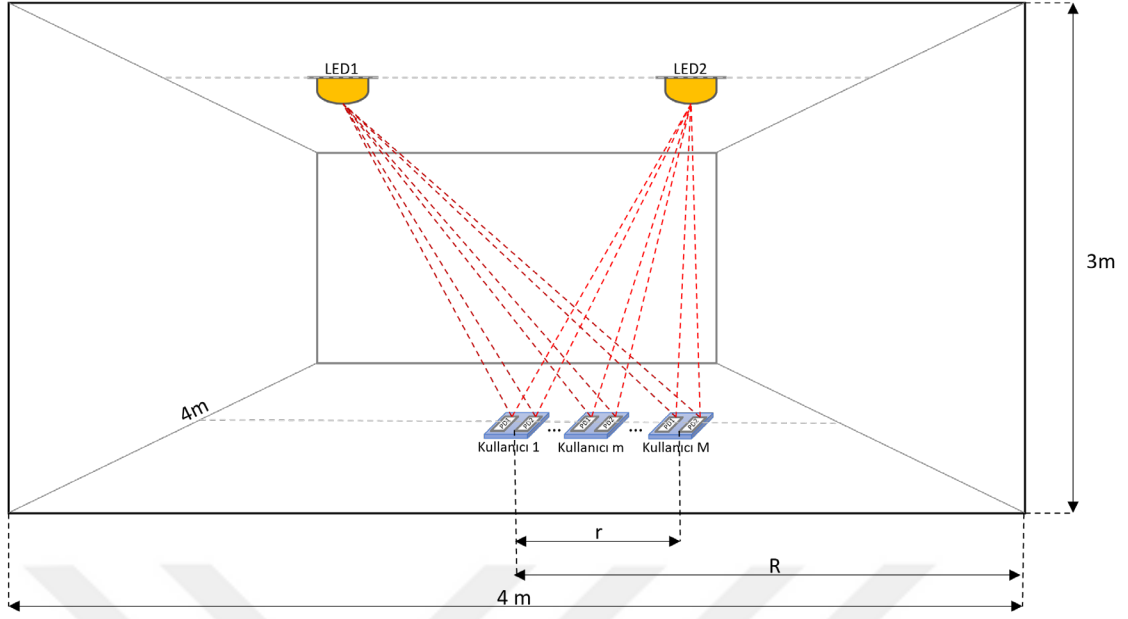
Optimizasyon problemlerini çözmek için meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Kullanılan algoritmaların parametre değerleri Tablo 6 ile verilmiştir. Ayrıca ES algoritması kullanılarak meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının optimum değere ne kadar yaklaştığı bulgular kısmında verilmiştir.

Tablo 6. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistem modeli için PSO, SBO ve ABC algoritmalarının parametre değerleri

Parametreler	Değerler	Algoritma
Parçacık sayısı	20	PSO
İvmelenme katsayıları (c_1, c_2)	2	
Minimum eylemsizlik ağırlığı (w_{min})	0.3	
Maksimum eylemsizlik ağırlığı (w_{max})	0.95	
Rastgele değerler (r_1, r_2)	[0,1]	
Saten çardak kuşu sayısı	20	SBO
En büyük adım boyutu (α)	0.1	
Yayılma faktörünü (z)	0.02	
Mutasyon olasılığı	0.05	
Popülasyon boyutu (PZ)	20	ABC
Limit/Deneme sayısı	$PZ * M(Users)$	
Rastgele değer ($\emptyset_{ij}$)	[-1, 1]	
Amaç fonksiyonları	Denklemler (64), (66) ve (68)	PSO, SBO ve ABC
Üst sınır (ub)	$\mathbf{12}_{1 \times IM}$	
Alt sınır (lb)	$\mathbf{0}_{1 \times IM}$	
Maksimum iterasyon	100	

2.2. MIMO-NOMA Tabanlı VLC Sistemi

Yapılan bu çalışmada önerilen yöntemin performansını adil bir şekilde değerlendirmek için Chen ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada kullanılan sistem modeli ele alınmıştır (C. Chen vd., 2018). Şekil 22, aşağı yönlü iletim 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modelini göstermektedir. Ayrıca güç tahsis yöntemlerinin yanı sıra NOMA ve eşit güç tahsisi olan OFDMA yöntemlerimde toplam veri iletim hızı bakımından karşılaştırılmıştır. NOMA ve OFDMA'nın karşılaştırılması, hangi yöntemin daha yüksek veri iletim kapasitesi sağladığını anlamak için temel bir değerlendirme sağlamaktadır.



Şekil 22. M kullanıcı iç mekân aşağı yönlü iletim 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modeli

Şekil 22 ile gösterilen sistemde, iki LED arasındaki mesafenin $1m$ ve olduğu tüm kullanıcı alıcılarının LED 1 ve LED 2 hatlarına paralel bir hat üzerinde ve yerden $0.85m$ yükseklikte bulunduğu ve kullanıcı 1'in LED'lerin ortasında sabitlendiği varsayılmıştır. Ayrıca her kullanıcı iki PD ile donatılmış ve her kullanıcıda bulunan PD'ler arasındaki boşluk $4cm$ olarak ayarlanmıştır. Şekilde kullanıcı 1'in konumu ile sistem kapsamının sınırı arasındaki mesafe $R = 2m$ ve kullanıcı 1 ile M kullanıcısı arasındaki mesafe r ile verilmiştir. Çeşitli sayısal sonuçları elde etmek amacıyla tek LED PD-NOMA VLC sisteminde açıklanan normalize edilmiş ofset kullanılmıştır.

i. LED'den gönderilen mesaj sinyali s_i farklı güç seviyelerinde iletilir. Bu güç seviyeleri, vericiler ve alıcılar arasındaki mesafeye göre belirlenir. Daha sonra, vericide SC kullanılarak elde edilen sinyal aynı anda kullanıcılara iletilir. Ek olarak, önerilen sistem modelinde doğru akım eklemeli optik OFDM (Direct Current Biased Optical OFDM, DCO-OFDM) kullanılmıştır. DC değeri eklendikten ve DCO-OFDM modülasyonu kullanıldıktan sonra, $i.$ LED'in ($i = 1,2$) giriş sinyali x_i Denklem (70) ile verilmiştir.

$$x_i = \sum_{m=1}^M \sqrt{p_{i,m}} s_{i,m} + A \quad (70)$$

Burada $p_{i,m}$ i . LED'den m . ($m = 1, 2, \dots, M$) kullanıcıya tahsis edilen elektriksel güç değerlerini, $s_{i,m}$ i . LED'den m . kullanıcıya iletilecek modüle edilmiş mesaj sinyalini ve A her LED için pozitifliği sağlamak amacıyla eklenen DC değeri temsil etmektedir. Her LED için herhangi bir genlik kaybı olmadan sabit bir elektrik gücü sağlamak için Denklem (71) ile verilen güç kısıtlaması uygulanmalıdır.

$$\sum_{m=1}^M p_{i,m} = 1 \quad (71)$$

Oluşturulan sistem modelinde bulunan her LED'in Lambert radyasyon modelini izlediği varsayılmıştır ve yalnızca LoS bileşen dikkate alınmıştır. LoS optik kanal kazancı Denklem (1) kullanılarak hesaplanır. 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi için kanal matrisi Denklem (72) ile verilmiştir.

$$H_m = \begin{bmatrix} h_{11,m} & h_{12,m} \\ h_{21,m} & h_{22,m} \end{bmatrix} \quad (72)$$

Burada kanal matrisinin her bir elemanı j . PD ile i . LED arasındaki h_{ji} 'den oluşur.

Vericiden kullanıcılara iletilen mesaj sinyalleri VLC kanalından geçtikten sonra m . kullanıcı tarafından alınan elektrik sinyal vektörü Denklem (73) ile hesaplanır.

$$y_m = R_{PD} P_{opt} \xi H_m x + n_m \quad (73)$$

Burada P_{opt} LED'in çıkış optik gücünü, ξ modülasyon indeksini, R_{PD} PD'nin duyarlılığını, x iletilen elektrik sinyal vektörünü ve n_m toplamsal gürültü vektörünü temsil etmektedir. Toplamsal gürültü vektörünü elde etmek için Denklem (5) ile verilen atış ve ısı gürültü varyanslarının toplamı kullanılmıştır. Atış ve ısı gürültü varyanslarının ayrıntılı hesaplanması sırasıyla Denklemler (3) ve (4) ile verilmiştir.

İletilen verileri kurtarmak için MIMO çoğullama çözme gerçekleştirilmiş ve düşük karmaşıklık nedeniyle kanal ters çevirme kullanılarak ZF uygulanmıştır (C. Chen vd., 2017). MIMO çoğullama çözme ve güç normalizasyonundan sonra m . kullanıcı için tahmini elektrik sinyal vektörü Denklem (74) ile hesaplanır.

$$\tilde{x}_m = x + \frac{1}{\gamma P_{opt} \xi} H_m^{-1} n_m \quad (74)$$

Burada H_m^{-1} , H_m 'nin tersidir. Tek LED'li NOMA tabanlı VLC sistemlerinde kod çözme sırası kullanıcı kanal kazançlarının artışına göre belirlenir. En uzaktaki kullanıcı yani en düşük kanal kazancına sahip kullanıcı alınan veriden doğrudan kodunu çözer. Diğer kullanıcılar ise verilerini çözmek için SIC yöntemini kullanır. Bu çalışmada, MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi kullanıldığından birden fazla LED kullanılmıştır. Bu nedenle, kullanıcıları sıralamak için her bir LED'in kullanıcı optik kanal kazançlarının toplamı kullanılmalıdır. Bu durumda i . LED'e göre, M kullanıcısının toplam optik kanal kazançlarının, genlik kaybı olmaksızın Denklem (75)'te verildiği gibi azalan sırada olduğu varsayılmıştır (C. Chen vd., 2018).

$$\sum_{j=1}^J h_{ji,1} > \sum_{j=1}^J h_{ji,2} > \dots > \sum_{j=1}^J h_{ji,M} \quad (75)$$

Kanal kazançları sıralamasına göre i . LED'e göre kod çözme sırası Denklem (76) ile verilmiştir.

$$U_{i,1} < U_{i,2} < \dots < U_{i,M} \quad (76)$$

Son olarak DCO-OFDM demodülasyonu yoluyla kullanıcılara ait veriler elde edilir.

Tek LED NOMA tabanlı VLC sistem modeli için Denklem (59) ile verilen adillğin matematiksel ifadesi 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi için yeniden düzenlenerek Denklem (77) ile verilmiştir.

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M R_{i,m})^2}{M \sum_{m=1}^M (\sum_{i=1}^I R_{i,m})^2} \quad (77)$$

Burada I sistemde bulunan LED sayısını, $R_{i,m}$ i . LED ile m . kullanıcı arasındaki elde edilebilir veri iletim hızını ifade etmektedir. Chen ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılan 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modeli için kullanılan simülasyon parametreleri adil bir karşılaştırma için seçilmiştir ve Tablo 7 ile verilmiştir.

Tablo 7. 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistem modeli için simülasyon parametreleri

Parametreler	Değerler
Oda boyutu	$(4, 4, 3) m$
LED sayısı (I)	2
İki LED arasındaki mesafe	1 m
LED'lerin yüksekliği	3 m
Optik güç (P_{opt})	10 W
LED 1'in konumu	$(1.5, 2, 3)m$
LED 2'nin konumu	$(2.5, 2, 3)m$
Alıcı yüksekliği	0.85 m
LED'in görüş açısının yarısı	60°
PD yüzey alanı	$1 cm^2$
PD duyarlılığı	0.53 A/W
PD FOV açısı	72°
Optik filtre kazancı	0.9
Optik lens kazancı	2.5
Sistem bant genişliği	10 MHz
Modülasyon indeksi (ξ)	0.5

PD-NOMA yöntemindeki asıl zorluklardan biri tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sisteminde de bahsedildiği gibi en yüksek toplam veri iletim hızına ulaşmak için kullanıcıların güç tahsis değerlerini belirlemektir. Bu çalışmada, MIMO-NOMA-VLC sistemlerinde adillik kısıtlamasının olduğu ve olmadığı durumlar altında güç tahsis değerlerini belirlemek için tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemine benzer şekilde önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, literatürdeki geleneksel NGDPA ve GRPA yöntemleriyle toplam veri iletim hızı bakımından karşılaştırılmıştır.

Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için sırasıyla Denklemler (62) ve (63) ile verilen GRPA ve NGDPA yöntemleri, 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi için Denklem (76) ile verilen kod çözme sırasına göre i . LED'den kullanıcı m ve kullanıcı $m + 1$ 'e tahsis edilen elektrik güçleri arasındaki ilişki yeniden düzenlenerek GRPA ve NGDPA için sırasıyla Denklemler (78) ve (79) ile verilmiştir.

$$p_{i,m} = \left(\frac{\sum_{j=1}^J h_{ji,m+1}}{\sum_{j=1}^J h_{ji,1}} \right)^{m+1} p_{i,m+1} \quad (78)$$

$$p_{i,m} = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^J h_{ji,m+1}}{\sum_{j=1}^J h_{ji,1}} \right)^m p_{i,m+1} \quad (79)$$

Aşağı yönlü iletim 2×2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi için toplam veri iletim hızını önerilen geleneksel yöntemlere göre daha fazla artırmak için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından olan PSO, SBO, SOS, DE ve ABC kullanılmıştır. Farklı kısıtların olduğu ve olmadığı durumlar için optimizasyon problemlerinin matematiksel ifadeleri oluşturulmuştur.

İncelenen ilk durumda amaç güç kontrolü, kod çözme sırası ve adillik kısıtlamaları altında en yüksek toplam veri iletim hızı elde etmek için güç tahsis katsayılarını optimize etmektir. Oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (80) ve (81) ile verilmiştir.

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_{i,m}} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \frac{B}{2} \log_2(1 + SINR_{i,m}) \quad (80)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M p_{i,m} \leq 1 \\ U_{i,1} < U_{i,2} < \dots < U_{i,M} \\ p_m \in (0,1] \\ F \leq \frac{(\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M R_{i,m})^2}{M \sum_{m=1}^M (\sum_{i=1}^I R_{i,m})^2} \end{array} \right. \quad (81)$$

Burada $SINR_{i,m}$ i . LED ile kullanıcı m arasındaki sinyal girişim artı gürültü oranını temsil etmektedir.

Daha sonra ilk durum için oluşturulan optimizasyon probleminde bulunan adillik kısıtı çıkartılmıştır. Bu durumda oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtların matematiksel ifadesi sırayla Denklemler (82) ve (83) ile verilmiştir.

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_{i,m}} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^2 \frac{B}{2} \log_2(1 + SINR_{i,m}) \quad (82)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M p_{i,m} \leq 1 \\ U_{i,1} < U_{i,2} < \dots < U_{i,M} \\ p_m \in (0,1] \end{cases} \quad (83)$$

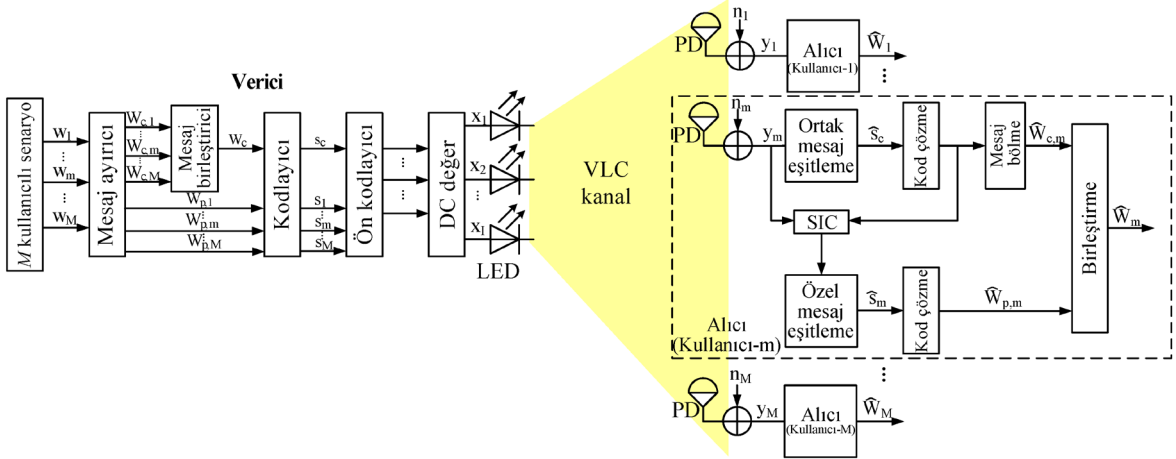
Optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan algoritmaların parametre değerleri Tablo 8 ile verilmiştir.

Tablo 8. 2 x 2 MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi için PSO, SBO, SOS, DE ve ABC algoritmalarının parametre değerleri

Parametreler	Değerler	Algoritma
Parçacık sayısı	20	PSO
İvmelenme katsayıları (c_1, c_2)	2	
Minimum eylemsizlik ağırlığı (w_{min})	0.3	
Maksimum eylemsizlik ağırlığı (w_{max})	0.95	
Rastgele değerler (r_1, r_2)	[0,1]	
Saten çardak kuşu sayısı	20	SBO
En büyük adım boyutu (α)	0.1	
Yayılma faktörünü (z)	0.02	
Mutasyon olasılığı	0.05	
Organizma sayısı	20	SOS
Popülasyon boyutu	20	DE
Çaprazlama oranı (CR)	0.7	
Mutasyon faktörü (FM)	0.5	
Popülasyon boyutu (PZ)	20	ABC
Limit/Deneme sayısı	$PZ * M(Users)$	
Rastgele değer ($\emptyset_{ij}$)	[-1, 1]	
Amaç fonksiyonları	Denklemler (80) ve (82)	PSO, SBO, SOS, DE ve ABC
Üst sınır (ub)	$\mathbf{1}_{1 \times IM}$	
Alt sınır (lb)	$\mathbf{0}_{1 \times IM}$	
Maksimum iterasyon	100	

2.3. RSMA Tabanlı VLC Sistemi

Bu bölümde MU-SISO ve MU-MISO RSMA tabanlı VLC sistemi ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur. Tek katmanlı RSMA yönteminin matematiksel ifadeleri birinci bölümde tek vericili ve M kullanıcıli durum için verilmişti. Şekil 23, I adet LED ile donatılan ve $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ ile indekslenen M kullanıcıli tek katmanlı RS tabanlı aşağı yönlü iletim VLC sisteminin alıcı verici mimarisini göstermektedir.



Şekil 23. RSMA tabanlı M kullanıcıli MISO VLC sistemleri için alıcı verici mimarisi

Burada Şekil 23 ile gösterilen birden çok LED'in kullanıldığı durumda RSMA tabanlı VLC sisteminin matematiksel ifadeleri verilmiştir. Şekil 23 incelendiğinde her kullanıcının mesajı W_m 'nin, ortak alt mesaj $W_{c,m}$ ve yalnızca m . kullanıcı tarafından kodu çözülen özel alt mesaj $W_{p,m}$ olarak iki alt mesaja bölündüğü görülmektedir. Tüm kullanıcıların özel alt mesajları $W_{p,1}, \dots, W_{p,M}$ yalnızca ilgili kullanıcılar tarafından çözülen özel akışlar $s_1, \dots, s_M$ 'ye birbirlerinden bağımsız olarak kodlanır. Daha sonra tüm kullanıcıların ortak alt mesajları $W_{c,1}, \dots, W_{c,M}$ tek bir ortak mesaj W_c 'de birleştirilir ve tüm kullanıcılar tarafından çözülmelidir. W_c paylaşılan ortak bir kod çizelgesi kullanılarak ortak akış s_c 'ye kodlanır. Bu durumda, M adet kullanıcının mesajından $(W_1, \dots, W_M)$, $M + 1$ iletilen sembol vektörü $\mathbf{s} = [s_c, s_1, \dots, s_M]^T \in \mathbb{R}^{(M+1) \times 1}$ oluşturulur. Akışlar, $\mathbf{p}_c, \mathbf{p}_m \in \mathbb{R}^{I \times 1}$ olacak şekilde ön kodlama matrisi $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_c, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_M] \in \mathbb{R}^{I \times (M+1)}$ ile doğrusal olarak kodlanır. Her LED için gerekli olan pozitif sinyali sağlamak amacıyla iletilecek sinyale DC değeri $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{I \times 1}$ eklenir. Bu durumda iletilen sinyal $\mathbf{x} \in \mathbb{R}_+^{I \times 1}$ Denklem (84) ile verilmiştir.

$$\mathbf{x} = \sqrt{\mathbf{P}}\mathbf{s} + \mathbf{A} = \sqrt{\mathbf{p}_c}s_c + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sqrt{\mathbf{p}_m}s_m + \mathbf{A} \quad (84)$$

Optik elektrik dönüşümden sonra kullanıcı m 'de alınan sinyal Denklem (85) ile verilmiştir.

$$y_m = \gamma \mathbf{h}_m^T \sqrt{\mathbf{p}_c} s_c + \gamma \mathbf{h}_m^T \sqrt{\mathbf{p}_m} s_m + \gamma \sum_{m \in \mathcal{M}, j \neq m} \mathbf{h}_m^T \sqrt{\mathbf{p}_j} s_j + n_m, \forall m \in \mathcal{M} \quad (85)$$

Burada $\mathbf{h}_m = [h_{m,1}, \dots, h_{m,L}]^T$ kullanıcı m ile LED'ler arasındaki kanal kazanç vektörünü, n_m toplamsal gürültü vektörünü ve γ PD'nin duyarlılığını temsil etmektedir. Kanal kazanç vektörü ve toplamsal gürültü vektörünün her elemanı sırasıyla Denklemler (1) ve (5) kullanılarak hesaplanabilir. Alıcıda ilk olarak kullanıcı m diğer kullanıcılardan kaynaklanan girişimi gürültü olarak ele alır ve ortak sinyal s_c 'yi çözer. Daha sonra ortak sinyal etkisi SIC yöntemi kullanılarak kaldırılır. SIC işleminden sonra kullanıcı m diğer kullanıcıların özel sinyallerini gürültü olarak alır ve kendi özel mesajı s_k 'yi çözer. Sonuç olarak, kullanıcı m 'deki ortak ve özel sinyallerin kodunun çözülmesinin veri iletim hızları sırasıyla Denklemler (86) ve (87) ile verilmiştir. Analitik ifadeler verilirken gönderilen işaretin güç normalizasyonu 1'e eşit kabul edilmiştir.

$$R_{c,m} = \frac{1}{2} B \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_c}{\sum_{j \in \mathcal{M}} (\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \quad (86)$$

$$R_m = \frac{1}{2} B \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_m}{\sum_{j \in \mathcal{M}, j \neq m} (\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \quad (87)$$

Tüm kullanıcılar tarafından ortak akış s_c 'nin başarılı bir şekilde çözülebilmesi için, tüm kullanıcıların ortak hızlarının minimum değeri kullanıcılar tarafından seçmelidir. Bu durumda ortak oran Denklem (88) ile verilen değeri aşmamalıdır.

$$R_c = \min\{R_{c,1}, \dots, R_{c,M}\} \quad (88)$$

Ortak akış s_c , M kullanıcısının $W_{c,1}, \dots, W_{c,M}$ alt mesajlarını içerdiğinden ortak hızın m . kullanıcıdaki kısmı Denklem (89) ile gösterilebilir.

$$R_c = \sum_{m \in \mathcal{M}} C_m \quad (89)$$

C_m , $W_{c,m}$ için kullanıcı m 'ye tahsis edilen R_c hızını temsil etmektedir. Bu durumda kullanıcı m 'nin elde edilebilir toplam veri hızı Denklem (90) kullanılarak hesaplanabilir.

$$R_{m,toplam} = C_m + R_{p,m}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (90)$$

Denklem (90)'dan görüldüğü üzere her kullanıcının veri iletim hızı, s_m hızı (özel hız) ve s_c hızının ilgili kısmı (ortak hız) olarak iki bölüme ayrılmıştır.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi RSMA, NOMA ve SDMA'yı kapsayan genelleştirilmiş bir MA yöntemidir. RSMA'dan SDMA elde etmek için ortak akışa sıfır güç tahsis edilir ve her kullanıcının mesajı özel akış olarak kodlanır. Dolayısıyla SDMA için iletilen sinyal Denklem (91) ile verilebilir.

$$\mathbf{x} = \sqrt{\mathbf{P}}\mathbf{s} + \mathbf{A} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sqrt{\mathbf{p}_m} s_m + \mathbf{A} \quad (91)$$

Bu durumda her kullanıcıda alınan SINR Denklem (92) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\gamma_{m,SDMA} = \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_m}{\sum_{j \in \mathcal{M}, j \neq m} (\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \quad (92)$$

Benzer şekilde RSMA'dan NOMA'nın nasıl elde edildiğini daha iyi anlamak için iki kullanıcının bulunduğu bir sistem ele alınmıştır. Bu sistemde kullanıcıların mesajlarından biri özel akış, diğeri ortak akış olarak kodlanır. Kullanıcı 1'in kanal kazancının kullanıcı 2'nin kanal kazancından daha büyük olduğu varsayılırsa iletilen sinyal Denklem (93) ile verilebilir.

$$\mathbf{x} = \sqrt{\mathbf{P}}\mathbf{s} + \mathbf{A} = \sum_{m \in \{1,c\}} \sqrt{\mathbf{p}_m} s_m + \mathbf{A} \quad (93)$$

Bu durumda kullanıcıda kullanıcı 1 ve 2'de alınan SINR sırasıyla Denklemler (94) ve (95) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\gamma_{1,NOMA} = \frac{(\mathbf{h}_1^T)^2 \mathbf{p}_1}{\sigma_1^2} \quad (94)$$

$$\gamma_{2,NOMA} = \min \left(\frac{(\mathbf{h}_1^T)^2 \mathbf{p}_c}{(\mathbf{h}_1^T)^2 \mathbf{p}_1 + \sigma_1^2}, \frac{(\mathbf{h}_2^T)^2 \mathbf{p}_c}{(\mathbf{h}_2^T)^2 \mathbf{p}_1 + \sigma_2^2} \right) \quad (95)$$

2.3.1. Senaryo 1

Oluşturulan ilk senaryoda NOMA ve RSMA tabanlı VLC sisteminin toplam veri iletim hızı performansı karşılaştırmak amacıyla Bölüm 2.1’de verilen sistem modeli kullanılmıştır. Bu nedenle sistem modeli ve simülasyon parametreleri için sırasıyla Şekil 21 ve Tablo 5 dikkate alınmıştır. Bu durumda aşağı yönlü iletim MU-SISO RSMA tabanlı VLC sistemi için ortak mesaj hız tahsisi ve güç kontrolü kısıtlamaları altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Oluşturulan optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu ve kısıtlamalarının matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (96) ve (97) ile verilmiştir.

$$R_{T,RSMA} = \max_{p_m, C_m} \sum_{m=1}^M \left[C_m + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_m}{h_m^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M p_j + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (96)$$

$$\sum_{m=1}^M C_m \leq \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_c}{h_m^2 \sum_{j=1}^M p_j + \sigma_m^2} \right) \quad (97a)$$

$$p_c + \sum_{m=1}^M p_m \leq P_{max} \quad (97b)$$

$$C_m \geq 0, p_m \geq 0, p_c \geq 0, \forall m \in \mathcal{M} \quad (97c)$$

Burada P_{max} LED’in maksimum iletim gücünü temsil eder. Kısıt (97a) her kullanıcının ortak mesajı çözebilmesini ve kısıt (97b) iletim gücünün P_{max} ile sınırlı olmasını sağlar. Oluşturulan bu optimizasyon problemini ve tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için oluşturulan optimizasyon problemini çözmek amacıyla meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından PSO algoritması kullanılmıştır. Kullanılan PSO algoritmasının parametre değerleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Senaryo 1 için PSO algoritmasının parametre değerleri

Parametreler	Değerler
Parçacık sayısı	20
İvmelenme katsayıları (c_1, c_2)	2
Minimum eylemsizlik ağırlığı (w_{min})	0.3
Maksimum eylemsizlik ağırlığı (w_{max})	0.95
Rastgele değerler (r_1, r_2)	[0,1]
Amaç fonksiyonları	Denklemler (64) ve (96)
Üst sınır (ub)	$12_{1 \times IM}$
Alt sınır (lb)	$0_{1 \times IM}$
Maksimum iterasyon	500

2.3.2. Senaryo 2

Yapılan bu çalışmada önerilen yöntemin performansını adil bir şekilde değerlendirmek için Hu ve arkadaşları tarafından 2023 yılında yapılan çalışmada kullanılan sistem modeli ele alınmıştır (Hu vd., 2023). Aşağı yönlü iletim MU-SISO VLC sisteminin toplam veri iletim hızı performansı RSMA, NOMA ve OMA tabanlı yöntemler için karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan simülasyon parametreleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Senaryo 2 için simülasyon parametreleri

Parametreler	Değerler
Oda boyutu	(5, 5, 3) m
LED sayısı (I)	1
LED'in konumu	(2.5, 2.5, 3)m
PD 1'in konumu	(0.5, 1, 1)m
PD 2'nin konumu	(1.5, 1, 1)m
PD 3'ün konumu	(2.5, 1, 1)m
PD yüzey alanı	1 cm ²
LED'in görüş açısının yarısı	60°
PD duyarlılığı	0.3 A/W
PD FOV açısı	60°
PD kırılma indisi	1.5
Optik filtre kazancı	1

Oluşturulan ikinci senaryoda toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla aşağı yönlü iletim MU-SISO RSMA ve NOMA tabanlı VLC sistem modeli için optimizasyon problemi oluşturulmuştur.

Aşağı yönlü iletim MU-SISO RSMA tabanlı VLC sistemi için ortak mesaj, QoS, SIC ve güç kontrolü kısıtlamaları altında oluşturulan optimizasyon problemini çözmek amacıyla amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (98) ve (99) ile verilmiştir.

$$R_{T,RSMA} = \max_{p_m, C_m} \sum_{m=1}^M \left[C_m + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_m}{h_m^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M p_j + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (98)$$

$$\sum_{m=1}^M C_m \leq \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_c}{h_m^2 \sum_{j=1}^M p_j + \sigma_m^2} \right) \quad (99a)$$

$$C_m + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_m}{h_m^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M p_j + \sigma_m^2} \right) \geq R_m, \forall m \in \mathcal{M} \quad (99b)$$

$$p_c + \sum_{m=1}^M p_m \leq P_{max} \quad (99c)$$

$$h_m^2 p_c - \left(h_m^2 \sum_{j=1}^M p_j + \sigma_m^2 \right) \geq \alpha_m, \forall m \in \mathcal{M} \quad (99d)$$

$$C_m \geq 0, p_m \geq 0, p_c \geq 0, \forall m \in \mathcal{M} \quad (99e)$$

Burada R_m , m kullanıcısının minimum hız talebini temsil eder. Kısıt (99b) tüm kullanıcıların QoS gereksinimlerini yani tüm kullanıcılar için minimum hızı karşılayabilmesini ve kısıt (99d) SIC işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Ayrıca kısıt (99d) ile verilen ifadede α , kod çözme sinyal gücü ile kodu çözülmemiş kullanıcılar arası girişim sinyali gücü artı gürültü gücü arasındaki minimum farktır. α değeri, ortak mesajın kodunun doğru bir şekilde çözülmesini sağlamak için belirlenen hata oranının altında olacak şekilde seçilmelidir ($\alpha_m/\sigma_m^2 = 10dB$) (M. S. Ali vd., 2016, 2018). Oluşturulan sistem modeli incelendiğinde kullanıcıların kazanımlarının sırasıyla $h_1 \leq h_2 \leq \dots \leq h_K$ şeklinde artan sırada olduğu varsayılır. Bu durumda kısıt (99d) Denklem (100)'de verildiği gibi basitleştirilebilir.

$$p_c - \sum_{j=1}^M p_j \geq \frac{\alpha_1 + \sigma_1^2}{h_1^2} \quad (100)$$

Aşağı yönlü iletim MU-SISO NOMA tabanlı VLC sisteminde QoS, kod çözme sırası, SIC ve güç kontrolü kısıtlamaları altında oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (101) ve (102) ile verilmiştir.

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_m} \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_m}{\sum_{l=m+1}^M h_m^2 p_l + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (101)$$

$$\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h_m^2 p_m}{\sum_{l=m+1}^M h_m^2 p_l + \sigma_m^2} \right) \geq R_m \quad (102a)$$

$$U_1 > U_2 > \dots > U_M \quad (102b)$$

$$\sum_{m=1}^M p_m \leq P_{max} \quad (102c)$$

$$h_{m+1}^2 p_m - \left(\sum_{l=m+1}^M h_{m+1}^2 p_l + \sigma_m^2 \right) \geq \alpha_m \quad (102d)$$

$$p_m \geq 0 \quad (102e)$$

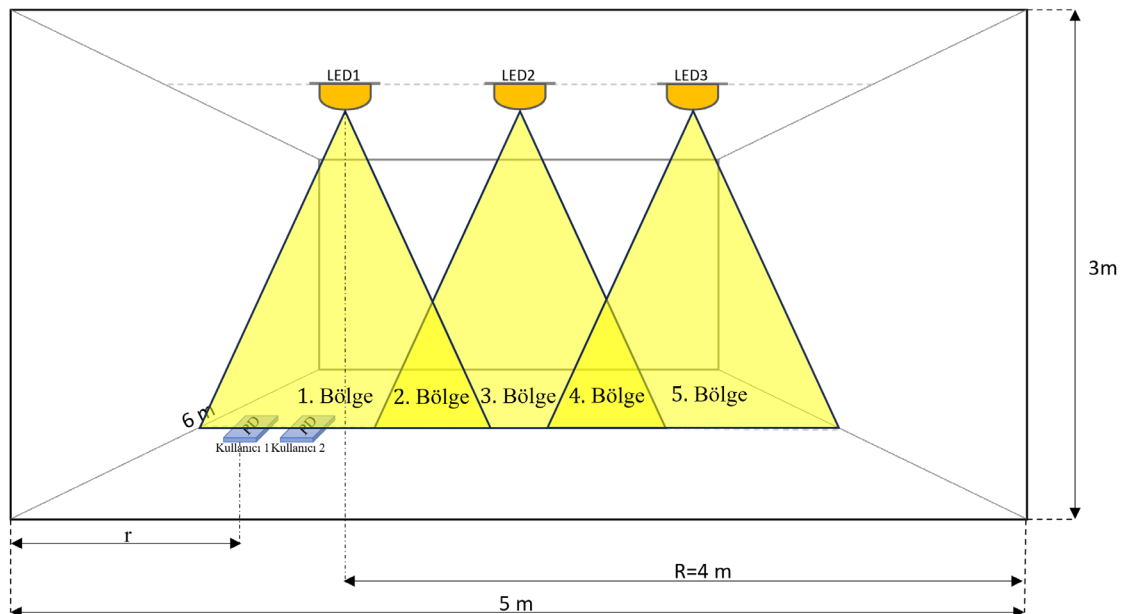
Yapılan çalışmada, oluşturulan optimizasyon problemlerini çözmek için PSO algoritması kullanılmıştır. Kullanılan PSO algoritmasının parametre değerleri Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Senaryo 2 için PSO algoritmasının parametre değerleri

Parametreler	Değerler
Parçacık sayısı	20
İvmelenme katsayıları (c_1, c_2)	2
Minimum eylemsizlik ağırlığı (w_{min})	0.3
Maksimum eylemsizlik ağırlığı (w_{max})	0.95
Rastgele değerler (r_1, r_2)	[0,1]
Amaç fonksiyonları	Denklemler (98) ve (101)
Üst sınır (ub)	$\mathbf{1}_{1 \times IM}$
Alt sınır (lb)	$\mathbf{0}_{1 \times IM}$
Maksimum iterasyon	500

2.3.3. Senaryo 3

LED'lerin ve kullanıcıların görüş alanına göre oluşabilecek farklı durumları incelemek amacıyla Şekil 24'te verilen aşağı yönlü iletim MU-MISO VLC sistem modeli oluşturulmuştur. Oluşabilecek farklı durumlar altında RSMA, NOMA ve SDMA yöntemleri toplam veri iletim hızı ve adillik bakımından karşılaştırılmıştır. RSMA veri iletim hızını artırmak için kullanıcıların verilerini belirli bir hızda bölüştürerek daha verimli bir şekilde paylaşım sağlamakta ve aynı zamanda girişim yönetimi ile adilliği geliştirmeye yönelik esneklik sunmaktadır. NOMA ise aynı frekans kaynağını kullanıcılara farklı güç seviyelerinde paylaştırarak yüksek veri iletim hızı sağlamakta ancak kullanıcılara tahsis edilen farklı güç seviyelerinden dolayı adillik konusunda karmaşıklık oluşturmaktadır. SDMA ise fiziksel alanları kullanarak aynı frekans bandında farklı kullanıcılara veri iletimi sağlamaktadır. Bu sayede yüksek veri iletim hızı sunarken, adillik kullanıcıların konumlarına göre değişmektedir. Bu üç yöntemin karşılaştırılması her birinin veri iletim hızları ve adillik konusundaki avantajlarını ve sınırlamalarını ortaya koymaktadır. Bu karşılaştırma, hangi durumlarda hangi yöntemin tercih edilmesi gerektiğini anlamak için temel bir değerlendirme sunmaktadır. Şekil 24 üç adet LED ve iki kullanıcının bulunduğu aşağı yönlü iletim VLC sistem modelini göstermektedir.



Şekil 24. Üç LED iki kullanıcıli iç mekân aşağı yönlü iletim VLC sistem modeli

Şekil 24 ile gösterilen sistemde, tüm kullanıcıların LED 1, LED 2 ve LED 3 hatlarına paralel bir hat üzerinde ve yerden 0.85 m yükseklikte bulunduğu, kullanıcı 1 ile kullanıcı 2'nin birbirlerine bağlı olduğu ve aralarındaki mesafenin 0.4 m olduğu varsayılmıştır. Bu durumda kullanıcı 1 ve kullanıcı 2 birlikte hareket edecek ve kullanıcı 2 kullanıcı 1'den 0.4 m önde olacaktır. Şekil incelendiğinde LED 1'in konumu ile sistem kapsamının sınırı arasındaki mesafe $R = 4\text{ m}$ ve odanın başlangıç noktası ile kullanıcı 1 arasındaki mesafe r olduğu görülmektedir. Kullanıcı 1'in odanın başlangıç noktasına göre normalize edilmiş ofseti r/R olarak tanımlanmıştır. Ayrıca oluşturulan sistemde LED'lerin görüş alanından dolayı beş adet bölge oluşmaktadır. Bu durumda 1. bölgede sadece LED 1'in, 2. bölgede LED 1 ve LED 2'nin, 3. bölgede sadece LED 2'nin, 4. Bölgede LED 2 ve LED 3'ün ve son olarak 5. bölgede sadece LED 3'ün görüş alanı bulunmaktadır. Yapılan çalışmada çeşitli sayısal sonuçları elde etmek amacıyla normalize edilmiş ofset değeri kullanılmıştır ve bu değer 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu sayede normalize edilmiş ofset değeri arttıkça kullanıcıların bulunduğu bölgeler değişmektedir. Çalışmada kullanılan simülasyon parametreleri Tablo 12 ile verilmiştir.

Tablo 12. Senaryo 3 için simülasyon parametreleri

Parametreler	Değerler
Oda boyutu	$(5, 6, 3)\text{ m}$
LED sayısı (I)	3
LED'ler arasındaki mesafe	1.5 m
LED'lerin yüksekliği	3 m
LED 1'in konumu	$(1, 3, 3)\text{m}$
LED 2'nin konumu	$(2.5, 3, 3)\text{m}$
LED 3'ün konumu	$(4, 3, 3)\text{m}$
Alıcı yüksekliği	0.85 m
LED'in görüş açısının yarısı	30°
PD yüzey alanı	1 cm^2
PD duyarlılığı	1 A/W
PD FOV açısı	30°
Optik filtre kazancı	1
Optik lens kazancı	3
Gürültü yoğunluğu	$3.9811 \times 10^{-14}\text{ A}^2/\text{Hz}$

Aşağı yönlü iletim RSMA, NOMA ve SDMA tabanlı VLC sistemleri toplam veri iletim hızı bakımından karşılaştırılmıştır. Farklı kısıtların olduğu ve olmadığı durumlar için optimizasyon problemleri oluşturulmuştur. Oluşturulan tüm optimizasyon problemlerinde toplam veri iletim hızı amaç fonksiyonu olarak alınmıştır.

RSMA yöntemi için incelenen ilk durumda ortak mesaj ve güç kontrolü kısıtlamaları altında oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (103) ve (104) ile verilmiştir.

$$R_{T,RSMA} = \max_{\mathbf{p}_m, \mathbf{c}_m} \sum_{m=1}^M \left[\mathbf{c}_m + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_m}{(\mathbf{h}_m^T)^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (103)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M \mathbf{c}_m \leq \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_c}{(\mathbf{h}_m^T)^2 \sum_{j=1}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \\ \mathbf{p}_c + \sum_{m=1}^M \mathbf{p}_m \leq \mathbf{1}_{I \times 1} \\ \mathbf{c}_m \geq \mathbf{0}, \mathbf{p}_m \geq \mathbf{0}, \mathbf{p}_c \geq \mathbf{0}, \forall m \in \mathcal{M} \end{array} \right. \quad (104)$$

NOMA yöntemi için incelenen ilk durumda güç kontrolü ve kullanıcıların kanal kazançlarına göre kod çözme sırası kısıtlamaları altında oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (105) ve (106) ile verilmiştir.

$$R_{T,NOMA} = \max_{\mathbf{p}_{i,m}} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \log_2 (1 + \text{SINR}_{i,m}) \quad (105)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M \mathbf{p}_{i,m} \leq 1 \\ h_{i,1} \geq h_{i,2} \Rightarrow U_{i,1} < U_{i,2} \wedge h_{i,2} \geq h_{i,1} \Rightarrow U_{i,2} < U_{i,1} \\ \mathbf{p}_{i,m} \geq 0 \end{array} \right. \quad (106)$$

SDMA yöntemi için incelenen ilk durumda güç kontrolü kısıtı altında oluşturulan optimizasyon problemi için amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi sırasıyla Denklemler (107) ve (108) ile verilmiştir.

$$R_{T,SDMA} = \max_{\mathbf{p}_m} \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_m}{(\mathbf{h}_m^T)^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (107)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M \mathbf{p}_m \leq \mathbf{1}_{I \times 1} \\ \mathbf{p}_m \geq \mathbf{0} \end{cases} \quad (108)$$

RSMA, NOMA ve SDMA yöntemleri için incelenen ikinci durumda ilk durum için oluşturulan optimizasyon problemlerine adillik kısıtı eklenmiştir. Bu durumda yeniden oluşturulan optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi RSMA için sırasıyla Denklemler (109) ve (110), NOMA için sırasıyla Denklemler (111) ve (112), SDMA için sırasıyla Denklemler (113) ve (114) ile verilmiştir.

$$R_{T,RSMA} = \max_{\mathbf{p}_m, \mathbf{c}_m} \sum_{m=1}^M \left[\mathbf{c}_m + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_m}{(\mathbf{h}_m^T)^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (109)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M \mathbf{c}_m \leq \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_c}{(\mathbf{h}_m^T)^2 \sum_{j=1}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \\ \mathbf{p}_c + \sum_{m=1}^M \mathbf{p}_m \leq \mathbf{1}_{I \times 1} \\ F \leq \frac{(\sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^M R_{i,m})^2}{M \sum_{m=1}^M (\sum_{i=1}^3 R_{i,m})^2} \\ \mathbf{c}_m \geq \mathbf{0}, \mathbf{p}_m \geq \mathbf{0}, \mathbf{p}_c \geq \mathbf{0}, \forall m \in \mathcal{M} \end{cases} \quad (110)$$

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_{i,m}} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \log_2 (1 + SINR_{i,m}) \quad (111)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M p_{i,m} \leq 1 \\ h_{i,1} \geq h_{i,2} \Rightarrow U_{i,1} < U_{i,2} \wedge h_{i,2} \geq h_{i,1} \Rightarrow U_{i,2} < U_{i,1} \\ F \leq \frac{(\sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^M R_{i,m})^2}{M \sum_{m=1}^M (\sum_{i=1}^3 R_{i,m})^2} \\ p_m \geq 0 \end{cases} \quad (112)$$

$$R_{T,SDMA} = \max_{\mathbf{p}_m} \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T)^2 \mathbf{p}_m}{(\mathbf{h}_m^T)^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (113)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M \mathbf{p}_m \leq \mathbf{1}_{I \times 1} \\ F \leq \frac{(\sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^M R_{i,m})^2}{M \sum_{m=1}^M (\sum_{i=1}^3 R_{i,m})^2} \\ \mathbf{p}_m \geq \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (114)$$

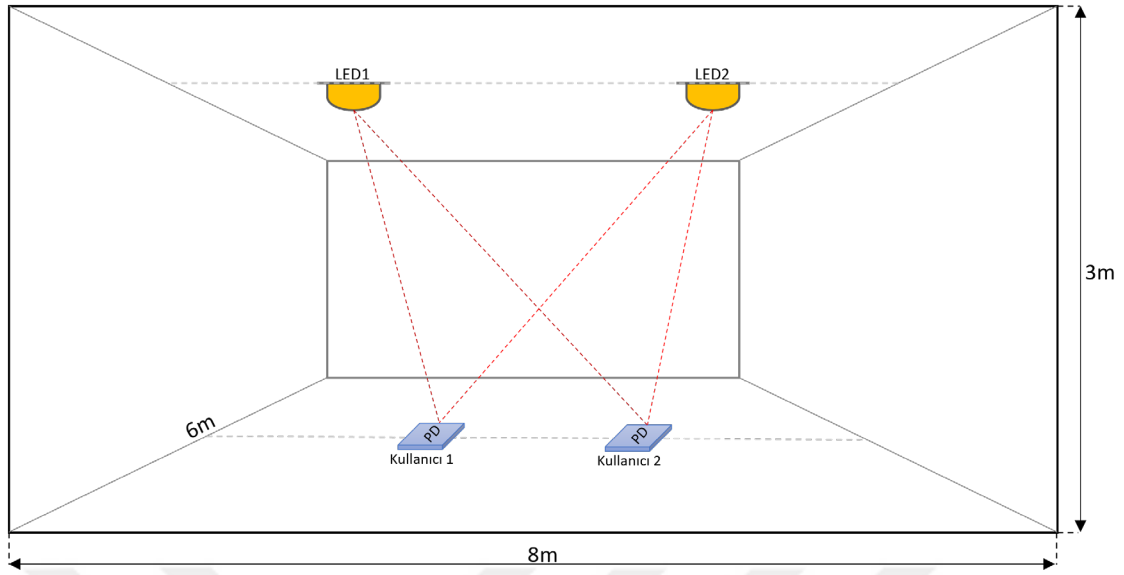
Yapılan çalışmada, oluşturulan optimizasyon problemlerini çözmek için PSO algoritması kullanılmıştır. Kullanılan PSO algoritmasının parametre değerleri Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Senaryo 3 için PSO algoritmasının parametre değerleri

Parametreler	Değerler
Parçacık sayısı	20
İvmelenme katsayıları (c_1, c_2)	2
Minimum eylemsizlik ağırlığı (w_{min})	0.3
Maksimum eylemsizlik ağırlığı (w_{max})	0.95
Rastgele değerler (r_1, r_2)	[0,1]
Amaç fonksiyonları	Denklemler (103), (105), (107), (109), (111) ve (113)
Üst sınır (ub)	$\mathbf{1}_{1 \times IM}$
Alt sınır (lb)	$\mathbf{0}_{1 \times IM}$
Maksimum iterasyon	500

2.3.4. Senaryo 4

Oluşturulan son senaryoda aşağı yönlü iletim MU-MISO RSMA ve NOMA tabanlı VLC sistemlerinin toplam veri iletim hızı performansı kusursuz ve kusurlu CSI altında karşılaştırılmıştır. Şekil 25 iki LED ve iki kullanıcının bulunduğu aşağı yönlü iletim VLC sistem modelini göstermektedir. Bu sistem modelinde her kullanıcı tek bir PD ile donatılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan simülasyon parametreleri Tablo 14'te verilmiştir.



Şekil 25. İki LED iki kullanıcı iç mekân aşağı yönlü iletim VLC sistem modeli

Tablo 14. Senaryo 4 için simülasyon parametreleri

Parametreler	Değerler
Oda boyutu	$(8, 6, 3) m$
LED sayısı (I)	2
LED 1'in konumu	$(2, 3, 3)m$
LED 2'nin konumu	$(6, 3, 3)m$
LED'lerin yüksekliği	3 m
PD 1'in konumu	$(3, 3, 1)m$
PD 2'nin konumu	$(5, 3, 1)m$
Alıcı yüksekliği	0.85 m
LED'in görüş açısının yarısı	65°
PD yüzey alanı	$1 cm^2$
PD FOV açısı	72°
PD kırılma indisi	1.5
Optik filtre kazancı	1
Optik lens kazancı	2.5
Sistem bant genişliği	30 MHz

Oluşturulan son senaryoda kusursuz CSI altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla RSMA için Denklemler (103), (104) ve NOMA için sırasıyla Denklemler (105), (106) kullanılmıştır. Kusurlu CSI durumu için LED 1 ve LED 2'ye göre kullanıcıların kanal kazançlarına farklı varyanslarda bozucu etki eklenmiştir. Bu durumda yeniden oluşturulan optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların matematiksel ifadesi RSMA için sırasıyla Denklemler (115) ve (116), NOMA için sırasıyla Denklemler (117) ve (118) ile verilmiştir.

$$R_{T,RSMA} = \max_{\mathbf{p}_m, \mathbf{c}_m} \sum_{m=1}^M \left[\mathbf{c}_m + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T + \mathbf{e}^T)^2 \mathbf{p}_m}{(\mathbf{h}_m^T + \mathbf{e}^T)^2 \sum_{j=1, j \neq m}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \right] \quad (115)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M \mathbf{c}_m \leq \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(\mathbf{h}_m^T + \mathbf{e}^T)^2 \mathbf{p}_c}{(\mathbf{h}_m^T + \mathbf{e}^T)^2 \sum_{j=1}^M \mathbf{p}_j + \sigma_m^2} \right) \\ \mathbf{p}_c + \sum_{m=1}^M \mathbf{p}_m \leq \mathbf{1}_{I \times 1} \\ \mathbf{c}_m \geq \mathbf{0}, \mathbf{p}_m \geq \mathbf{0}, \mathbf{p}_c \geq \mathbf{0}, \forall m \in \mathcal{M} \end{array} \right. \quad (116)$$

$$R_{T,NOMA} = \max_{p_{i,m}} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \log_2 (1 + SINR_{i,m}) \quad (117)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M p_{i,m} \leq 1 \\ (h_{i,1} + \mathbf{e}^T) \geq (h_{i,2} + \mathbf{e}^T) \Rightarrow U_{i,1} < U_{i,2} \wedge (h_{i,2} + \mathbf{e}^T) \geq (h_{i,1} + \mathbf{e}^T) \Rightarrow U_{i,2} < U_i \\ p_{i,m} \geq 0 \end{array} \right. \quad (118)$$

Burada $\mathbf{e}$, sıfır ortalamalı σ^2 varyanslı Gauss gürültüsüdür ve kanalın bozucu etkisini temsil etmektedir. Yapılan çalışmada, optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan PSO algoritmasının parametre değerleri Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 15. Senaryo 4 için PSO algoritmasının parametre değerleri

Parametreler	Değerler
Parçacık sayısı	20
İvmelenme katsayıları (c_1, c_2)	2
Minimum eylemsizlik ağırlığı (w_{min})	0.3
Maksimum eylemsizlik ağırlığı (w_{max})	0.95
Rastgele değerler (r_1, r_2)	[0,1]
Amaç fonksiyonları	Denklemler (103), (105), (115) ve (117)
Üst sınır (ub)	$\mathbf{1}_{1 \times IM}$
Alt sınır (lb)	$\mathbf{0}_{1 \times IM}$
Maksimum iterasyon	500

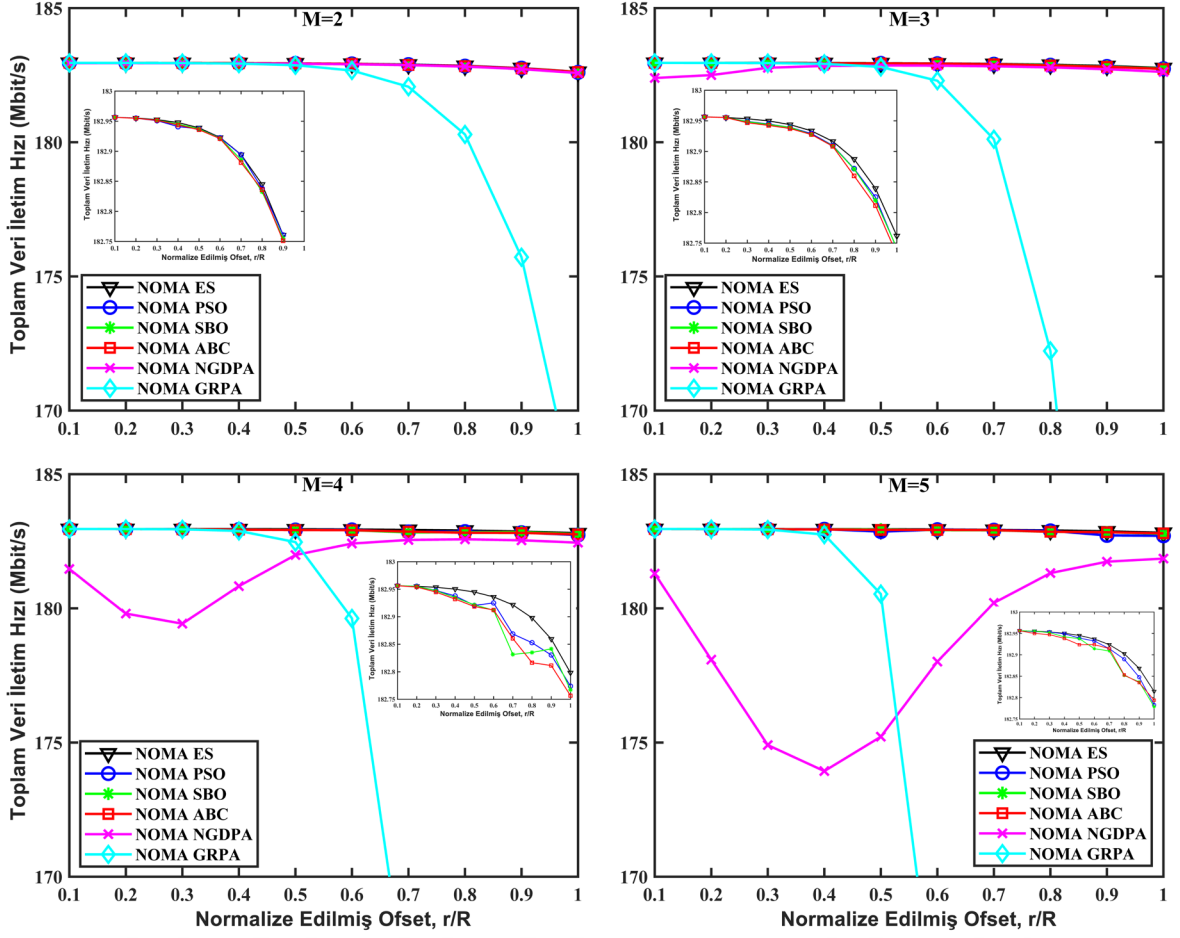
3. BULGULAR

Bu bölümde, yapılan çalışmalarda verilen MA yöntemlerinin toplam veri iletim hızı performansı incelenmiştir. MA yöntemleri için oluşturulan optimizasyon problemleri meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak çözülmüş ve analizler gerçekleştirilmiştir. NOMA tabanlı yöntemlerde literatürde önerilen geleneksel güç tahsis yöntemleri ile bu çalışmada önerilen yöntemler farklı kısıtlar altında karşılaştırılmış ve ayrıca MIMO-NOMA tabanlı VLC sistemi OFDMA tabanlı VLC sistemi ile karşılaştırılmış ve sayısal analiz sonuçları verilmiştir. RSMA tabanlı yöntemler ise farklı senaryolarda farklı kısıtlar altında NOMA, SDMA ve OMA yöntemleri ile karşılaştırılmış ve sayısal analiz sonuçları verilmiştir.

3.1. Tek LED PD-NOMA Tabanlı VLC Sistemi İçin Bulgular

Şekil 21 ile verilen tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistem modeli ve Tablo 5’te verilen simülasyon parametreleri kullanılarak adillik, optik yoğunluk gibi kısıtlamaların olduğu ve olmadığı durumlarda toplam veri iletim hızı normalize edilmiş ofsete göre verilmiştir. Toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla literatürde önerilen GRPA ve NGDPA için sırasıyla Denklemler (62) ve (63) kullanılarak kullanıcıların güç tahsis katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmada farklı kısıtların olduğu ve olmadığı durumlarda güç tahsis katsayıları meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak bulunmuştur. Kullanılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının parametreleri Tablo 6’da verilmiştir.

M kullanıcının bulunduğu sistem için ilk durumda adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken elde edilen sonuçlar Şekil 26’da verilmiştir. Sonuçları elde etmek için oluşturulan optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu ve kısıtları sırasıyla Denklemler (64) ve (65)’te verilmiştir. Ayrıca oluşturulan optimizasyon problemi ES algoritması ile çözülerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 26. MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 26 geleneksel güç tahsis yöntemleri, önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ve ES algoritması kullanılarak elde edilen toplam veri iletim hızını normalize edilmiş ofsete göre göstermektedir. Önerilen meta-sezgisel yöntemlerin, geleneksel yöntemlere göre daha yüksek toplam veri iletim hızı sağladığı görülmektedir. Özellikle normalize edilmiş ofset değerinin bir'e yaklaştığı ve güç tahsis değerlerinin hesaplanması zor olan kullanıcı sayısının arttığı durumlarda meta-sezgisel yöntemlerle elde edilen toplam veri iletim hızı hemen hemen değişmezken, geleneksel yöntemlerle elde edilen toplam veri iletim hızı azalmaktadır. Ayrıca, NGDPA yönteminde toplam veri iletim hızı, kullanıcı sayısının artmasıyla dalgalandığı görülmektedir. NGDPA'da minimum hızın $M = 4$ için $r/R = 0.3$ ve $M = 5$ için $r/R = 0.4$ 'te elde edildiği görülmüştür. Bunun nedeni, kullanıcı 1'in LED'e göre SNR'nın azalmasıdır. Ayrıca bu durum için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının optimum değere ne kadar yaklaştığını göstermek amacıyla ES algoritması kullanılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile ES

algoritması kullanılarak elde edilen sonuçların birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 26’da verilen toplam veri iletim hızı değerlerinin ortalaması Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken ortalama toplam veri iletim hızı değerleri

Kullanıcı Sayısı	Ortalama toplam veri iletim hızı (<i>Mbit/s</i>)					
	PSO	SBO	ABC	ES	NGDPA	GRPA
2	182.8760	182.8744	182.8750	182.8796	182.8593	180.1721
3	182.9021	182.9013	182.8977	182.9097	182.7189	172.5027
4	182.8909	182.8902	182.8863	182.9174	181.6042	159.1565
5	182.8830	182.9034	182.9037	182.9208	178.6568	151.8951

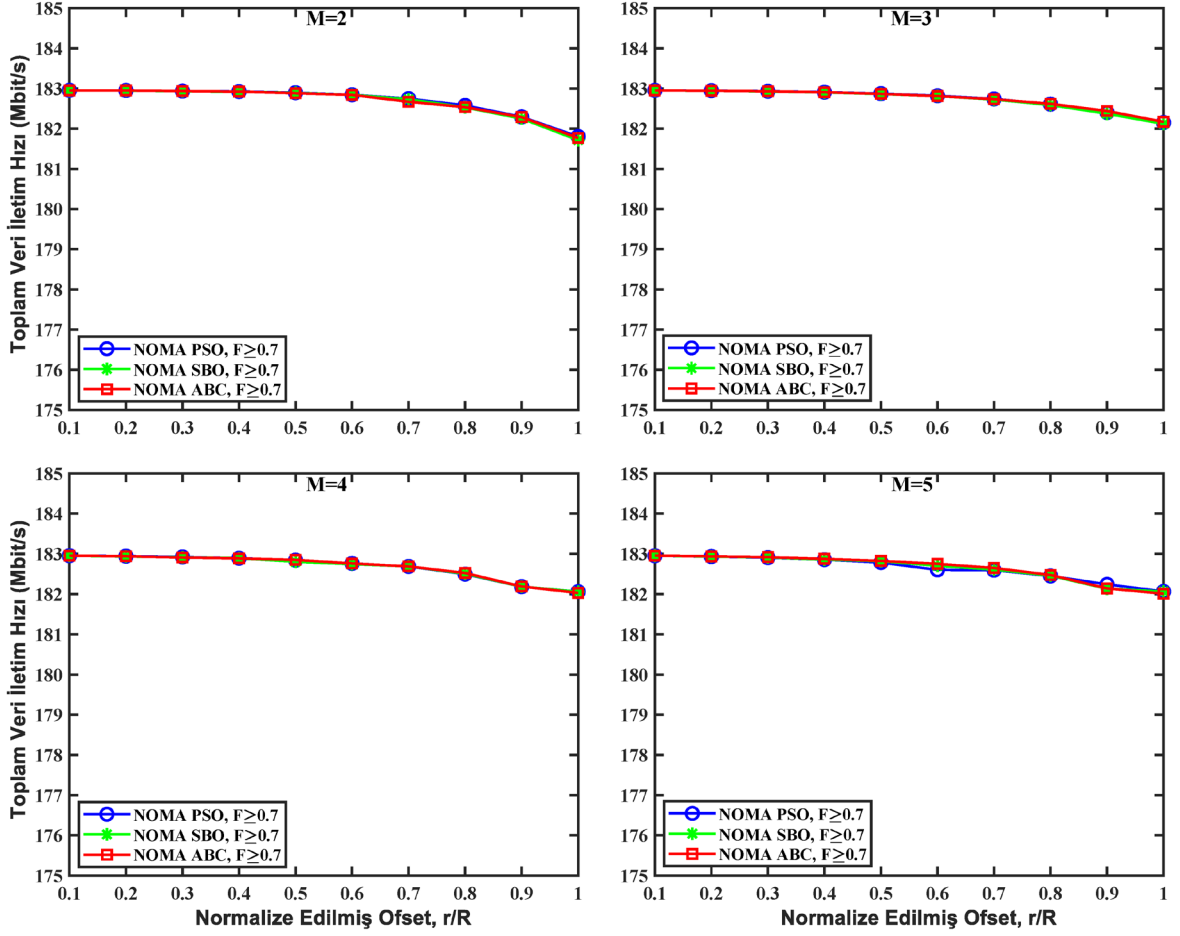
Tablo 16’da elde edilen değerler incelendiğinde, önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının ve ES algoritmasının ortalama toplam veri iletim hızının GRPA ve NGDPA yöntemlerindeki değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca ES algoritmasının toplam veri iletim hızının önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının ortalama veri iletim hızından 2, 3, 4 ve 5 kullanıcı için sırasıyla ~%0.0025, ~%0.0051, ~%0.0155 ve ~%0.0132 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Bu nedenle meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının optimuma yakın bir değere ulaştığı söylenebilir. Ayrıca Şekil 26’da elde edilen toplam veri iletim hızlarını bulmak amacıyla kullanıcıların elde edilebilir veri iletim hızı ve güç tahsis katsayıları kullanılarak ortalama adillik, ortalama optik yoğunluk ve ortalama optik yoğunluk değerlerine göre ortalama işaretin değişimi Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken ortalama adillik, ortalama optik yoğunluk ve ortalama işaretin değişimi değerleri

Kullanıcı Sayısı	Adillik (F)					
	PSO	SBO	ABC	ES	NGDPA	GRPA
2	0.5980	0.5964	0.5997	0.5882	0.6794	0.7901
3	0.4631	0.4613	0.4656	0.4349	0.6688	0.6487
4	0.4221	0.4150	0.4505	0.3530	0.6621	0.4755
5	0.3609	0.3486	0.3765	0.3006	0.6321	0.3742
	Optik yoğunluk (CO)					
2	4.8922	4.8961	4.8933	4.8990	4.7272	4.4425
3	5.9690	5.9690	5.9473	6.0000	5.1318	4.8262
4	6.7828	6.7380	6.7090	6.2707	5.1080	4.9282
5	7.5779	7.6436	7.5384	7.7459	4.9380	4.9424
	İşaretin değişimi ($\pm$)					
2	6.5636	6.5688	6.5651	6.5727	6.3422	5.9602
3	8.0083	8.0083	7.9791	8.0498	6.8850	6.4750
4	9.1001	9.0400	9.0011	8.4130	6.8531	6.6119
5	10.1668	10.2550	10.1138	10.3922	6.6250	6.6309

İşaretin değişiminden elde edilen değerlere göre eklenecek DC değer (A) minimum değerlerin mutlak değeri kadar olmalıdır.

Geleneksel NGDPA, GRPA yöntemlerinin herhangi bir kısıt alamamasına rağmen önerilen meta-sezgisel yöntemlerle adillik ve optik yoğunluk dahil olmak üzere çeşitli kısıtlara göre güç tahsis değerleri hesaplanabilir. NGDPA yöntemi geleneksel güç tahsisi yöntemleri arasında en yüksek toplam veri iletim hızına ulaşabildiğinden, adil bir karşılaştırma için önerilen meta-sezgisel yöntemlerin adillik değerleri NGDPA yönteminin adillik değerlerinden az olmayacak şekilde seçilerek ($F \geq 0.7$) analizler tekrarlanmıştır. Şekil 27 adillik kısıtı altında optik yoğunluk kısıtı yokken elde edilen toplam veri iletim hızını normalize edilmiş ofsete göre göstermektedir.



Şekil 27. MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtı altında toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

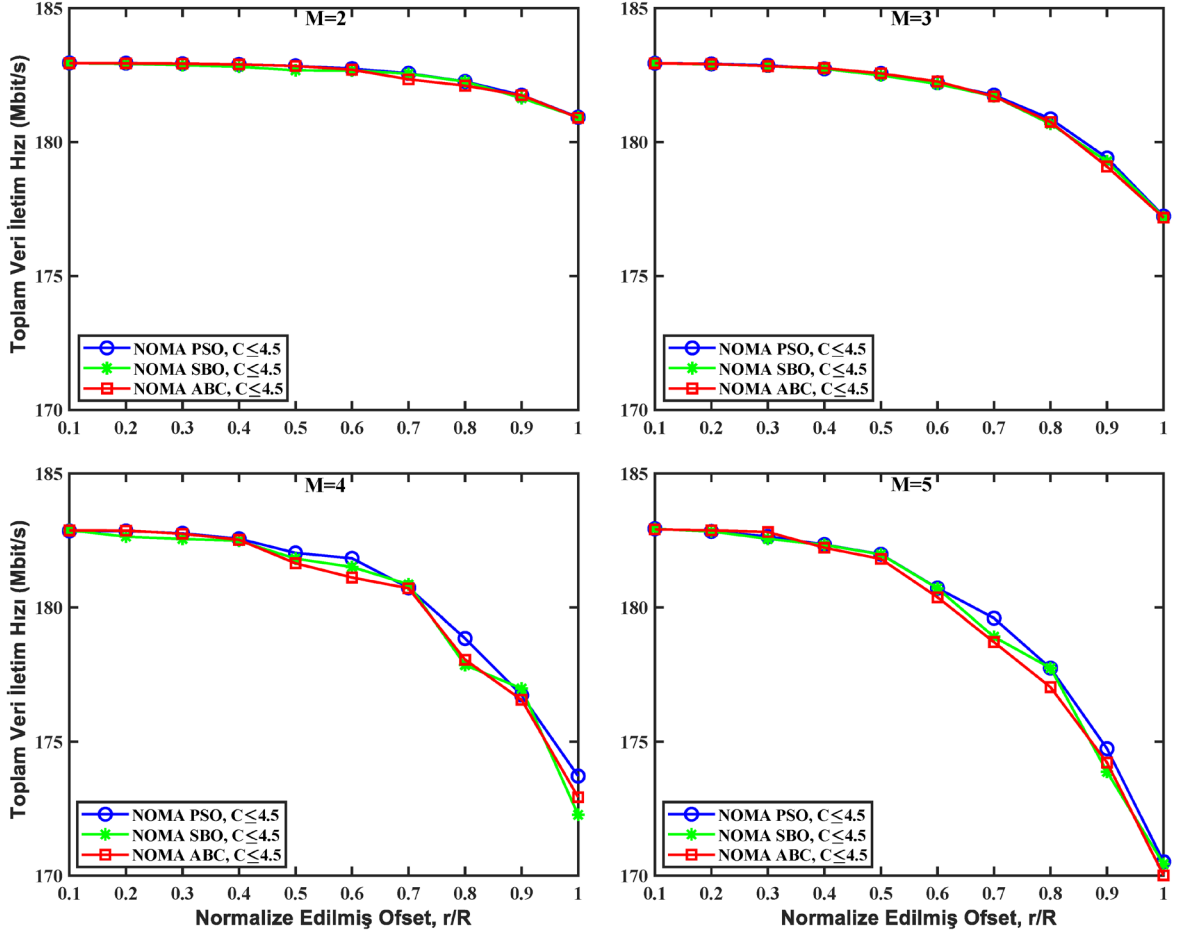
Şekil 27 incelendiğinde önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının adillik kısıtı altında elde edilen toplam veri iletim hızlarının birbirlerine çok yakın olduğu ve Şekil 26 ile karşılaştırıldığında genel olarak toplam veri iletim hızı bakımından geleneksel GRPA ve NGDPA yöntemlerine göre daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 27’de elde edilen toplam veri iletim hızı değerleri için ortalama adillik, ortalama optik yoğunluk ve ortalama optik yoğunluk değerlerine göre ortalama işaretin değişimi Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtı altında ortalama adillik, ortalama optik yoğunluk ve ortalama işaretin değişimi değerleri ($F \geq 0.7$)

Kullanıcı Sayısı	Adillik (F)			Optik yoğunluk (CO)			İşaretin değişimi ($\pm$)		
	PSO	SBO	ABC	PSO	SBO	ABC	PSO	SBO	ABC
2	0.7054	0.7127	0.7175	4.6870	4.6687	4.6564	6.2883	6.2637	6.2472
3	0.7020	0.7133	0.7045	5.4693	5.4221	5.4611	7.3378	7.2745	7.3268
4	0.7078	0.7076	0.7028	6.1544	6.1860	6.1199	8.2570	8.2994	8.2107
5	0.7100	0.7100	0.7090	6.5632	6.7729	6.7730	8.8055	9.0868	9.0869

Tablo 17 ve Tablo 18 incelendiğinde adillik ile optik yoğunluk arasında zıt bir ilişki olduğu yani adillik arttığında optik yoğunluk değerinin azaldığı görülmektedir. Tablo 18’de verilen işaretin değişimine göre eklenecek DC değer Tablo 17’de verilen değerlerden 2, 3, 4 ve 5 kullanıcı durum için sırasıyla $\sim 5\%$, $\sim 9\%$, $\sim 9.7\%$ ve $\sim 14\%$ daha az seçilebilir. Bu durum, 2, 3, 4 ve 5 kullanıcı için maksimum parlaklığı sırasıyla $\sim 8\%$, $\sim 17\%$, $\sim 18\%$ ve $\sim 26\%$ azaltmak anlamına gelmektedir.

Tablo 17’de verilen optik yoğunluk değerlerine göre adil bir karşılaştırma için önerilen meta-sezgisel yöntemlerin optik yoğunluk değeri NGDPA yönteminin optik yoğunluk değerinden fazla olmayacak şekilde seçilerek ($CO \leq 4.5$) analizler optik yoğunluk kısıtı altında adillik kısıtı yokken tekrarlanmıştır. Bu durumda Şekil 28 elde edilen toplam veri iletim hızını normalize edilmiş ofsete göre göstermektedir.



Şekil 28. MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi için optik yoğunluk kısıtı altında toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 28 incelendiğinde kullanıcı sayısının arttığı durumda toplam veri iletim hızının giderek düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni optik yoğunluk değerinin sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü kullanıcı sayısının artmasıyla birlikte Tablo 17 ve Tablo 18 de görüldüğü üzere optik yoğunluk değeri artmaktadır. Ayrıca Şekil 26 ve Şekil 28 karşılaştırıldığında toplam veri iletim hızı ile optik yoğunluk arasında doğru orantıya dayalı bir ilişki olduğu yani optik yoğunluk değeri artırıldığında toplam veri iletim hızının arttığı görülmektedir. Adillik kısıtı yokken optik yoğunluk kısıtı altında elde edilen toplam veri iletim hızı değerleri için ortalama adillik, ortalama optik yoğunluk ve ortalama optik yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen ortalama işaretin değişimi Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 19. Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemi için optik yoğunluk kısıtı altında adillik, optik yoğunluk ve işaretin değişiminin ortalama değerleri ($CO \leq 4.5$)

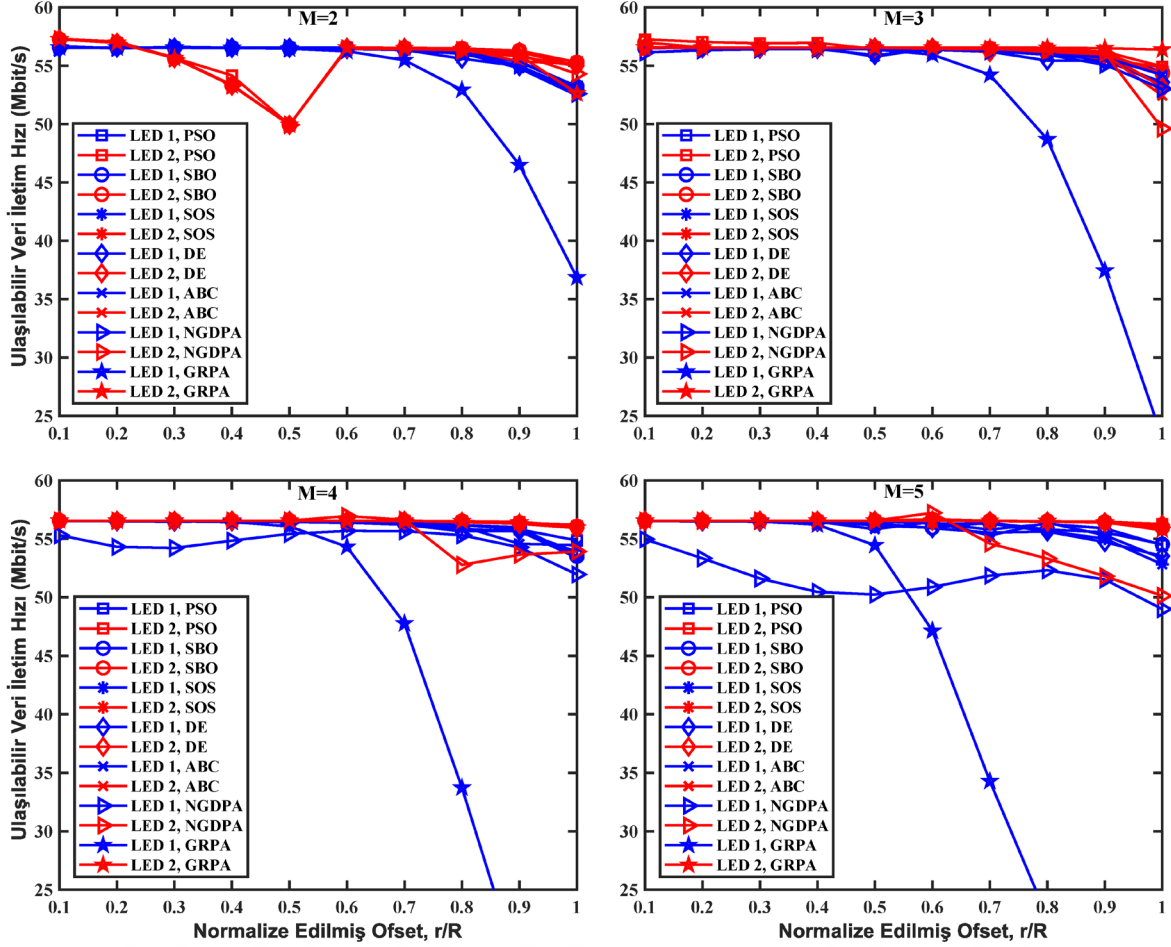
Kullanıcı Sayısı	Adillik (F)			Optik yoğunluk (CO)			İşaretin değişimi ($\pm$)		
	PSO	SBO	ABC	PSO	SBO	ABC	PSO	SBO	ABC
2	0.7795	0.7957	0.7903	4.4966	4.3217	4.4597	6.0328	5.7982	5.9833
3	0.8096	0.8115	0.8083	4.4817	4.4756	4.4808	6.0128	6.0046	6.0116
4	0.7888	0.7882	0.7876	4.4916	4.4787	4.4802	6.0261	6.0088	6.0108
5	0.6223	0.6172	0.6188	4.4934	4.4914	4.4116	6.0285	6.0258	5.9188

Tablo 17 ve Tablo 19 incelendiğinde adillik ile optik yoğunluk arasında zıt bir ilişki olduğu bu durumda da görülmektedir. Tablo 17’de verilen optik yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen maksimum parlaklık değerleri, Tablo 19 ile verilen optik yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen maksimum parlaklık değerlerinden 2, 3, 4 ve 5 kullanıcı için sırasıyla $\sim 22\%$, $\sim 43\%$, $\sim 56\%$ ve $\sim 65\%$ oranında azalmıştır.

3.2. MIMO-NOMA Tabanlı VLC Sistemi İçin Bulgular

Şekil 21 ile verilen M kullanıcı iç mekân NOMA ve RSMA tabanlı VLC sistem modeli ve Tablo 7’de verilen simülasyon parametreleri kullanılarak LED’lerin ulaşılabilir veri iletim hızı, toplam veri iletim hızı ve GRPA’ya göre önerilen PSO algoritmasının toplam veri iletim hızının kazancı normalize edilmiş ofsete göre verilmiştir. Literatürde önerilen GRPA ve NGDPA yöntemlerinin matematiksel ifadeleri verilen sistem modeline göre yeniden düzenlenerek sırasıyla Denklemler (78) ve (79) ile verilmiş ve bu denklemler kullanılarak kullanıcıların güç tahsis katsayıları hesaplanmıştır. En yüksek toplam veri iletim hızını elde etmek amacıyla güç kontrolü, kod çözme sırası ve adillik gibi kısıtlamalar altında güç tahsis katsayılarını optimize etmek için yapılan bu çalışmada meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Kullanılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının parametreleri Tablo 8’de verilmiştir.

Şekil 29, her bir LED’in elde edilebilir bit hızını, M kullanıcının bulunduğu 2×2 MIMO NOMA tabanlı VLC sisteminde normalize edilmiş ofsete göre göstermektedir. Burada her bir LED’in elde edilebilir veri iletim hızı, LED tarafından hizmet verilen M kullanıcının toplam elde edilebilir veri iletim hızıdır.

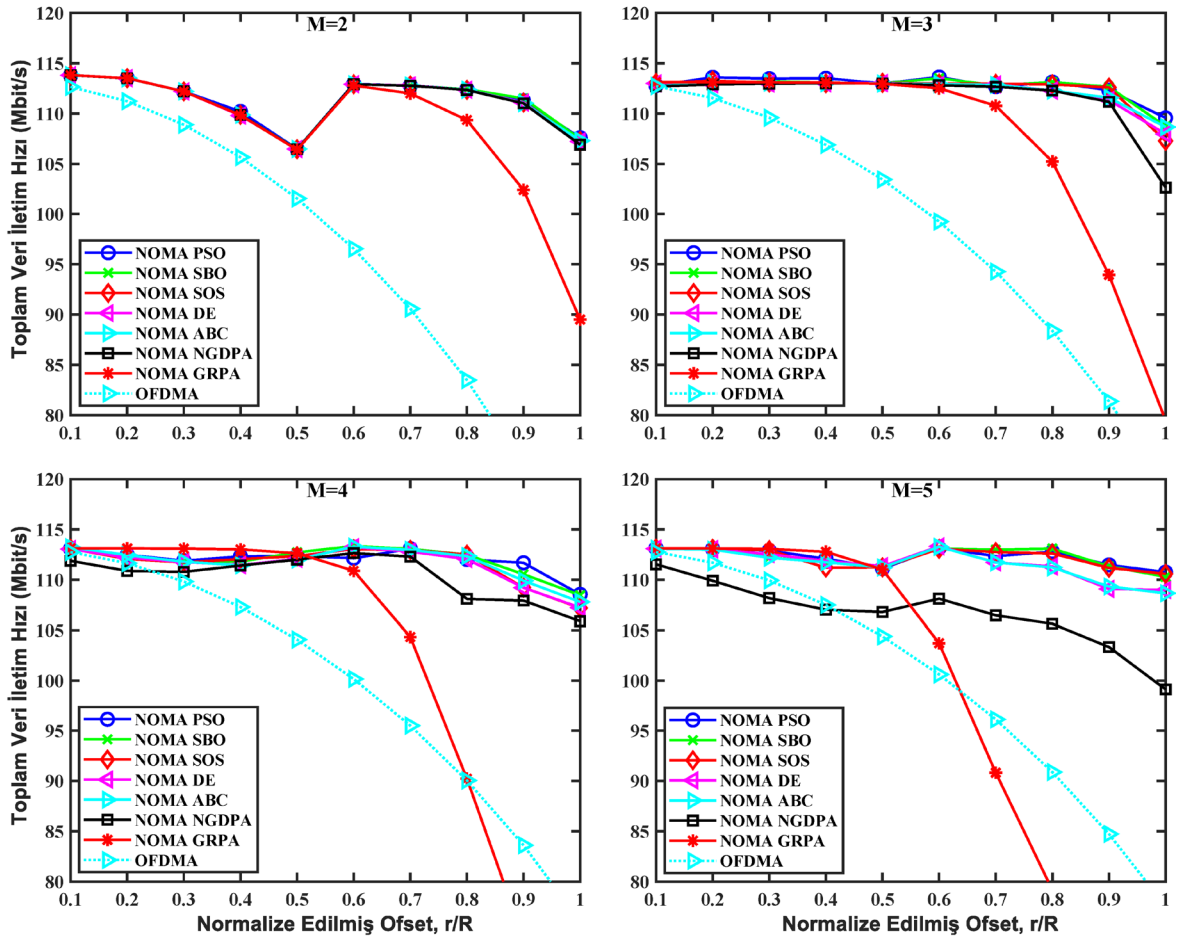


Şekil 29. M kullanıcı 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemleri için her bir LED'in ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Geleneksel GRPA ve NGDPA yöntemleri hiçbir kısıtlama almamaktadır. Fakat önerilen meta-sezgisel yöntemler kullanılarak adillik dahil olmak üzere çeşitli kısıtlamalar altında güç tahsis değerleri kolayca hesaplanabilir. NGDPA yöntemi geleneksel güç tahsis yöntemleri arasında en yüksek toplam veri iletim hızı değerlerine ulaşabilir. Bu nedenle, Şekil 29'da adil bir karşılaştırma için NGDPA yönteminin adillik değerlerinden daha az olmayacak şekilde seçilerek sayısal sonuçlar Denklemler (80) ve (81) kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 29 iki kullanıcı durum için incelendiğinde LED 1'in tüm yöntemlerde elde edilebilir veri iletim hızının $0.1 \leq r/R \leq 0.6$ aralığında yaklaşık 56.5 Mbit/s olduğu görülmektedir. LED 1 için r/R daha da artırıldığında önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının ulaşılabilir veri iletim hızının diğer yöntemlerden daha iyi olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının birbirlerine çok yakın değerler ürettiği ve geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. LED 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızlarının kullanılan tüm

yöntemler için anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. LED 2'nin iki kullanıcının bulunduğu durumda tüm yöntemlerde $r/R = 0.5$ 'te 49.4 Mbit/s minimum hıza ulaştığı görülmüştür. Bunun nedeni kullanıcıların LED 2'ye göre aynı kanal koşullarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 29 genel olarak incelendiğinde kullanıcı sayısının ve r/R değerinin artmasıyla birlikte yani işlem karmaşıklığının arttığı durumda hem LED 1'in hem de LED 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızları geleneksel yöntemlere göre azalırken önerilen meta-sezgisel yöntemlere göre yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmektedir.

Şekil 30, M kullanıcının bulunduğu sistem için OFDMA ve NOMA tabanlı yöntemler kullanan 2×2 MIMO VLC sisteminde elde edilebilir toplam veri iletim hızını normalize edilmiş ofsete göre göstermektedir. NOMA için Şekil 29 ile verilen LED 1 ve 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızları toplanarak Şekil 30'da verilen toplam veri iletim hızları elde edilmiştir.



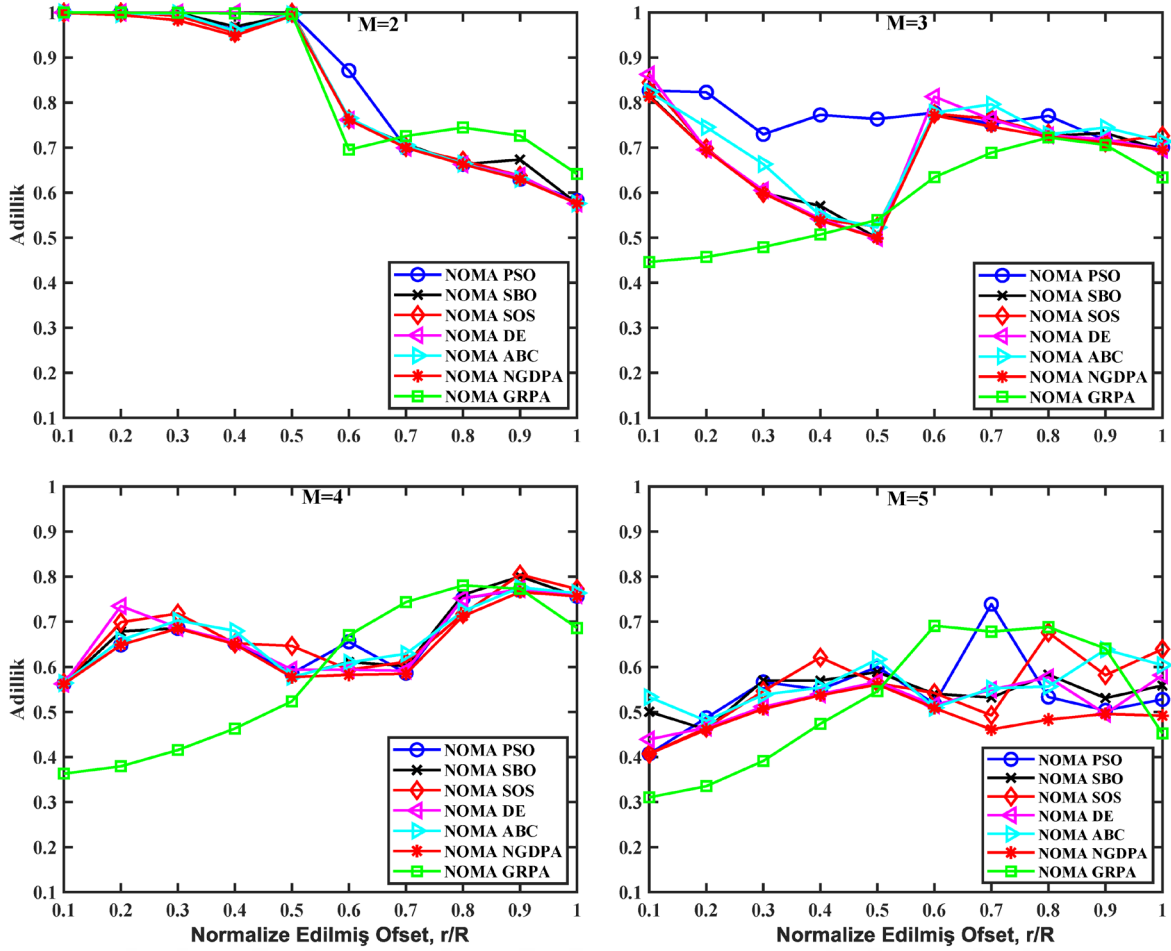
Şekil 30. M kullanıcı 2×2 MIMO VLC sisteminde OFDMA ve NOMA kullanılarak elde edilebilir toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 30 incelendiğinde OFDMA kullanıldığı durumda r/R 'nin artmasıyla toplam veri iletim hızının sürekli olarak azaldığı ve NOMA kullanıldığı durumda önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının toplam veri iletim hızı açısından geleneksel yöntemlere göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Önerilen meta-sezgisel yöntemler ile geleneksel yöntemler arasındaki elde edilen toplam veri iletim hızı farkı, kullanıcı sayısı arttıkça ve/veya normalize edilmiş ofset değeri 1'e yaklaştıkça önemli ölçüde artar. Kullanıcı sinyal gücü değerlerinin farklılaştığı ve kullanıcı sayısının arttığı durumlarda veya başka bir deyişle çözümün daha karmaşık hale geldiği durumlarda, geleneksel yöntemlerle elde edilen toplam veri iletim hızı azalırken, önerilen yöntemlerdeki toplam veri iletim hızı neredeyse değişmez. Şekil 30'da verilen toplam veri iletim hızı değerlerinin ortalaması Tablo 20'de verilmiştir. Ek olarak Denklem (77) kullanılarak elde edilen adillik değerleri Şekil 31'de verilmiştir.

Tablo 20. 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtı altında ortalama toplam veri iletim hızı değerleri

Kullanıcı Sayısı	Ortalama toplam veri iletim hızı (<i>Mbit/s</i>)							
	NOMA							OFDMA
	PSO	SBO	SOS	DE	ABC	NGDPA	GRPA	
2	111.5519	111.2945	111.2261	111.2189	111.2257	110.5755	108.1802	95.0090
3	112.7659	112.5936	112.4156	112.2246	112.3171	111.6105	106.7317	98.0516
4	112.7512	111.9585	111.6211	111.5066	111.7241	110.3813	100.6402	99.0956
5	112.6641	112.2243	112.1766	111.6313	111.5443	106.6091	96.5771	99.6187

Şekil 29, Şekil 30 ve Tablo 20 genel olarak incelendiğinde önerilen meta-sezgisel yöntemlerin geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.



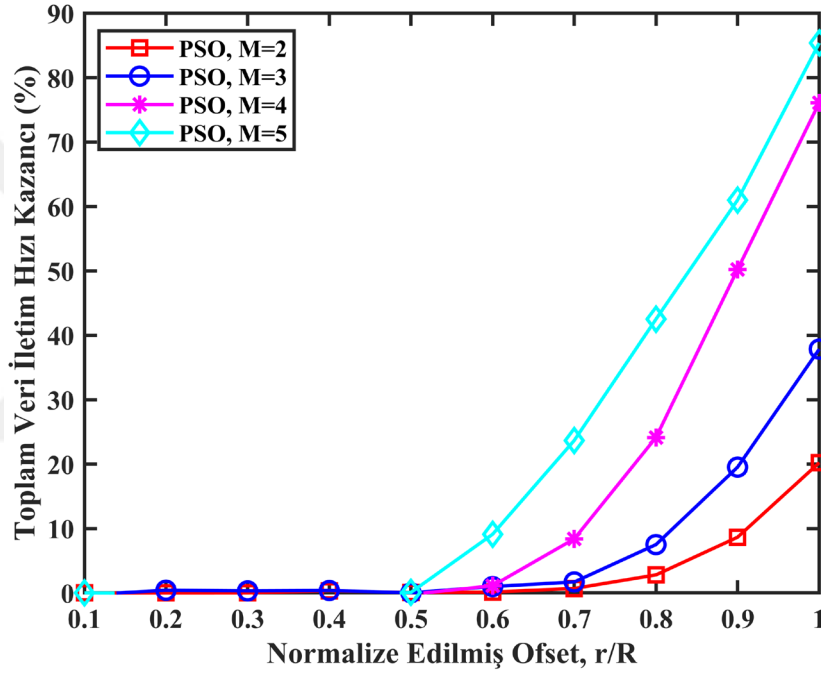
Şekil 31. M kullanıcı 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sisteminde adillik değerlerinin normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 31 incelendiğinde önerilen meta-sezgisel yöntemlerin adillik değerlerinin, NGDPA yönteminin adillik değerlerinden az olmadığı görülmektedir. Şekil 30'da GRPA yönteminin bazı bölgelerde NGDPA yönteminden daha yüksek toplam veri iletim hızı değerleri elde etmesine rağmen, Şekil 31'deki aynı bölgelerde daha düşük adillik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Tüm yöntemlerin ortalama adillik değerleri Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 21. 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için ortalama adillik değerleri

Kullanıcı Sayısı	Adillik (F)						
	PSO	SBO	SOS	DE	ABC	NGDPA	GRPA
2	0.840	0.834	0.829	0.833	0.829	0.825	0.852
3	0.763	0.687	0.691	0.692	0.706	0.679	0.581
4	0.666	0.668	0.678	0.670	0.669	0.653	0.580
5	0.543	0.543	0.554	0.524	0.558	0.491	0.521

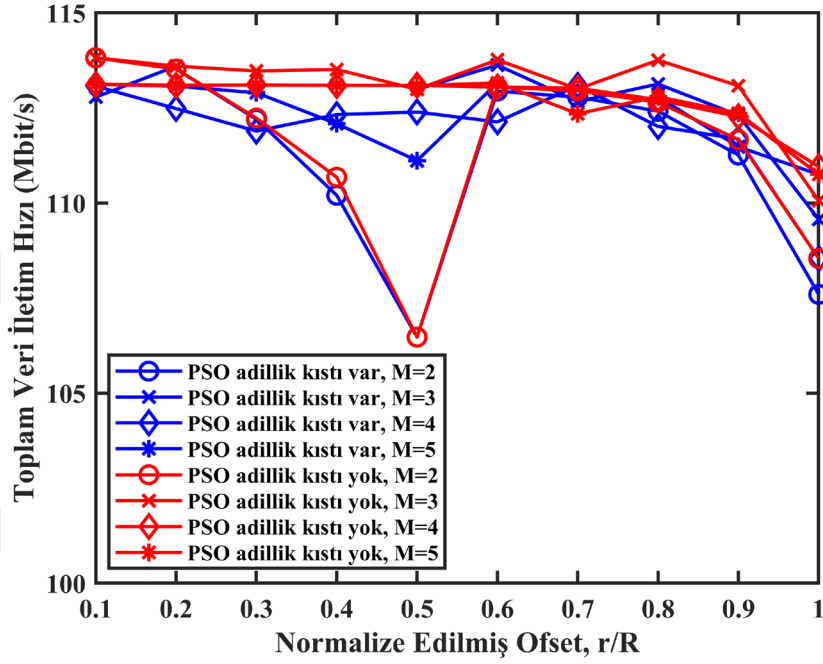
Şekil 31 ve Tablo 21 incelendiğinde, meta-sezgisel yöntemlerin adillik değerlerinin NGDPA yönteminden daha iyi olduğu ve kullanılan tüm meta-sezgisel algoritmaların birbirine yakın değerler verdiği görülmektedir. Genel olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları arasında PSO algoritmasının diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Bu nedenle, analizlere PSO algoritması kullanılarak devam edilmiştir. Şekil 32 PSO algoritmasının GRPA'ya kıyasla toplam veri iletim hızı kazancının normalize edilmiş ofsete göre değişimini göstermektedir.



Şekil 32. 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için PSO algoritmasının GRPA'ya göre toplam veri iletim hızı kazancının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 32 incelendiğinde normalize edilmiş ofset değerinin ve kullanıcı sayısının artmasıyla toplam veri iletim hızı kazancının arttığı görülmektedir. $r/R = 1$ yani kullanıcı M 'nin Şekil 22'de verilen sistem modelinde odanın kenarına yerleştiği durumda 2, 3, 4 ve 5 kullanıcı için toplam veri iletim hızı kazançları sırasıyla %20.3, %37.9, %76.1 ve %85.4 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere kullanıcı sayısı arttıkça ve/veya normalize edilmiş ofset değeri arttıkça yani çözümün daha karmaşık hale geldiği durumlarda önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının çok daha iyi olduğu ortaya konulmuştur.

Adillik kısıtlama olarak alınmadığı durumda önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak elde edilen toplam veri iletim hızı değerleri daha yüksek olabilir. Adillik kısıtının olmadığı durumda PSO algoritması kullanılarak Denklemler (82) ve (83) çözülmüştür. Şekil 33'te 2, 3, 4 ve 5 kullanıcı için PSO algoritması ile elde edilen toplam veri iletim hızı değerleri adillik kısıtının olduğu ve olmadığı durum için karşılaştırılmıştır. Adillik kısıtının olduğu durum için Şekil 30'da elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.



Şekil 33. 2 x 2 MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için adillik kısıtının olduğu ve olmadığı durumda PSO algoritması ile elde edilen toplam veri iletim hızı değerlerinin normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 33 incelendiğinde, adillik değerinin bir kısıtlama olarak alınmadığı durumlarda toplam veri iletim hızı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda adillik ile toplam veri iletim hızı arasında zıt bir ilişkinin olduğu söylenebilir.

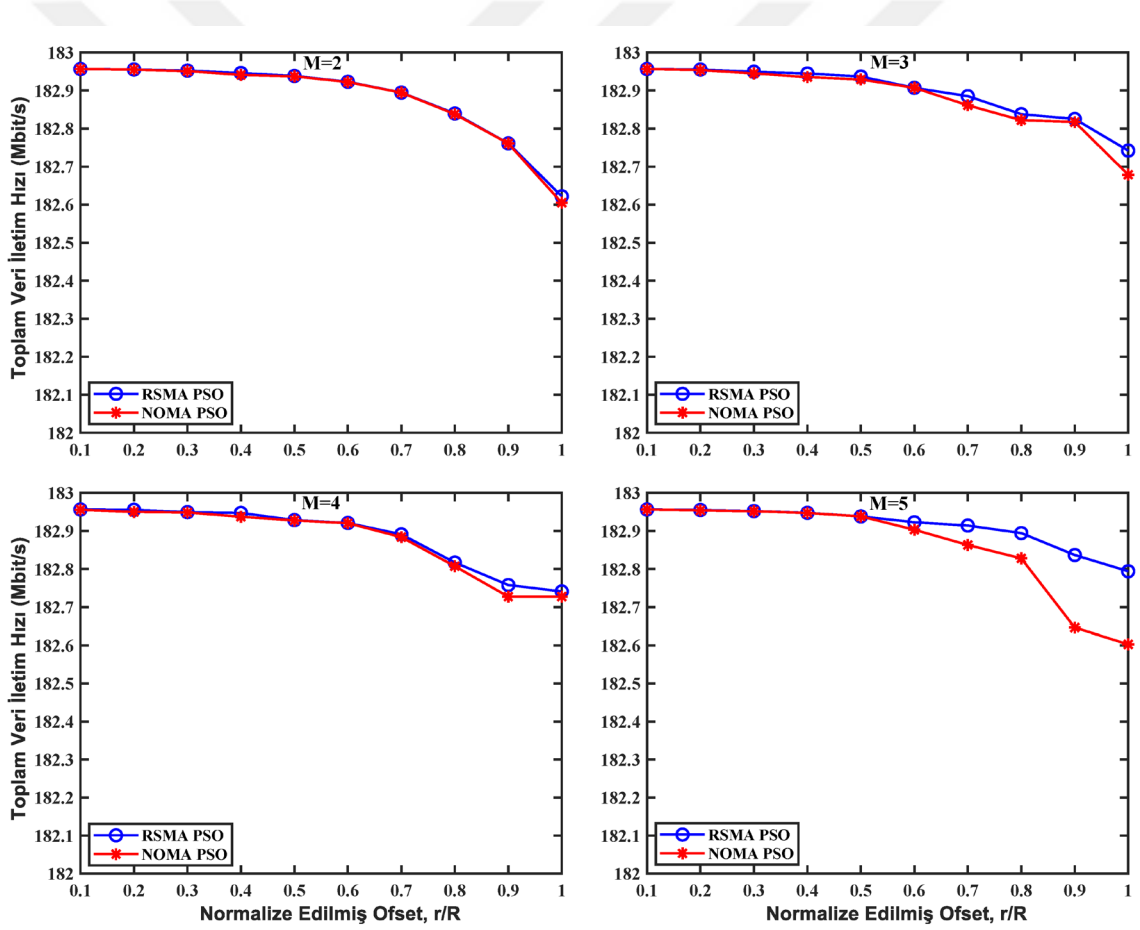
3.3. RSMA Tabanlı VLC Sistemi İçin Bulgular

RSMA tabanlı VLC sistemlerinde yapılan çalışmalarda bahsedildiği üzere dört farklı senaryo oluşturulmuş ve bu senaryolar kullanılarak bulgular elde edilmiştir. Birinci ve ikinci senaryoda MU-SISO sistem ve üçüncü dördüncü senaryoda MU-MISO sistem için bulgular elde edilmiştir.

3.3.1. Senaryo 1

Tek LED PD-NOMA tabanlı VLC sistemde adillik ve optik yoğunluk kısıtı yokken PSO algoritması kullanılarak elde edilen bulgular RSMA yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve NOMA ile RSMA karşılaştırılmıştır.

M kullanıcının bulunduğu sistem için elde edilen sonuçlar Şekil 34'te verilmiştir. RSMA yöntemi kullanılarak sonuçları elde etmek için oluşturulan optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu ve kısıtları sırasıyla Denklemler (96) ve (97)'de verilmiştir. Oluşturulan optimizasyon problemini çözmek için PSO algoritmaları kullanılmıştır. Kullanılan PSO algoritmasının parametreleri Tablo 9'da verilmiştir.



Şekil 34. M kullanıcılu MU-SISO VLC sisteminde RSMA ve NOMA kullanılarak elde edilebilir toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

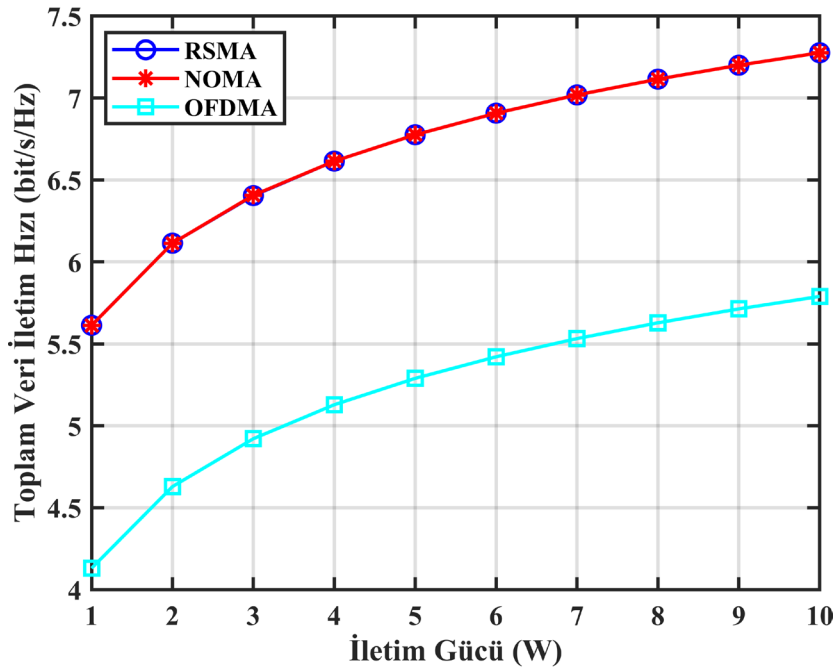
Şekil 34 incelendiğinde RSMA'nın toplam veri iletim hızı açısından NOMA ile yaklaşık olarak aynı performansı gösterdiği görülmektedir. Ancak RSMA ortak mesajın

hızını, kullanıcıların hız talebini karşılamak için birden fazla kullanıcıya tahsis ederken, NOMA’da kodu çözölen sinyalin hızı yalnızca belirli bir kullanıcıya tahsis edilir. Ayrıca RSMA yönteminde her alıcıda tek bir SIC katmanı kullanılırken NOMA yönteminde çok katmanlı SIC kullanır. Bu nedenle RSMA yönteminin daha az karmaşıklıkla NOMA yöntemine yakın performans sergileyen bir alternatif olduğu gösterilmiştir.

3.3.2. Senaryo 2

İkinci senaryoda RSMA ve NOMA yöntemi kullanılarak sonuçları elde etmek için oluşturulan optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonları sırasıyla Denklemler (98) ve (101)’de kısıtları sırasıyla Denklemler (99) ve (102)’de verilmiştir. Oluşturulan optimizasyon problemlerini çözmek için PSO algoritması kullanılmıştır. Kullanılan PSO algoritmasının parametreleri Tablo 11’de verilmiştir.

Şekil 35, MU-SISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve OMA kullanılarak elde edilebilir toplam veri iletim hızının iletim gücüne göre karşılaştırılmasını gösterir. Hu ve arkadaşları tarafından 2023 yılında yapılan çalışma incelendiğinde (Hu vd., 2023), yapılan tez çalışmasında önerilen PSO algoritmasının SCA algoritmasına daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.



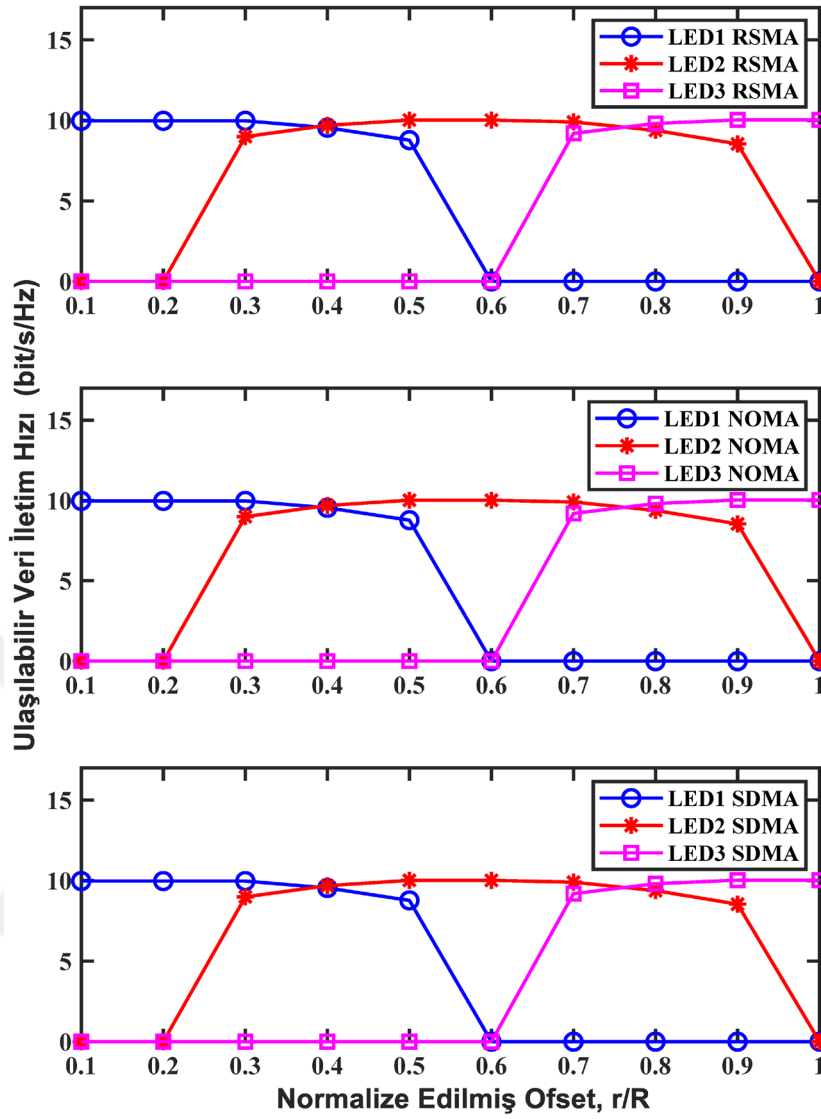
Şekil 35. MU-SISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve OMA kullanılarak elde edilebilir toplam veri iletim hızının iletim gücüne göre karşılaştırılması

Şekil 35, LED'in iletim gücüne karşı toplam veri iletim hızını göstermektedir. Burada, üç kullanıcının bulunduğu ve QoS kısıtlamasının tüm kullanıcılar için 1 olduğu varsayılmıştır. Bu durumda Şekil 35'te RSMA ve NOMA'nın aynı performansı sergilediği gösterilmiştir. Fakat RSMA'daki SIC işlem sayısı bir iken NOMA'daki SIC sayısı ikidir. Yani daha az karmaşıklığa sahip RSMA yöntemi kullanılarak NOMA yönteminde elde edilen toplam veri iletim hızına ulaşılmıştır. Bunun nedeni, RSMA'nın girişimin bir kısmını çözme ve girişimin kalan kısmını gürültü olarak işleme yeteneğine sahip olmasıdır. Ayrıca, RSMA ve NOMA yöntemlerinin OFDMA'dan daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. Bunun nedeni RSMA ve NOMA kullanıcılarının tüm bant genişliğini kullanabilmesine karşın, OFDMA'da bir kullanıcı yalnızca bant genişliğinin bir kısmını kullanabilmesidir.

3.3.3. Senaryo 3

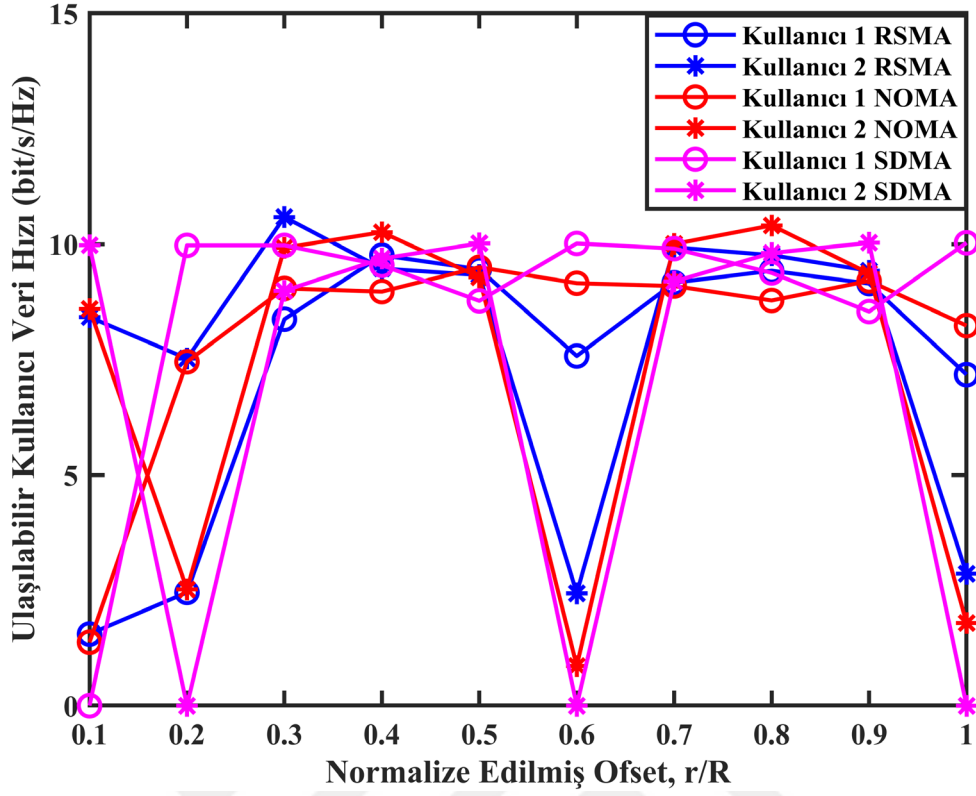
Şekil 24 ile verilen MU-MISO VLC sistem modeli ve Tablo 12'de verilen simülasyon parametreleri kullanılarak RSMA, NOMA ve SDMA yöntemleri normalize edilmiş ofset değerlerine göre ulaşılabilir veri iletim hızı, ulaşılabilir kullanıcı veri hızı ve toplam veri iletim hızı bakımından karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerde farklı kısıtların olduğu ve olmadığı durumlar için oluşturulan optimizasyon problemleri PSO algoritması kullanılarak çözülmüştür. Kullanılan PSO algoritmasının parametreleri Tablo 13'te verilmiştir. Oluşturulan sistem modeli LED'lerin ve PD'lerin görüş alanına göre beş bölgeye ayrılmıştır. Normalize edilmiş ofset değerinin değişmesiyle kullanıcıların bulundukları bölgeler değişmektedir.

İncelenen ilk durumda RSMA, NOMA ve SDMA yöntemlerinde adillik kısıtı yokken LED'lerin ve kullanıcıların ulaşılabilir veri hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması sırasıyla Şekil 36 ve Şekil 37'de verilmiştir. RSMA, NOMA ve SDMA yöntemi kullanılarak oluşturulan optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonları sırasıyla Denklemler (103), (105) ve (107)'de kısıtları ise sırasıyla Denklemler (104), (106) ve (108)'de verilmiştir.



Şekil 36. MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken her bir LED'in ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

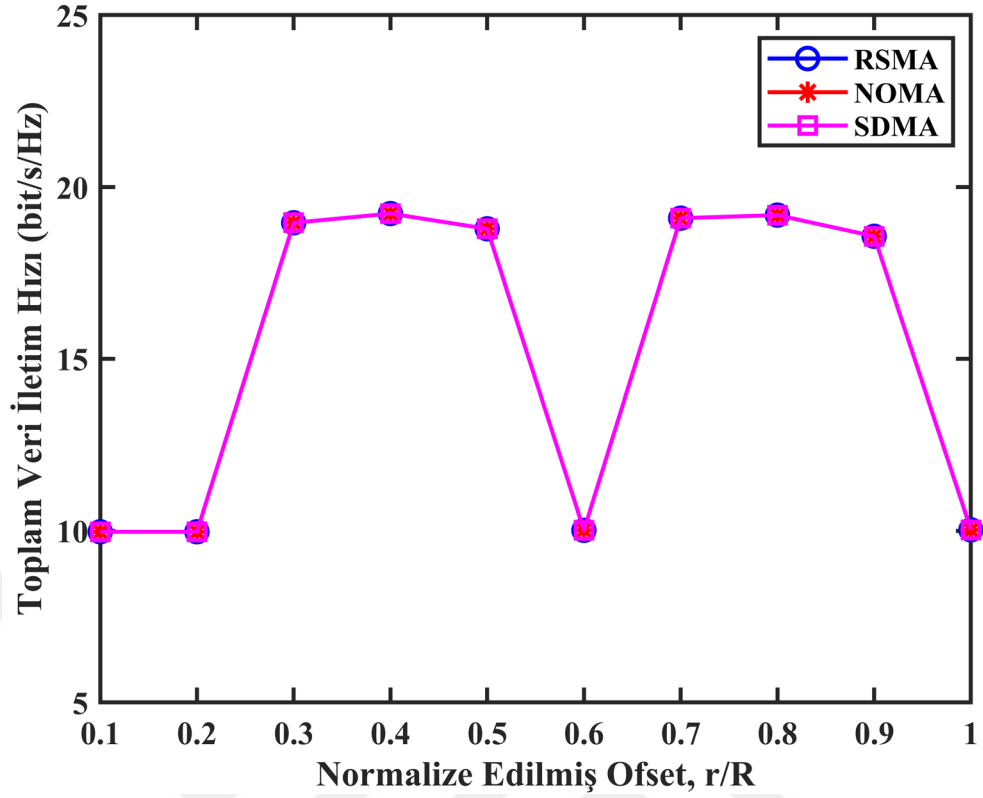
Şekil 36 incelendiğinde RSMA, NOMA ve SDMA yöntemlerinde her LED'in ulaşılabilir toplam veri iletim hızlarının aynı olduğu ve r/R değerine göre LED'lerin ulaşılabilir veri iletim hızlarının değiştiği görülmektedir. Bu durum kullanıcıların Şekil 24'te gösterilen bulundukları bölgenin r/R değerine göre değişmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 36'da RSMA, NOMA ve SDMA yöntemlerinde LED 1'in $0.1 \leq r/R \leq 0.5$ aralığında, LED 2'nin $0.3 \leq r/R \leq 0.9$ aralığında ve LED 3'ün $0.7 \leq r/R \leq 1$ aralığında veri iletimi sağladığı görülmektedir.



Şekil 37. MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken kullanıcı 1 ve 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

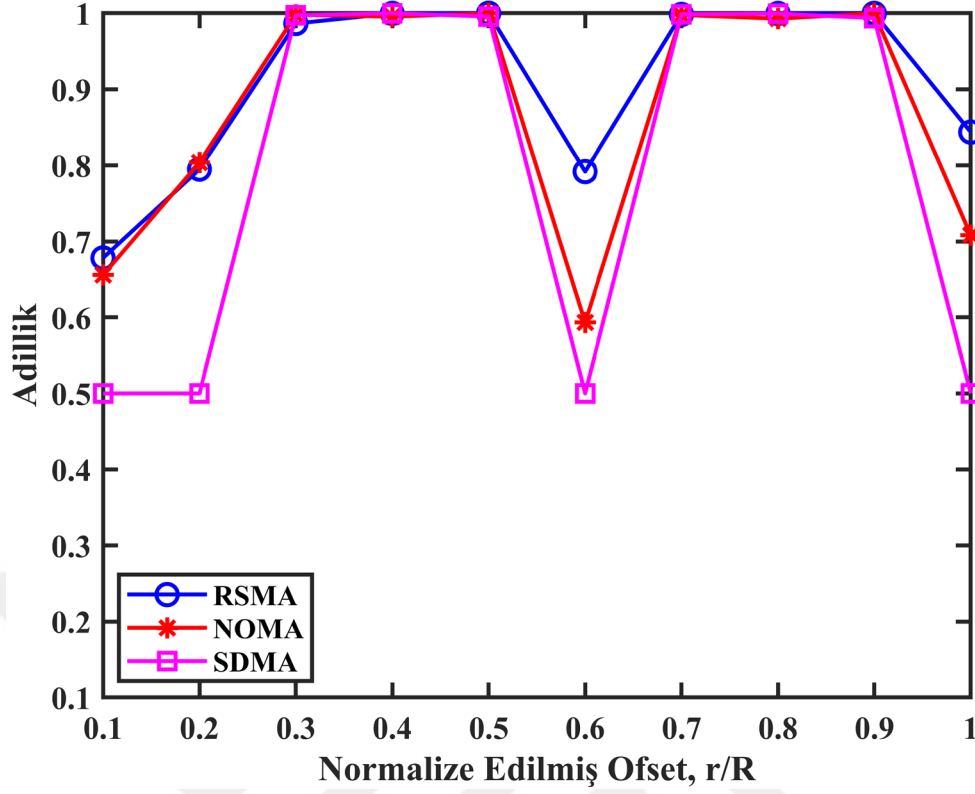
Şekil 37, RSMA ve NOMA için incelendiğinde tüm r/R değerlerinde kullanıcı 1 ve kullanıcı 2'ye veri iletimi sağlandığı görülmektedir. SDMA için incelendiğinde $r/R = 0.1$ olduğunda kullanıcı 1'e, r/R değeri 0.2, 0.6 ve 1 olduğunda kullanıcı 2'ye veri iletiminin sağlanamadığı görülmektedir. Bunun nedeni SDMA yönteminin çalışma prensibinden kaynaklanmaktadır. Şekil 36 ve Şekil 37 genel olarak incelendiğinde r/R değeri 0.1, 0.2, 0.6 ve 1 olduğunda sistemde bulunan kullanıcılara tek bir LED'den veri iletiminin yapıldığı görülmektedir.

Şekil 38, RSMA, NOMA ve SDMA için Şekil 36'da verilen LED 1, 2 ve 3'ün ulaşılabilir veri iletim hızı ya da Şekil 37'de verilen kullanıcı 1 ve 2'nin ulaşılabilir veri hızı toplanarak elde edilmiştir.



Şekil 38. MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

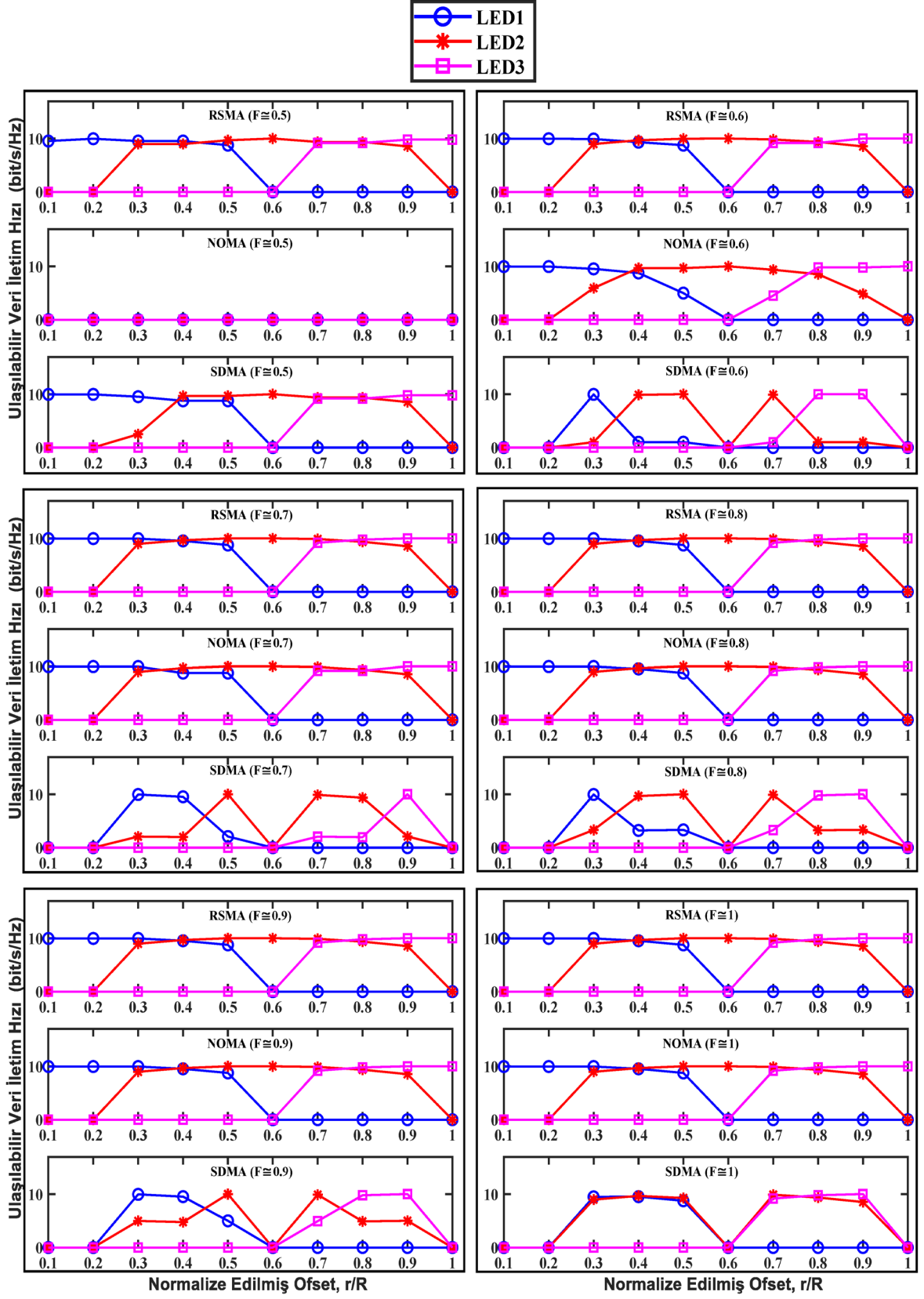
Şekil 38 incelendiğinde RSMA, NOMA ve SDMA yöntemlerinin aynı toplam veri iletim hızına ulaştığı görülmektedir. SDMA yönteminin kullanıldığı durumda kullanıcıların bulundukları bazı bölgelerde tek bir LED'den veri iletimi yapıldığından sadece bir kullanıcıya veri iletimi gerçekleşmektedir. Ek olarak Şekil 38'de verilen toplam veri iletim hızı için adillik değerleri Şekil 39'da verilmiştir.



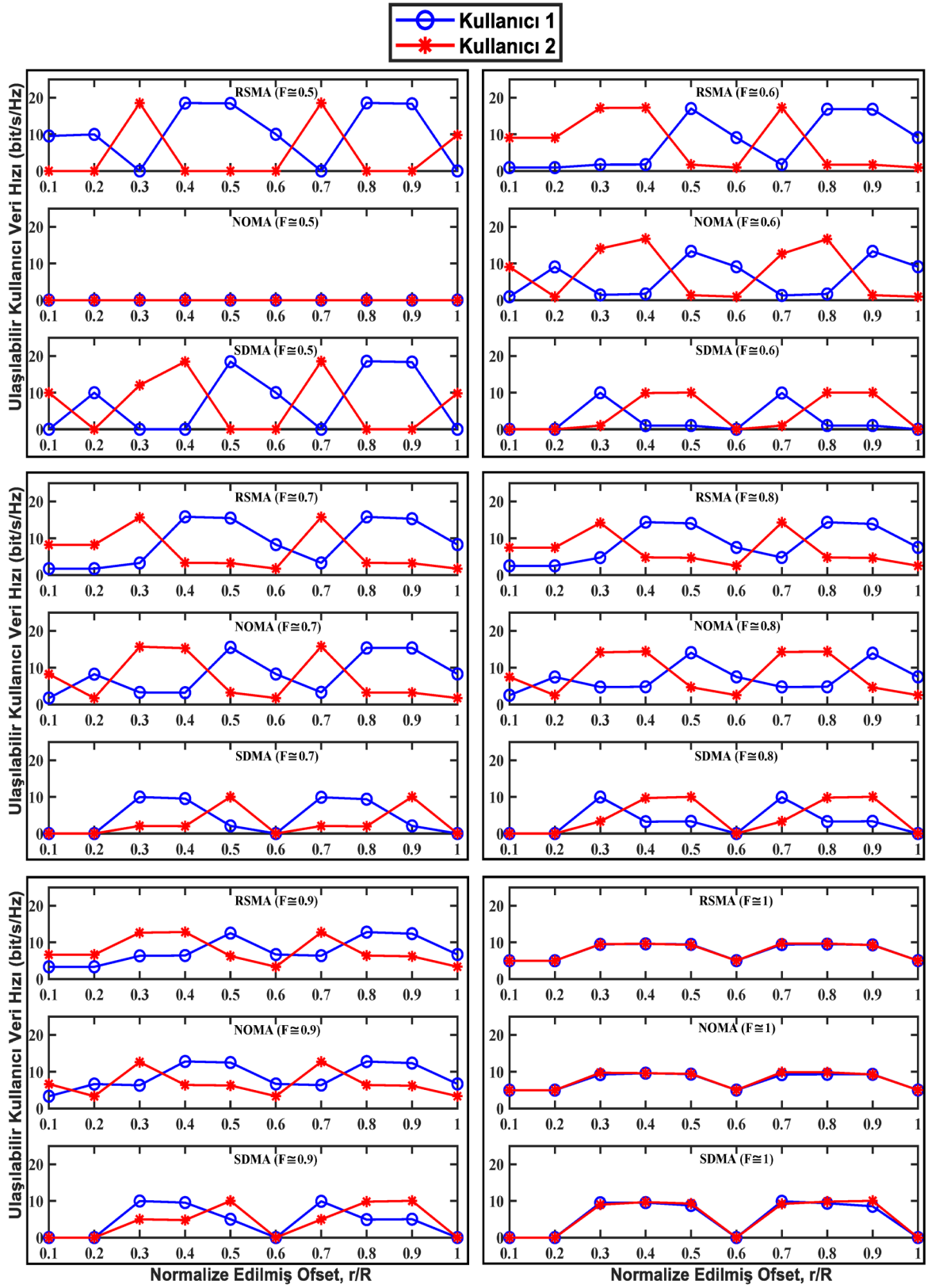
Şekil 39. MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak adillik kısıtı yokken elde edilen adillik değerlerinin normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 39 incelendiğinde RSMA yönteminin NOMA ve SDMA yöntemlerine göre, NOMA yönteminin de SDMA yöntemine göre daha adil bir veri iletimi sağladığı görülmektedir.

İncelenen ikinci durumda RSMA, NOMA ve SDMA yöntemlerinde adillik kısıtı dikkate alınarak analizler yapılmış ve bulgular elde edilmiştir. Bulguları elde etmek için oluşturulan optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonları sırasıyla Denklemler (109), (111) ve (113)'te kısıtları ise sırasıyla Denklemler (110), (112) ve (114)'te verilmiştir. $F \cong 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ve 1 değerlerinde normalize edilmiş ofset değerlerine karşılık LED'lerin ulaşılabilir veri iletim hızı Şekil 40'ta, kullanıcıların ulaşılabilir veri iletim hızı Şekil 41'de ve toplam veri iletim hızı Şekil 42'de RSMA, NOMA ve SDMA için verilmiştir.

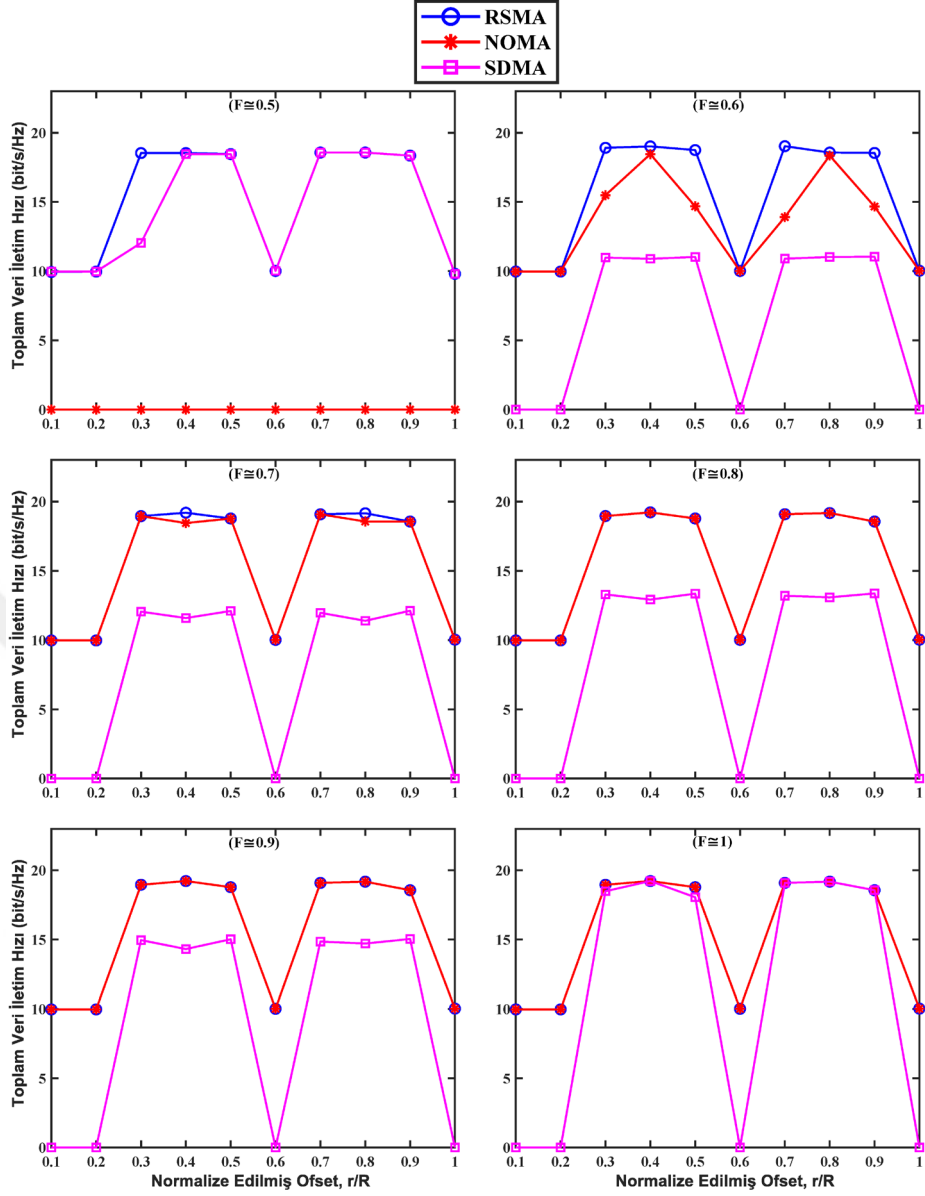


Şekil 40. MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak $F \approx 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ve 1 için her bir LED'in ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması



Şekil 41. MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak $F \cong 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ve 1 için kullanıcı 1 ve 2'nin ulaşılabilir veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 40 incelendiğinde, RSMA’da LED’lerin ulaşılabilir veri iletim hızı grafiklerinin farklı adillik değerlerinden etkilenmediği görülmektedir. İki kullanıcının bulunduğu bir sistemde $F \cong 0.5$ için kullanıcılarından birine veri iletimi sağlanırken diğerine veri iletimi sağlanmamaktadır. Bu durum NOMA’nın çalışma prensibine uygun olmadığından LED’lerden veri iletiminin olmadığı görülmektedir. NOMA’da adillik değerinin artmasıyla LED’lerin ulaşılabilir veri iletim hızlarının RSMA yöntemi ile aynı değeri verdiği görülmektedir. İki kullanıcının bulunduğu bir sistemde $F > 0.5$ için iki kullanıcıya da veri iletiminin sağlanması gerekmektedir. Kullanıcı sayısının LED sayısından fazla olduğu durumda yani aşırı yüklenmiş bir senaryoda SDMA verimsiz hale gelmektedir. Bu durumda SDMA’da $F > 0.5$ için LED’lerin ulaşılabilir veri iletim hızının aşırı yüklenmiş bölgelerde sıfır olduğu görülmektedir. Ayrıca adillik değerinin artmasıyla LED’lerin ulaşılabilir veri iletim hızlarının aşırı yüklenmiş bölgeler haricinde RSMA yöntemine yaklaştığı görülmektedir. Şekil 41 incelendiğinde, $F \cong 0.5$ için RSMA ve SDMA yönteminde her r/R değeri için kullanıcılardan birinin veri hızı sıfırken diğerinin sıfır olmadığı ve bu durum NOMA’nın çalışma prensibine uygun olmadığından dolayı kullanıcıların ulaşılabilir hızının sıfır olduğu görülmektedir. Adillik değerinin artmasıyla RSMA ve NOMA yöntemlerinde her r/R değeri için kullanıcıların veri hızının olduğu görülmekte fakat SDMA yönteminde aşırı yüklü durumlarda kullanıcılara veri iletiminin gerçekleşmediği görülmektedir.



Şekil 42. MU-MISO VLC sisteminde RSMA, NOMA ve SDMA kullanılarak $F \cong 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ve 1 için toplam veri iletim hızının normalize edilmiş ofsete göre karşılaştırılması

Şekil 42, RSMA, NOMA ve SDMA için Şekil 40 ile verilen LED 1, LED 2 ve LED 3'ün ulaşılabilir veri iletim hızı ya da Şekil 41'de verilen kullanıcı 1 ve kullanıcı 2'nin ulaşılabilir veri hızı toplanarak elde edilmiştir. Şekil 42 incelendiğinde RSMA yönteminin değişen adillik değerlerine karşın grafiklerinin değişmediği görülmektedir. Adillik değerinin artmasıyla NOMA yöntemindeki değerlerin RSMA yöntemindeki değerlere yaklaştığı görülmektedir. SDMA yönteminin $F \cong 0.5$ için RSMA ve NOMA yöntemleriyle yaklaşık aynı değerleri verdiği görülmekte. SDMA yönteminde $F \geq 0.6$ olduğu durumda toplam veri

iletim hızının aşırı yüklenmiş bölgeler hariç giderek arttığı ve RSMA yönteminde elde edilen değerlere yaklaştığı görülmektedir. Genel olarak Şekil 40, Şekil 41, Şekil 42 incelendiğinde RSMA yönteminin SDMA ve NOMA yöntemini kapsadığı ve bu iki yöntem arasında köprü kurduğu söylenebilir.

3.3.4. Senaryo 4

Oluşturulan son senaryoda RSMA ve NOMA yöntemi kullanılarak kusursuz ve kusurlu CSI altında elde edilen sonuçlar Tablo 22’de verilmiştir.

Tablo 22. Kusurlu ve kusursuz CSI altında RSMA ve NOMA yöntemleri için ulaşılabilir toplam veri iletim hızı değerleri

PSO	RSMA (<i>Mbit/s</i>)			NOMA (<i>Mbit/s</i>)		
	En İyi Sonuç	En Kötü Sonuç	Ortalama	En İyi Sonuç	En Kötü Sonuç	Ortalama
Kusursuz CSI	144.6765	142.3513	143.3565	144.0312	142.1888	143.1069
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-1}$)	106.9052	102.864	105.1935	104.0375	101.2234	102.6047
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-2}$)	107.8172	104.6315	105.9492	104.3709	102.5252	103.5862
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-3}$)	107.2326	104.2044	105.5406	103.8536	101.6897	102.8714
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-4}$)	101.8289	98.7569	100.5623	99.7477	96.5303	98.2155
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-5}$)	102.1964	97.5241	100.0499	97.9438	94.5983	96.4145
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-6}$)	105.5926	102.768	103.9001	101.9891	99.6461	100.5515
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-7}$)	107.1353	103.7023	105.0639	104.0689	100.6538	102.6781
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-8}$)	109.8025	106.5325	108.2228	106.5867	104.7144	105.9258
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-9}$)	110.5899	107.0373	108.8164	107.2617	105.3602	106.3896
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-10}$)	124.3684	121.5785	122.849	123.302	121.0287	122.0289
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-11}$)	144.0977	141.6783	142.6557	143.4617	141.0274	142.494
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-12}$)	144.6418	142.8243	143.6931	144.1082	141.6908	143.377
Kusurlu CSI ($\sigma^2 = 10^{-13}$)	144.9292	142.7674	143.6600	144.1989	141.9186	143.3324

Tablo 22’de kusursuz ve kusurlu CSI altında kullanıcıların ulaşabileceği toplam veri iletim hızı, algoritmanın 10 defa çalıştırıldığı durum için en iyi, en kötü ve ortalama sonuç olarak verilmiştir. Kusursuz CSI durumunda, RSMA ve NOMA’nın yaklaşık olarak aynı toplam veri iletim hızına ulaştığı görülmektedir. Kusurlu CSI durumunda ise RSMA’nın NOMA’ya göre genel olarak daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu doktora tez çalışmasında temel olarak, gelecek nesil haberleşme standartlarında yer alması beklenen VLC sistemlerinde yüksek veri hızları ve MA için NOMA ve RSMA yöntemleri incelenmiştir. VLC sistemlerinde 5G ve 6G'nin gereksinimlerini karşılamak için incelenen MA yöntemlerinde ortaya çıkan kısıtlar altında toplam veri iletim hızını artırmak amacıyla meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayalı bir güç tahsis yöntemi önerilmiştir.

Önerilen çözümde hesaplama altyapısı olarak meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanılan MA yöntemlerinde, toplam veri iletim hızını artırmak amacıyla oluşturulan optimizasyon problemlerinin uygun bir yöntem olduğu savunulmuştur. Oluşturulan her sistem modeli için farklı kısıtlar ortaya çıkmaktadır. Bu kısıtlar altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak oldukça zor ve karmaşık görülmektedir. Bu nedenle ortaya çıkan kısıtlar altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak için güç tahsis katsayılarının oldukça kolay bir şekilde meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile hesaplanabileceği savunulmuştur.

Tez çalışması kapsamında, aşağı yönlü iletim NOMA tabanlı VLC sistemleri için iki farklı sistem modeli oluşturulmuş ve incelenmiştir. Oluşturulan MU-SISO ve MU-MIMO sistem modellerinde toplam veri iletim hızını belirli kısıtların olduğu ve olmadığı durumlarda geleneksel yöntemlere göre artırmak amaçlanmıştır.

İlk olarak MU-SISO NOMA tabanlı VLC sisteminde toplam veri iletim hızını artırmak amacıyla, adillik ve optik yoğunluk kısıtları olan ve olmayan durumlarda optimizasyon problemleri oluşturulmuştur. Oluşturulan optimizasyon problemlerini çözmek için meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca adillik ve optik yoğunluk kısıtının olmadığı durum için meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının optimum değere ne kadar yaklaştığını göstermek için ES algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının toplam veri iletim hızı bakımından ES algoritmasına çok yakın değer elde ettiği görülmektedir. Bu nedenle meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının optimum değerinde sonuç verdiği söylenebilir. Oluşturulan optimizasyon problemlerinin adillik ve optik yoğunluk kısıtları altında karmaşıklığı arttığından dolayı ES algoritması çok daha fazla hesaplama maliyeti içerdiğinden kullanılmamıştır. Sayısal sonuçlar kullanılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmaların geleneksel GRPA ve NGDPA yöntemlere göre daha yüksek toplam veri

iletim hızı değerleri sunduğunu göstermektedir. Ayrıca adillik, toplam veri iletim hızı ve maksimum parlaklık gibi niceliklerin birbirleri üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Adillik kısıtı altında, kullanıcı sayısının artması ve kullanıcı sinyal gücü değerlerinin farklılaşması ile önerilen yöntemlerle elde edilen toplam veri iletim hızında önemli bir değişiklik görülmemiştir. Optik yoğunluk kısıtı altında, toplam veri iletim hızının kullanıcı sayısının artması ve kullanıcı sinyal gücü değerlerinin farklılaşması ile azaldığı görülmüştür. Ayrıca, geleneksel yöntemler adillik ve optik yoğunluğu bir kısıtlama olarak alamamaktadır. Fakat çeşitli kısıtlamalar altında meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak sonuçların elde edilebileceği gösterilmiştir.

Oluşturulan ikinci sistem modelinde 2×2 MIMO NOMA tabanlı VLC sisteminde önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak, adillik kısıtlaması olan/olmayan durumlar için aşağı yönlü iletim MU-MIMO NOMA tabanlı VLC sistemi için güç tahsis katsayıları bulunmuştur. Sayısal sonuçlar, tüm meta-sezgisel yöntemlerin geleneksel yöntemlerden daha yüksek toplam veri iletim hızı sunduğunu göstermektedir. Kullanıcı sinyal gücü değerlerinin farklı olduğu ve kullanıcı sayısının arttığı veya başka bir deyişle çözümün daha karmaşık hale geldiği durumlarda, geleneksel yöntemlerle elde edilen toplam veri iletim hızı azalırken, önerilen yöntemlerdeki toplam veri iletim hızı neredeyse değişmemektedir. İki, üç, dört ve beş kullanıcı 2×2 MIMO VLC sisteminde önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile NOMA kullanılarak GRPA'lı NOMA'ya göre sırasıyla %20.3, %37.9, %76.1 ve %85.4'e kadar toplam veri iletim hızı iyileşmesi sağlandığı gösterilmiştir. Kullanıcı sayısının artmasıyla toplam veri iletim hızı kazancının daha da arttığı görülmüştür. Ek olarak, geleneksel yöntemler adilliği bir kısıtlama olarak alamamaktadır, ancak güç tahsis katsayıları, adillik dahil olmak üzere çeşitli kısıtlamalara göre meta-sezgisel algoritmalarla hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile MIMO-NOMA, yüksek hızlı çok kullanıcı VLC sistemleri için ümit verici olduğu söylenebilir.

Tez çalışması kapsamında, aşağı yönlü iletim RSMA tabanlı VLC sistemleri için dört farklı senaryo incelenmiştir. Birinci ve ikinci senaryoda MU-SISO, üçüncü ve dördüncü senaryoda MU-MISO sistemleri oluşturulmuş ve incelenmiştir. Oluşturulan birinci, ikinci ve üçüncü senaryoda toplam veri iletim hızını artırmak amaçlanmış ve elde edilen sonuçlar farklı MA şemaları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak dördüncü senaryoda kusurlu CSI altında RSMA ve NOMA yöntemleri toplam veri iletim hızı bakımından karşılaştırılmıştır.

İlk senaryoda MU-SISO RSMA tabanlı VLC sistemi oluşturulmuş ve MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu durumda aşağı yönlü iletim MU-SISO RSMA tabanlı VLC sistemi için ortak mesaj hız tahsisi ve güç kontrolü kısıtlamaları altında toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak için optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Oluşturulan optimizasyon problemini çözmek için PSO algoritması önerilmiştir. Sayısal sonuçlar iki, üç, dört ve beş kullanıcılu durum için MU-SISO RSMA tabanlı VLC sisteminin MU-SISO NOMA tabanlı VLC sistemi ile yaklaşık olarak aynı toplam veri iletim hızı değerine ulaştığını göstermektedir. Ayrıca tek katmanlı RS yönteminde her alıcıda tek bir SIC katmanı kullanılırken NOMA yönteminde çok katmanlı SIC kullanır. Bu nedenle kullanıcı sayısının arttığı durumda RSMA yönteminin daha az karmaşıklıkla NOMA yöntemine yakın performans sergileyen bir alternatif olduğu gösterilmiştir.

İkinci senaryoda MU-SISO RSMA ve NOMA tabanlı VLC sisteminde ortak mesaj iletimi için veri hız tahsisi ve ortak ve özel mesajların iletimi için kullanıcıların güç tahsisi sorunu incelenmiştir. Bu durum için optimizasyon problemi toplam veri iletim hızını artırmak amacıyla QoS, SIC ve güç kontrolü kısıtlamaları altında oluşturulmuştur. Bu problemi çözmek için PSO algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, RSMA tabanlı sistemin çok daha az karmaşıklıkla NOMA tabanlı sistemle aynı toplam veri iletim hızı değerine ulaştığını göstermektedir. Ayrıca RSMA ve NOMA'nın OFDMA'dan daha yüksek toplam veri iletim hızı elde ettiğini göstermektedir. İlk incelenen senaryoda olduğu gibi bu senaryoda da sistem performansı ve karmaşıklığı birlikte değerlendirildiğinde, RSMA'nın NOMA'ya göre daha elverişli bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

Üçüncü senaryoda MU-MISO VLC sistemleri için RSMA, NOMA ve SDMA yöntemleri adillik kısıtlaması olan/olmayan durumlar için incelenmiştir. Adillik kısıtının olmadığı ve olduğu durumlar için toplam veri iletim hızını artırmak amacıyla optimizasyon problemleri oluşturulmuş ve bu problemleri çözmek için PSO algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, ilk olarak adillik kısıtının olmadığı durum için incelendiğinde RSMA, NOMA ve SDMA yöntemlerinde her LED'in ulaşılabilir toplam veri iletim hızlarının aynı olduğu ve r/R değerine göre LED'lerin ulaşılabilir veri iletim hızlarının değiştiği görülmektedir. RSMA ve NOMA yöntemlerinde tüm r/R değerleri için tüm kullanıcılara veri iletiminin sağlandığını fakat SDMA yönteminde bazı r/R değerlerinde kullanıcı sayısı LED sayısını aştığından dolayı kullanıcılardan sadece birine veri iletiminin sağlandığını göstermektedir. Bu durum aşırı yüklü senaryolar için SDMA yönteminin verimsiz olduğunu

göstermektedir. RSMA, NOMA ve SDMA yöntemlerinin toplam veri iletim hızlarının aynı olduğu fakat adillik bakımından RSMA yöntemi NOMA ve SDMA yöntemlerine göre, NOMA yönteminin de SDMA yöntemine göre daha adil bir veri iletimi sağladığı gösterilmiştir. Adillik kısıtı dikkate alındığında, RSMA yöntemi farklı adillik değerlerinde aynı performansı sergilerken, NOMA yöntemi adillik arttıkça RSMA'ya yaklaşan değerler vermiştir. SDMA yönteminde ise, adillik değeri arttıkça veri iletim hızları artmakta, ancak aşırı yüklenmiş senaryolarda veri iletimi sağlanamamaktadır. Bu sonuçlar, RSMA yönteminin NOMA ve SDMA yöntemleri arasında bir köprü işlevi gördüğünü ve genel olarak daha adil bir veri iletimi sunduğunu ortaya koymaktadır.

Son senaryoda MU-MISO VLC sistemleri için RSMA ve NOMA yöntemleri kusursuz ve kusurlu CSI koşulları altında toplam veri iletim hızı bakımından incelenmiştir. Kusursuz ve kusurlu CSI koşulları altında toplam veri iletim hızını artırmak amacıyla optimizasyon problemleri oluşturulmuş ve bu problemleri çözmek için PSO algoritması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, kusursuz CSI altında RSMA ve NOMA'nın toplam veri iletim hızlarının benzer olduğunu, kusurlu CSI durumunda ise RSMA'nın NOMA'ya göre daha iyi performans sergilediğini göstermiştir. Bu durum, RSMA'nın kusurlu CSI koşullarına karşı daha dayanıklı olduğunu ve daha tutarlı veri iletim sonuçları sağladığını göstermektedir.

Tez çalışmasında birden fazla kullanıcının bulunduğu VLC sistemlerinde 5G ve 6G'nin gereksinimlerini karşılayarak toplam veri iletim hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla NOMA ve RSMA yöntemleri farklı senaryolarda incelenmiş ve sonuçları sunulmuştur. NOMA ve RSMA yöntemleri için literatürünün kapsamlı bir incelemesi, aşağı yönlü iletim prensiplerinin ve iletim çerçevelerinin kapsamlı bir şekilde açıklanması ve performans açısından bazı MA şemaları ile karşılaştırması detaylı olarak verilmiştir. NOMA ve RSMA yöntemlerinde farklı kısıtlar altında farklı senaryolarda toplam veri iletim hızını maksimize etme sorununu çözmek için meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları önerilmiştir. NOMA yönteminde önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. RSMA yönteminin girişimin kısmen kodunu çözme ve girişimi kısmen gürültü olarak ele alma yeteneği sayesinde SDMA ve NOMA'yı kapsadığı gösterilmiştir. Bu nedenle RSMA ortogonal olmayan iletim, girişim yönetimi ve çoklu erişim için umut vadeden bir yöntemdir. Özellikle tek katmanlı RS yönteminin, düşük karmaşıklığı sayesinde NOMA'ya iyi bir alternatif olduğu gösterilmiştir. RSMA mevcut yaklaşımları birleştirmesi ve ortak ve özel mesajları

süperpozisyona dayalı bir şekilde iletmesi sayesinde yeni nesil iletişim sistemlerinin fiziksel katman ve MAC katmanının tasarımını değiştirme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle gelecekteki iletişim tasarımlarının ve şu ana kadar yapılmış iletişim tasarımlarının RSMA yöntemi ile yeniden ele alınması gerekmektedir. RSMA araştırmaları hem akademi hem de endüstri için toplam veri hızını artırma, iletim güvenilirliğini geliştirme, enerji verimliliğini artırma, iletim gücünden tasarruf etme, iletim gecikmesini azaltma, girişim yönetimini iyileştirme ve CSIT belirsizliklerine karşı sağlamlık gibi birçok araştırma alanı sunmaktadır.

Tezde geliştirilen optimizasyon problemleri toplam veri iletim hızını belirli kısıtlar altında meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak artırmak için oluşturulmuştur. Sunulan sonuçların ve önerilen meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının çok kullanıcılı VLC sistemlerinin için yararlı olması beklenmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçların karşılaştırılması için deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir. Oluşturulan optimizasyon problemleri farklı amaçlar altında veya farklı kısıtlar altında tasarlanarak önerilen meta-sezgisel yöntemler ile incelenebilir. Bu nedenle ilerleyen dönemlerde özellikle RSMA yönteminin başarının iyileştirilmesi çalışmaları sürdürülecektir.

5. KAYNAKLAR

- Abualigah, L. (Ed.). (2024). *METAHEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHMS optimizers, analysis, and applications*. MORGAN KAUFMANN.
- Ahsan, M., & Asif, H. M. (2017). ESIM-OFDM-based transceiver design of a visible light communication system. *International Journal of Communication Systems*, 30(8), e3175. <https://doi.org/10.1002/dac.3175>
- Al-Abbasi, Z. Q., & So, D. K. C. (2015). Power allocation for sum rate maximization in non-orthogonal multiple access system. *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1649-1653. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2015.7343563>
- Al-Ahmadi, S., Maraqa, O., Uysal, M., & Sait, S. M. (2018). Multi-User Visible Light Communications: State-of-the-Art and Future Directions. *IEEE Access*, 6, 70555-70571. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2879885>
- Alameer Ahmad, A., Dahrouj, H., Chaaban, A., Sezgin, A., & Alouini, M.-S. (2019). Interference Mitigation via Rate-Splitting and Common Message Decoding in Cloud Radio Access Networks. *IEEE Access*, 7, 80350-80365. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921626>
- Albayrak, C., Turk, K., Tugcu, E., & Yazgan, A. (2020). Seamless rate adaptation for indoor visible light communication without CSI at the transmitter. *Physical Communication*, 40, 101071. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101071>
- Al-Imari, M., Xiao, P., Imran, M. A., & Tafazolli, R. (2014). Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks. *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*, 781-785. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2014.6933459>
- Ali, M. S., Hossain, E., Al-Dweik, A., & Kim, D. I. (2018). Downlink Power Allocation for CoMP-NOMA in Multi-Cell Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 66(9), 3982-3998. IEEE Transactions on Communications. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2831206>
- Ali, M. S., Tabassum, H., & Hossain, E. (2016). Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems. *IEEE Access*, 4, 6325-6343. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2604821>
- Ali, S., Hossain, E., & Kim, D. I. (2017). Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Downlink Multiuser MIMO Systems: User Clustering, Beamforming, and Power Allocation. *IEEE Access*, 5, 565-577. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2646183>

- Armstrong, J. (2009). OFDM for Optical Communications. *Journal of Lightwave Technology*, 27(3), 189-204. *Journal of Lightwave Technology*. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2010061>
- Barry, J. R., Kahn, J. M., Krause, W. J., Lee, E. A., & Messerschmitt, D. G. (1993). Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 11(3), 367-379. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. <https://doi.org/10.1109/49.219552>
- Basnayaka, D. A., & Haas, H. (2017). Design and Analysis of a Hybrid Radio Frequency and Visible Light Communication System. *IEEE Transactions on Communications*, 65(10), 4334-4347. *IEEE Transactions on Communications*. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2702177>
- Bawazir, S. S., Sofotasios, P. C., Muhaidat, S., Al-Hammadi, Y., & Karagiannidis, G. K. (2018). Multiple Access for Visible Light Communications: Research Challenges and Future Trends. *IEEE Access*, 6, 26167-26174. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2832088>
- Benjebbour, A., Saito, Y., Kishiyama, Y., Li, A., Harada, A., & Nakamura, T. (2013). Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access. *2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 770-774. <https://doi.org/10.1109/ISPACS.2013.6704653>
- Cai, Y., Qin, Z., Cui, F., Li, G. Y., & McCann, J. A. (2018). Modulation and Multiple Access for 5G Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 629-646. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2766698>
- Cao, J., & Yeh, E. M. (2007). Asymptotically Optimal Multiple-Access Communication Via Distributed Rate Splitting. *IEEE Transactions on Information Theory*, 53(1), 304-319. <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.887497>
- Carleial, A. (1978). Interference channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 24(1), 60-70. *IEEE Transactions on Information Theory*. <https://doi.org/10.1109/TIT.1978.1055812>
- Carruther, J. B., & Kahn, J. M. (2000). Angle diversity for nondirected wireless infrared communication. *IEEE Transactions on Communications*, 48(6), 960-969. *IEEE Transactions on Communications*. <https://doi.org/10.1109/26.848557>
- Carruthers, J. B., & Kahn, J. M. (1997). Modeling of nondirected wireless infrared channels. *IEEE Transactions on Communications*, 45(10), 1260-1268. *IEEE Transactions on Communications*. <https://doi.org/10.1109/26.634690>
- Chen, C., Zhong, W.-D., & Wu, D. (2017). Non-hermitian symmetry orthogonal frequency division multiplexing for multiple-input multiple-output visible light communications. *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(1), 36-44.

- Chen, C., Zhong, W.-D., Yang, H., & Du, P. (2018). On the Performance of MIMO-NOMA-Based Visible Light Communication Systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(4), 307-310. <https://doi.org/10.1109/LPT.2017.2785964>
- Chen, C., Zhong, W.-D., Yang, H., Du, P., & Yang, Y. (2019). Flexible-Rate SIC-Free NOMA for Downlink VLC Based on Constellation Partitioning Coding. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(2), 568-571. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2879924>
- Chen, H., Mi, D., Chu, Z., Xiao, P., Xu, Y., & He, D. (2020). Link-Level Performance of Rate-Splitting based Downlink Multiuser MISO Systems. *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PIMRC48278.2020.9217103>
- Chen, S., Ren, B., Gao, Q., Kang, S., Sun, S., & Niu, K. (2017). Pattern Division Multiple Access—A Novel Nonorthogonal Multiple Access for Fifth-Generation Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(4), 3185-3196. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2596438>
- Chen, X., Benjebbour, A., Lan, Y., Li, A., & Jiang, H. (2014). Impact of rank optimization on downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) with SU-MIMO. *2014 IEEE International Conference on Communication Systems*, 233-237. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2014.7024800>
- Chen, Z., Basnayaka, D. A., & Haas, H. (2017). Space Division Multiple Access for Optical Attocell Network Using Angle Diversity Transmitters. *Journal of Lightwave Technology*, 35(11), 2118-2131. *Journal of Lightwave Technology*. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2670367>
- Chen, Z., & Haas, H. (2015). Space division multiple access in visible light communications. *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 5115-5119. <https://doi.org/10.1109/ICC.2015.7249135>
- Cheng, M.-Y., & Prayogo, D. (2014). Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Computers & Structures*, 139, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>
- Chi, N., Zhou, Y., Wei, Y., & Hu, F. (2020). Visible Light Communication in 6G: Advances, Challenges, and Prospects. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(4), 93-102. <https://doi.org/10.1109/MVT.2020.3017153>
- Choi, J. (2017). NOMA: Principles and recent results. *2017 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 349-354. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2017.8108138>

- Chow, C. W., Yeh, C. H., Liu, Y. F., & Liu, Y. (2011). Improved modulation speed of LED visible light communication system integrated to main electricity network. *Electronics Letters*, 47(15), 867. <https://doi.org/10.1049/el.2011.0422>
- Chung, K. (2021). Correlated Superposition Coding: Lossless Two-User NOMA Implementation Without SIC Under User-Fairness. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(9), 1999-2003. *IEEE Wireless Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3089996>
- Clerckx, B., Joudeh, H., Hao, C., Dai, M., & Rassouli, B. (2016). Rate splitting for MIMO wireless networks: A promising PHY-layer strategy for LTE evolution. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 98-105. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470942>
- Clerckx, B., Mao, Y., Schober, R., & Poor, H. V. (2020). Rate-Splitting Unifying SDMA, OMA, NOMA, and Multicasting in MISO Broadcast Channel: A Simple Two-User Rate Analysis. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(3), 349-353. *IEEE Wireless Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2954518>
- Clerckx, B., & Oestges, C. (2013). *MIMO Wireless Networks: Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems*. Academic Press.
- Cover, T. (1972). Broadcast channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 18(1), 2-14. *IEEE Transactions on Information Theory*. <https://doi.org/10.1109/TIT.1972.1054727>
- Dai, L., Wang, B., Yuan, Y., Han, S., Chih-lin, I., & Wang, Z. (2015). Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Communications Magazine*, 53(9), 74-81. *IEEE Communications Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263349>
- Dai, M., & Clerckx, B. (2017). Multiuser Millimeter Wave Beamforming Strategies With Quantized and Statistical CSIT. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(11), 7025-7038. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2737009>
- Dai, M., Clerckx, B., Gesbert, D., & Caire, G. (2016). A Rate Splitting Strategy for Massive MIMO with Imperfect CSIT. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2543212>
- Dai, X., Chen, S., Sun, S., Kang, S., Wang, Y., Shen, Z., & Xu, J. (2014). Successive interference cancellation amenable multiple access (SAMA) for future wireless communications. *2014 IEEE International Conference on Communication Systems*, 222-226. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2014.7024798>
- Dang, J., & Zhang, Z. (2012). Comparison of optical OFDM-IDMA and optical OFDMA for uplink visible light communications. *2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2012.6542858>

- Ding, Z., Adachi, F., & Poor, H. V. (2016). The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(1), 537-552. <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2475746>
- Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. K., Schober, R., Yuan, J., & Bhargava, V. K. (2017). A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(10), 2181-2195. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519>
- Ding, Z., Liu, Y., Choi, J., Sun, Q., El Kashlan, M., Chih-Lin, I., & Poor, H. V. (2017). Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), 185-191. *IEEE Communications Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1500657CM>
- Ding, Z., Peng, M., & Poor, H. V. (2015). Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems. *IEEE Communications Letters*, 19(8), 1462-1465. *IEEE Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2441064>
- Ding, Z., Schober, R., & Poor, H. V. (2016). A General MIMO Framework for NOMA Downlink and Uplink Transmission Based on Signal Alignment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(6), 4438-4454. <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2542066>
- Ding, Z., Yang, Z., Fan, P., & Poor, H. V. (2014). On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users. *IEEE Signal Processing Letters*, 21(12), 1501-1505. *IEEE Signal Processing Letters*. <https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2343971>
- Dizdar, O., Mao, Y., & Clerckx, B. (2021). Rate-Splitting Multiple Access to Mitigate the Curse of Mobility in (Massive) MIMO Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 69(10), 6765-6780. *IEEE Transactions on Communications*. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3098695>
- Dizdar, O., Mao, Y., Han, W., & Clerckx, B. (2020). Rate-Splitting Multiple Access for Downlink Multi-Antenna Communications: Physical Layer Design and Link-level Simulations. *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PIMRC48278.2020.9217326>
- Ergul, O., Dinc, E., & Akan, O. B. (2015). Communicate to illuminate: State-of-the-art and research challenges for visible light communications. *Physical Communication*, 17, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2015.08.003>
- Fang, D., Huang, Y.-C., Ding, Z., Geraci, G., Shieh, S.-L., & Claussen, H. (2016). Lattice Partition Multiple Access: A New Method of Downlink Non-Orthogonal Multiuser Transmissions. *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7841947>

- Fang, F., Zhang, H., Cheng, J., & Leung, V. C. M. (2016). Energy-Efficient Resource Allocation for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Network. *IEEE Transactions on Communications*, 64(9), 3722-3732. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2594759>
- Farah, J., Kilzi, A., Nour, C. A., & Douillard, C. (2018). Power Minimization in Distributed Antenna Systems Using Non-Orthogonal Multiple Access and Mutual Successive Interference Cancellation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(12), 11873-11885. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2876592>
- Feng, L., Hu, R. Q., Wang, J., Xu, P., & Qian, Y. (2016). Applying VLC in 5G Networks: Architectures and Key Technologies. *IEEE Network*, 30(6), 77-83. <https://doi.org/10.1109/MNET.2016.1500236RP>
- Flores, A. R., Clerckx, B., & de Lamare, R. C. (2018). Tomlinson-Harashima Precoded Rate-Splitting for Multiuser Multiple-Antenna Systems. *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2018.8491245>
- Flores, A. R., de Lamare, R. C., & Clerckx, B. (2020). Linear Precoding and Stream Combining for Rate Splitting in Multiuser MIMO Systems. *IEEE Communications Letters*, 24(4), 890-894. [IEEE Communications Letters. https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2969158](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2969158)
- Flores, A. R., De Lamare, R. C., & Clerckx, B. (2021). Tomlinson-Harashima Precoded Rate-Splitting With Stream Combiners for MU-MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 69(6), 3833-3845. [IEEE Transactions on Communications. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3065145](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3065145)
- Fu, Y., Hong, Y., Chen, L.-K., & Sung, C. W. (2018). Enhanced Power Allocation for Sum Rate Maximization in OFDM-NOMA VLC Systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(13), 1218-1221. <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2839094>
- Gfeller, F. R., & Bapst, U. (1979). Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. *Proceedings of the IEEE*, 67(11), 1474-1486. [Proceedings of the IEEE. https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11508](https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11508)
- Ghassemlooy, Z., Alves, L. N., Zvánovec, S., & Khalighi, M.-A. (Ed.). (2017). *Visible Light Communications: Theory and Applications* (1. bs). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315367330>
- Guan, X., Hong, Y., Yang, Q., & Chan, C. C.-K. (2016). Phase Pre-Distortion for Non-Orthogonal Multiple Access in Visible Light Communications. *Optical Fiber Communication Conference, Th1H.4*. <https://doi.org/10.1364/OFC.2016.Th1H.4>
- Guerra-Medina, M. F., González, O., Rojas-Guillama, B., Martín-González, J. A., Delgado, F., & Rabadán, J. (2012). Ethernet-OCMA system for multi-user visible light communications. *Electronics Letters*, 48(4), 227. <https://doi.org/10.1049/el.2011.4035>

- Hanif, M. F., Ding, Z., Ratnarajah, T., & Karagiannidis, G. K. (2016). A Minorization-Maximization Method for Optimizing Sum Rate in the Downlink of Non-Orthogonal Multiple Access Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(1), 76-88. <https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2480042>
- Hao, C., Wu, Y., & Clerckx, B. (2015). Rate Analysis of Two-Receiver MISO Broadcast Channel With Finite Rate Feedback: A Rate-Splitting Approach. *IEEE Transactions on Communications*, 63(9), 3232-3246. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2453270>
- Hayashi, Y., Kishiyama, Y., & Higuchi, K. (2013). Investigations on Power Allocation among Beams in Non-Orthogonal Access with Random Beamforming and Intra-Beam SIC for Cellular MIMO Downlink. *2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2013.6692251>
- Ho, S.-W., Saed, A. A., Lai, L., & Sung, C. W. (2018). Coding and Bounds for Channel Estimation in Visible Light Communications and Positioning. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(1), 34-44. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2774718>
- Hoshyar, R., Wathan, F. P., & Tafazolli, R. (2008). Novel Low-Density Signature for Synchronous CDMA Systems Over AWGN Channel. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 56(4), 1616-1626. *IEEE Transactions on Signal Processing*. <https://doi.org/10.1109/TSP.2007.909320>
- Hou, Y., Xiao, S., Zheng, H., & Hu, W. (2015). Multiple access scheme based on block encoding time division multiplexing in an indoor positioning system using visible light. *Journal of Optical Communications and Networking*, 7(5), 489-495. *Journal of Optical Communications and Networking*. <https://doi.org/10.1364/JOCN.7.000489>
- Hranilovic, S. (2005). On the design of bandwidth efficient signalling for indoor wireless optical channels. *International Journal of Communication Systems*, 18(3), 205-228. <https://doi.org/10.1002/dac.700>
- Hu, J., Sun, C., Wang, J., Gao, X., & Zhao, C. (2023). Common Rate Allocation and Power Control Optimization for RSMA-Based Visible Light Communications. *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200448>
- Huang, H., Wang, J., Wang, J., Yang, J., Xiong, J., & Gui, G. (2017). Symbol error rate performance analysis of non-orthogonal multiple access for visible light communications. *China Communications*, 14(12), 153-161. <https://doi.org/10.1109/CC.2017.8246332>
- Hussein, A. T., & Elmirghani, J. M. H. (2015). Mobile Multi-Gigabit Visible Light Communication System in Realistic Indoor Environment. *Journal of Lightwave Technology*, 33(15), 3293-3307. *Journal of Lightwave Technology*. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2439051>

- Islam, S. M. R., Avazov, N., Dobre, O. A., & Kwak, K. (2017). Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 721-742. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2621116>
- Islam, S. M. R., Zeng, M., & Dobre, O. A. (2017). *NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1706.08215>
- Joudeh, H., & Clerckx, B. (2016a). Robust Transmission in Downlink Multiuser MISO Systems: A Rate-Splitting Approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(23), 6227-6242. <https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2591501>
- Joudeh, H., & Clerckx, B. (2016b). Sum-Rate Maximization for Linearly Precoded Downlink Multiuser MISO Systems With Partial CSIT: A Rate-Splitting Approach. *IEEE Transactions on Communications*, 64(11), 4847-4861. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2603991>
- Joudeh, H., & Clerckx, B. (2017). Rate-Splitting for Max-Min Fair Multigroup Multicast Beamforming in Overloaded Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(11), 7276-7289. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2744629>
- Kang, J.-M., & Kim, I.-M. (2018). Optimal User Grouping for Downlink NOMA. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(5), 724-727. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2815683>
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>
- Karaboğa, Derviş. (2014). *Yapay zeka optimizasyon algoritmaları: Tabu araştırma, ısıt işlem, genetik, karınca koloni, bağışıklık ve diferansiyel gelişim algoritmaları* (3. bsk). Nobel.
- Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V., & Parthiban, R. (2015). LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3), 1649-1678. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2417576>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948 c.4. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Khan, L. U. (2017). Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3(2), 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2016.07.004>

- Kim, S.-M., & Lee, H.-J. (2014). Visible light communication based on space-division multiple access optical beamforming. *Chinese Optics Letters*, 12(12), 120601. <https://doi.org/10.3788/col201412.120601>
- Kızılırmak, R. C., Rowell, C. R., & Uysal, M. (2015). Non-orthogonal multiple access (NOMA) for indoor visible light communications. *2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*, 98-101. <https://doi.org/10.1109/IWOW.2015.7342274>
- Komine, T., & Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50(1), 100-107. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TCE.2004.1277847>
- Lai, C., Gao, S., & Tu, G. (2023). Unequal Error Protection-based Rate-Splitting precoding for VLC systems: BER analysis. *Computer Communications*, 212, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.10.008>
- Lan, Y., Benjebboiu, A., Chen, X., Li, A., & Jiang, H. (2014). Considerations on downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) combined with closed-loop SU-MIMO. *2014 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS.2014.7021086>
- Le Minh, H., O'Brien, D., Faulkner, G., Zeng, L., Lee, K., Jung, D., Oh, Y., & Won, E. T. (2009). 100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(15), 1063-1065. *IEEE Photonics Technology Letters*. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2022413>
- Lee, K., Park, H., & Barry, J. R. (2011). Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications. *IEEE Communications Letters*, 15(2), 217-219. *IEEE Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2011.010411.101945>
- Lei, L., Yuan, D., & Varbrand, P. (2016). On Power Minimization for Non-orthogonal Multiple Access (NOMA). *IEEE Communications Letters*, 20(12), 2458-2461. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2606596>
- Li, H., Huang, Z., Xiao, Y., Zhan, S., & Ji, Y. (2017). Solution for error propagation in a NOMA-based VLC network: Symmetric superposition coding. *Optics Express*, 25(24), 29856. <https://doi.org/10.1364/OE.25.029856>
- Li, X., Li, C., & Jin, Y. (2016). Dynamic Resource Allocation for Transmit Power Minimization in OFDM-Based NOMA Systems. *IEEE Communications Letters*, 20(12), 2558-2561. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2612688>
- Lin, B., Ghassemlooy, Z., Tang, X., Li, Y., & Zhang, M. (2017). Experimental demonstration of optical MIMO NOMA-VLC with single carrier transmission. *Optics Communications*, 402, 52-55. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.05.069>

- Lin, B., Tang, X., Zhou, Z., Lin, C., & Ghassemlooy, Z. (2018). Experimental demonstration of SCMA for visible light communications. *Optics Communications*, 419, 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.03.015>
- Lin, B., Ye, W., Tang, X., & Ghassemlooy, Z. (2017). Experimental demonstration of bidirectional NOMA-OFDMA visible light communications. *Optics Express*, 25(4), 4348. <https://doi.org/10.1364/OE.25.004348>
- Ling, X., Wang, J., Ding, Z., Zhao, C., & Gao, X. (2018). Efficient OFDMA for LiFi Downlink. *Journal of Lightwave Technology*, 36(10), 1928-1943. *Journal of Lightwave Technology*. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2796120>
- Liu, G., Chen, X., Ding, Z., Ma, Z., & Yu, F. R. (2018). Hybrid Half-Duplex/Full-Duplex Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access With Transmit Power Adaptation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(1), 506-519. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2767601>
- Liu, Y., Ding, Z., El Kashlan, M., & Poor, H. V. (2016). Cooperative Non-orthogonal Multiple Access With Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4), 938-953. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2549378>
- Liu, Y., Ding, Z., El Kashlan, M., & Yuan, J. (2016). Nonorthogonal Multiple Access in Large-Scale Underlay Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(12), 10152-10157. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2524694>
- Lopez-Hernandez, F. J., & Betancor, M. J. (1997). DUSTIN: Algorithm for calculation of impulse response on IR wireless indoor channels. *Electronics Letters*, 33(21), 1804. <https://doi.org/10.1049/el:19971224>
- Lopez-Hernandez, F. J., Perez-Jiminez, R., & Santamaria, A. (2000). Ray-tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse IR wireless indoor channels. *Optical Engineering*, 39(10), 2775. <https://doi.org/10.1117/1.1287397>
- Lu, G., Li, L., Tian, H., & Qian, F. (2018). MMSE-Based Precoding for Rate Splitting Systems With Finite Feedback. *IEEE Communications Letters*, 22(3), 642-645. *IEEE Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2785221>
- Luo, J., Fan, L., & Li, H. (2017). Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2871-2893. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2743228>
- Ma, S., Zhang, G., Zhang, Z., & Gu, R. (2021). Robust Beamforming Design for Rate Splitting Multiple Access-Aided MISO Visible Light Communications. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2108.07014>

- Manglayev, T., Kızılırmak, R. C., & Kho, Y. H. (2016). Optimum power allocation for non-orthogonal multiple access (NOMA). *2016 IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICAICT.2016.7991730>
- Mao, Y., & Clerckx, B. (2020). Beyond Dirty Paper Coding for Multi-Antenna Broadcast Channel With Partial CSIT: A Rate-Splitting Approach. *IEEE Transactions on Communications*, 68(11), 6775-6791. *IEEE Transactions on Communications*. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3014153>
- Mao, Y., Clerckx, B., & Li, V. O. K. (2018a). Energy Efficiency of Rate-Splitting Multiple Access, and Performance Benefits over SDMA and NOMA. *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2018.8491100>
- Mao, Y., Clerckx, B., & Li, V. O. K. (2018b). Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: Bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018(1), 133. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1104-7>
- Mao, Y., Clerckx, B., & Li, V. O. K. (2019a). Rate-Splitting for Multi-Antenna Non-Orthogonal Unicast and Multicast Transmission: Spectral and Energy Efficiency Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 67(12), 8754-8770. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2943168>
- Mao, Y., Clerckx, B., & Li, V. O. K. (2019b). Rate-Splitting for Multi-User Multi-Antenna Wireless Information and Power Transfer. *2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/SPAWC.2019.8815494>
- Mao, Y., Dizdar, O., Clerckx, B., Schober, R., Popovski, P., & Poor, H. V. (2022). Rate-Splitting Multiple Access: Fundamentals, Survey, and Future Research Trends. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4), 2073-2126. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3191937>
- Mao, Y., Piovano, E., & Clerckx, B. (2021). Rate-Splitting Multiple Access for Overloaded Cellular Internet of Things. *IEEE Transactions on Communications*, 69(7), 4504-4519. *IEEE Transactions on Communications*. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3067642>
- Maraqa, O., Aboagye, S., & Ngatched, T. M. N. (2024). Optical STAR-RIS-Aided VLC Systems: RSMA Versus NOMA. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5, 430-441. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3347534>
- Marshoud, H., Kapinas, V. M., Karagiannidis, G. K., & Muhaidat, S. (2016). Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(1), 51-54. *IEEE Photonics Technology Letters*. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2479600>

- Marshoud, H., Sofotasios, P. C., Muhaidat, S., Karagiannidis, G. K., & Sharif, B. S. (2017). On the Performance of Visible Light Communication Systems With Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(10), 6350-6364. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2722441>
- Matthiesen, B., Mao, Y., Popovski, P., & Clerckx, B. (2021). Globally Optimal Beamforming for Rate Splitting Multiple Access. *ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 4775-4779. <https://doi.org/10.1109/ICASSP39728.2021.9413616>
- Medra, M., & Davidson, T. N. (2018). Robust Downlink Transmission: An Offset-Based Single-Rate-Splitting Approach. *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/SPAWC.2018.8446039>
- Mitra, R., & Bhatia, V. (2017). Precoded Chebyshev-NLMS-Based Pre-Distorter for Nonlinear LED Compensation in NOMA-VLC. *IEEE Transactions on Communications*, 65(11), 4845-4856. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2736548>
- Moosavi, S. H. S., & Bardsiri, V. K. (2017). Satin bowerbird optimizer: A new optimization algorithm to optimize ANFIS for software development effort estimation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 60, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.01.006>
- Naser, S. A., Sofotasios, P. C., Muhaidat, S., & Al-Qutayri, M. (2021). Rate-Splitting Multiple Access for Indoor Visible Light Communication Networks. *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/WCNCW49093.2021.9419979>
- Naser, S., Bariah, L., Jaafar, W., Muhaidat, S., Al-Qutayri, M., Uysal, M., & Sofotasios, P. C. (2022). Coordinated Beamforming Design for Multi-User Multi-Cell MIMO VLC Networks. *IEEE Photonics Journal*, 14(3), 1-10. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3169233>
- Naser, S., Sofotasios, P. C., Bariah, L., Jaafar, W., Muhaidat, S., Al-Qutayri, M., & Dobre, O. A. (2020). Rate-Splitting Multiple Access: Unifying NOMA and SDMA in MISO VLC Channels. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 1, 393-413. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2020.3031656>
- Nguyen, V.-D., Tuan, H. D., Duong, T. Q., Poor, H. V., & Shin, O.-S. (2017). Precoder Design for Signal Superposition in MIMO-NOMA Multicell Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(12), 2681-2695. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2726007>
- Nikopour, H., & Baligh, H. (2013). Sparse code multiple access. *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 332-336. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156>

- Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P., & Mohapatra, P. (2015). Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2047-2077. IEEE Communications Surveys & Tutorials. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2476474>
- Perez-Jimenez, R., Berges, J., & Betancor, M. J. (1997). Statistical model for the impulse response on infrared indoor diffuse channels. *Electronics Letters*, 33(15), 1298. <https://doi.org/10.1049/el:19970866>
- Piovano, E., Joudeh, H., & Clerckx, B. (2016). Overloaded multiuser MISO transmission with imperfect CSIT. *2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 34-38. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2016.7868988>
- Prucnal, P. R. (Ed.). (2006). *Optical code division multiple access: Fundamentals and applications*. CRC Taylor & Francis.
- Qiu, Y., Chen, S., Chen, H.-H., & Meng, W. (2018). Visible Light Communications Based on CDMA Technology. *IEEE Wireless Communications*, 25(2), 178-185. IEEE Wireless Communications. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700051>
- Rahaim, M. B., & Little, T. D. C. (2015). Toward practical integration of dual-use VLC within 5G networks. *IEEE Wireless Communications*, 22(4), 97-103. IEEE Wireless Communications. <https://doi.org/10.1109/MWC.2015.7224733>
- Rahmati, A., Yapici, Y., Rupasinghe, N., Guvenc, I., Dai, H., & Bhuyan, A. (2019). Energy Efficiency of RSMA and NOMA in Cellular-Connected mmWave UAV Networks. *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2019.8756699>
- Rimoldi, B., & Urbanke, R. (1996). A rate-splitting approach to the Gaussian multiple-access channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 42(2), 364-375. IEEE Transactions on Information Theory. <https://doi.org/10.1109/18.485709>
- Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A., & Higuchi, K. (2013). Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access. *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6692652>
- Salehi, J. A. (1989). Code division multiple-access techniques in optical fiber networks. I. Fundamental principles. *IEEE Transactions on Communications*, 37(8), 824-833. IEEE Transactions on Communications. <https://doi.org/10.1109/26.31181>
- Sarker, R. A., Newton, C. S., & Newton, C. S. (2008). *Optimization modelling: A practical approach*. CRC Press/Taylor & Francis.
- Schreiber, U. (2004). Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) Fluorometry and Saturation Pulse Method: An Overview. İçinde G. C. Papageorgiou & Govindjee (Ed.), *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis* (ss. 279-319). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_11

- Shen, H., Deng, Y., Xu, W., & Zhao, C. (2016). Rate Maximization for Downlink Multiuser Visible Light Communications. *IEEE Access*, 4, 6567-6573. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2614598>
- Shen, H., Wu, Y., Xu, W., & Zhao, C. (2017). Optimal power allocation for downlink two-user non-orthogonal multiple access in visible light communication. *Journal of Communications and Information Networks*, 2(4), 57-64. <https://doi.org/10.1007/s41650-017-0037-3>
- Shin, W., Vaezi, M., Lee, B., Love, D. J., Lee, J., & Poor, H. V. (2017a). Coordinated Beamforming for Multi-Cell MIMO-NOMA. *IEEE Communications Letters*, 21(1), 84-87. *IEEE Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2615097>
- Shin, W., Vaezi, M., Lee, B., Love, D. J., Lee, J., & Poor, H. V. (2017b). Non-Orthogonal Multiple Access in Multi-Cell Networks: Theory, Performance, and Practical Challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(10), 176-183. *IEEE Communications Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601065>
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Sung, J.-Y., Yeh, C.-H., Chow, C.-W., Lin, W.-F., & Liu, Y. (2015). Orthogonal frequency-division multiplexing access (OFDMA) based wireless visible light communication (VLC) system. *Optics Communications*, 355, 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.06.070>
- Talaat, M., El-Shaarawy, Z., Tayseer, M., & El-Zein, A. (2021). An economic study concerning the cost reduction of the covered transmission conductors based on different optimization techniques. *Results in Engineering*, 11, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100262>
- Tao, S., Yu, H., Li, Q., & Tang, Y. (2018). Performance analysis of gain ratio power allocation strategies for non-orthogonal multiple access in indoor visible light communication networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018(1), 154. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1152-z>
- Tao, S., Yu, H., Li, Q., Tang, Y., & Zhang, D. (2020). One-Layer Rate-Splitting Multiple Access with Benefits over Power-Domain NOMA in Indoor Multi-Cell Visible Light Communication Networks. *2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145287>
- Timotheou, S., & Krikidis, I. (2015). Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 22(10), 1647-1651. *IEEE Signal Processing Letters*. <https://doi.org/10.1109/LSP.2015.2417119>

- Tuğcu, E. (2019). Renk Kaydırmalı Anahtarlama Modülasyonunun Görünür Işık Haberleşme Sistemlerinde Başarımı. *Journal of Investigations on Engineering and Technology*, 2(1), Article 1.
- Uysal, M., Capsoni, C., Ghassemlooy, Z., Boucouvalas, A., & Udvary, E. (Ed.). (2016). *Optical wireless communications: An emerging technology*. Springer.
- Vanka, S., Srinivasa, S., Gong, Z., Vizi, P., Stamatiou, K., & Haenggi, M. (2012). Superposition Coding Strategies: Design and Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(7), 2628-2639. IEEE Transactions on Wireless Communications. <https://doi.org/10.1109/TWC.2012.051512.111622>
- Wang, J., Peng, Q., Huang, Y., Wang, H.-M., & You, X. (2017). Convexity of Weighted Sum Rate Maximization in NOMA Systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(9), 1323-1327. <https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2722546>
- Wu, S., Wang, H., & Youn, C.-H. (2014). Visible light communications for 5G wireless networking systems: From fixed to mobile communications. *IEEE Network*, 28(6), 41-45. <https://doi.org/10.1109/MNET.2014.6963803>
- Xiao, H., Wang, Y., Cheng, Q., & Wang, Y. (2018). An Improved PSO-Based Power Allocation Algorithm for the Optimal EE and SE Tradeoff in Downlink NOMA Systems. *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580928>
- Xing, F., He, S., Leung, V. C. M., & Yin, H. (2022). Energy Efficiency Optimization for Rate-Splitting Multiple Access-Based Indoor Visible Light Communication Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 40(5), 1706-1720. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3145818>
- Yang, X.-S. (2010). *Nature-inspired Metaheuristic Algorithms*. Luniver Press.
- Yang, Z., Chen, M., Saad, W., & Shikh-Bahaei, M. (2020). Downlink Sum-Rate Maximization for Rate Splitting Multiple Access (RSMA). *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149417>
- Yang, Z., Chen, M., Saad, W., & Shikh-Bahaei, M. (2021). Optimization of Rate Allocation and Power Control for Rate Splitting Multiple Access (RSMA). *IEEE Transactions on Communications*, 69(9), 5988-6002. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3091133>
- Yang, Z., Pan, C., Xu, W., Pan, Y., Chen, M., & El Kashlan, M. (2018). Power Control for Multi-Cell Networks With Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(2), 927-942. IEEE Transactions on Wireless Communications. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2772824>

- Yang, Z., Xu, W., & Li, Y. (2016). Fair Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communication Downlinks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2631471>
- Yazgan, A., Simsek, C., Albayrak, C., Tugcu, E., & Turk, K. (2018). Experimental Channel Measurement for Indoor Office Visible Light Communication. *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.8441287>
- Yin, L., Clerckx, B., & Mao, Y. (2021). Rate-Splitting Multiple Access for Multi-Antenna Broadcast Channels with Statistical CSIT. *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/WCNCW49093.2021.9420034>
- Yin, L., Popoola, W. O., Wu, X., & Haas, H. (2016). Performance Evaluation of Non-Orthogonal Multiple Access in Visible Light Communication. *IEEE Transactions on Communications*, 64(12), 5162-5175. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2612195>
- Yin, L., Wu, X., & Haas, H. (2015). On the performance of non-orthogonal multiple access in visible light communication. *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1354-1359. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2015.7343509>
- Yu, S.-H., Shih, O., Tsai, H.-M., Wisitpongphan, N., & Roberts, R. D. (2013). Smart automotive lighting for vehicle safety. *IEEE Communications Magazine*, 51(12), 50-59. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6685757>
- Yuan, Z., Yu, G., Li, W., Yuan, Y., Wang, X., & Xu, J. (2016). Multi-User Shared Access for Internet of Things. *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504361>
- Zeng, L., O'Brien, D. C., Minh, H. L., Faulkner, G. E., Lee, K., Jung, D., Oh, Y., & Won, E. T. (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. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2009.091215>
- Zeng, L., O'Brien, D., Le-Minh, H., Lee, K., Jung, D., & Oh, Y. (2008). Improvement of Date Rate by using Equalization in an Indoor Visible Light Communication System. *2008 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications*, 678-682. <https://doi.org/10.1109/ICCSC.2008.149>
- Zeng, M., Tsiropoulos, G. I., Dobre, O. A., & Ahmed, M. H. (2016). Power Allocation for Cognitive Radio Networks Employing Non-Orthogonal Multiple Access. *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2016.7842156>

- Zeng, M., Yadav, A., Dobre, O. A., Tsiropoulos, G. I., & Poor, H. V. (2017). On the Sum Rate of MIMO-NOMA and MIMO-OMA Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(4), 534-537. <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2712149>
- Zhang, H., Wang, B., Jiang, C., Long, K., Nallanathan, A., Leung, V. C. M., & Poor, H. V. (2018). Energy Efficient Dynamic Resource Optimization in NOMA System. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(9), 5671-5683. <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2844359>
- Zhang, X., Gao, Q., Gong, C., & Xu, Z. (2017). User Grouping and Power Allocation for NOMA Visible Light Communication Multi-Cell Networks. *IEEE Communications Letters*, 21(4), 777-780. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2642921>
- Zhang, Y., Wang, H.-M., Yang, Q., & Ding, Z. (2016). Secrecy Sum Rate Maximization in Non-orthogonal Multiple Access. *IEEE Communications Letters*, 20(5), 930-933. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2539162>
- Zhang, Y., Wang, H.-M., Zheng, T.-X., & Yang, Q. (2017). Energy-Efficient Transmission Design in Non-orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(3), 2852-2857. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2578949>
- Zhang, Z., Xiao, Y., Ma, Z., Xiao, M., Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. K., & Fan, P. (2019). 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3), 28-41. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208>
- Zhou, G., Mao, Y., & Clerckx, B. (2022). Rate-Splitting Multiple Access for Multi-Antenna Downlink Communication Systems: Spectral and Energy Efficiency Tradeoff. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(7), 4816-4828. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3133433>
- Zukauskas, A., Vaicekauskas, R., Tuzikas, A., Petrulis, A., Stanikunas, R., Svegza, A., Eidikas, P., & Vitta, P. (2014). Firelight LED Source: Toward a Balanced Approach to the Performance of Solid-State Lighting for Outdoor Environments. *IEEE Photonics Journal*, 6(3), 1-16. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2319102>

ÖZGEÇMİŞ

Yasin ALTUNBAŞ, İlköğrenimini Kahramanmaraş Süleyman Demirel İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2012 yılında Kahramanmaraş Erdem Bayazıt Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012-2013 öğretim yılında Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2013-2014 öğretim yılında çift anadal programına Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde başladı. 2016 yılında bu bölümlerden mezun oldu. 2016-2018 yılları arasında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği anabilim dalında tezli yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2019 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği anabilim dalında doktora eğitime devam etmektedir. Halen Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Altunbas, Y., & Turk, K. (2023). Power Allocation for Indoor NOMA Based VLC Systems with Meta-Heuristic Optimization Algorithms. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 18(11), 1799-1805. <https://doi.org/10.1002/tee.23906>.

Altunbas, Y., & Turk, K. (2024). Power Allocation with Meta-heuristic Algorithms for Indoor MIMO-NOMA Based VLC Systems. *Wireless Personal Communications*, 136(1), 617-630. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11340-8>.