



ÇOK KULLANICILI Li-Fi AĞLARI

Ahmet Fetullah YILMAZ

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN**

**2022
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

ÇOK KULLANICILI Li-Fi AĞLARI

Ahmet Fetullah YILMAZ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

15 / 09 / 2022

Ahmet Fetullah YILMAZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK KULLANICILI Li-Fi AĞLARI

Ahmet Fetullah YILMAZ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN

Light Fidelity (Li-Fi), ışık yayan diyotlar (Light Emitting Diode-LED) aracılığı ile verilerin aktarıldığı görünür ışık iletişimine (Visible Light Communication-VLC) dayalı bir kablosuz haberleşme teknolojisidir. Aydınlatma ile haberleşmenin birlikte kullanılabilmesi fikriyle bu alanda yapılan çalışmalar yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu tez çalışmasında oda için yeterli aydınlatma miktarı sağlanarak, yüksek hızlı veri transferi sağlamak için iletişim LED'lerinin (Communication LEDs-C-LEDs) seçiminde öğretim öğrenme tabanlı optimizasyon (Teaching Learning Based Optimization-TLBO) algoritması uygulanmıştır. Tasarlanan iç mekân haberleşme modelinde aç kapa anahtarlama (On Off Keying-OOK) modülasyon tekniği kullanılmıştır. LED'lerden aktarılan verilerin alıcıya gecikmeli ve yansımaları ulaşacakları göz önüne alınarak temel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ilk kez TLBO algoritması kullanılarak, kullanıcılar için C-LED seçimi yapılmış, yansımalar ve gecikmelerden dolayı alıcıya ulaşan sinyallerden kaynaklı semboller arası girişim (Inter Symbol Interference-ISI) azaltılarak SNR kalitesi artırılmıştır. Sisteme TLBO algoritması uygulanması ile 1Gbit/s'lık veri hızında kesintisiz ve kaliteli iletişim elde edilmiştir.

2022, 63 sayfa

Anahtar Kelimeler: Görünür Işık İletişimi, İletişim LED'leri, Geçerli Oran Eşiği, Öğretim Öğrenme Tabanlı Optimizasyon

ABSTRACT

MS. Thesis

MULTI USER Li-Fi NETWORKS

Ahmet Fetullah YILMAZ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Çağlar DUMAN

Light Fidelity (Li-Fi) is a wireless communication technology based on Visible Light Communication (VLC) in which data is transmitted through light-emitting diodes (Light Emitting Diode-LED). With the idea of using lighting systems for communication, studies in this field become widespread. In order to provide high-speed data transfer and sufficient illumination for the room, Teaching Learning Based Optimization (TLBO) algorithm is used to select communication LEDs (C-LEDs), in the study. On-Off Keying (OOK) modulation technique is used in the designed communication model. Basic examinations are carried out by considering the delay of the LED lights and reflective access of the LED lights to the receiver. In the study, for the first time, the TLBO algorithm is used for C-LED selection, and SNR quality is increased by reducing the Intersymbol Interference (ISI) caused by the signals reaching the receiver due to reflections and delays. By applying the TLBO algorithm to the system, uninterrupted and high-quality communication at a data rate of 1Gbit / s is achieved.

2022, 63 page

Keywords: Visible Light Communication, Communication LEDs, Valid Rate Threshold, Teach-Learning Based Optimization

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı üstlenerek bilgi ve tecrübeleri ile her zaman yolumu aydınlatan ve zorlu pandemi koşullarına rağmen laboratuvar ortamındaki çalışmalarım da değerli desteğini esirgemeyen, değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans, yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi, tecrübe ve hoşgörüsünü esirgemeyen çalışmalarım sırasında kıymetli vaktini benim için harcayan değerli hocam sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında yardım ve desteğini esirgemeyen ETÜ Kristal Girişimcilik Merkezi koordinatör yardımcısı Arş. Gör. Gürkan KALINAY'a teşekkürlerimi sunarım. Arkadaşım ve meslektaşım olarak hiçbir konuda değerli yardımlarını esirgemeyen Büşra AYDIN ve Bengüsü Alkım BALTAKESMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Sevgi ve destekleri ile her zaman yanımda olan annem Hülya YILMAZ, babam Ayhan YILMAZ ve kardeşim Yaprak YILMAZ'a beni bugünlere taşıdıkları için teşekkürü borç bilirim. Desteklerinden dolayı dayım Hüseyin OKUR'a teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Fetullah YILMAZ
Eylül 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	15
3.1. Li-Fi.....	15
3.2. LED.....	19
3.2.1. LED türleri.....	20
3.2.1.1. Fosfor tabanlı LED'ler.....	20
3.2.1.2. RGB LED'ler.....	21
3.2.1.3. Organik ışık yayan diyotlar (OLED).....	21
3.2.1.4. Mikro LED'ler.....	21
3.3. Fotodedektör.....	21
3.3.1. Li-Fi sistem modeli.....	22
3.4. SNR Hesabı.....	23
3.5. Li-Fi Sistemlerinde Karşılaşılan Gürültü Türleri.....	27
3.5.1. Atış gürültüsü.....	27
3.5.2. Termal gürültü.....	28
3.6. Geçerli Oran Eşiği.....	28
3.7. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon.....	29
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	35
4.1. Tek Kullanıcı için SNR Hesabı.....	35
4.2. Çoklu Kullanıcılar İçin SNR Hesabı.....	41
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$^{\circ}$	Derece
A	Dedektörün fiziksel alanı
B	Eşdeğer gürültü bant genişliği
c	Işığın boşluktaki hızı
CL	Çözüm matrisi
γ	Dedektör duyarlılığı
d_0	Alıcı-verici arasındaki mesafe
G	Açık döngü gerilim kazancı
Γ	FET kanal gürültü faktörü
g_m	FET transkondüktans
$g(\psi)$	Optik yoğunlaştırıcının kazancı
h	Planck sabiti
$H(0)$	Optik kanal DC kazancı
$h(t)$	Kanal dürtü yanıtı
I_{bg}	Arka plan akımı
k	Boltzman sabiti
K	Kelvin
lx	Lux
m	Lambertyan yayılım derecesi
$n(t)$	AWGN
ϕ	Işıma açısı
Φ	Işık akısı
ϕ_i	i. LED için ışıma açısı
P_r	Alınan toplam optik güç
ψ	Geliş açısı
Ψ_c	Görüş alanı
R_b	Veri iletim hızı
T	Mesaj sinyalinin periyodu
TF	Öğrenme faktörü

$T(\psi)$	Optik filtrenin geçirgenliği
T_k	Mutlak sıcaklık
Th_{VR}	Geçerli oran eşiği
$y(t)$	Fotodedektörden alınan sinyal akımı
$x(t)$	İletilen optik darbe

Kısaltmalar

AWGN	Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü
BER	Bit hata oranı
bps	Saniye başına bit sayısı
C-LED	İletişim LED'leri
FOV	Görüş alanı
ISI	Semboller arası girişim
LED	Işık yayan diyot
Li-Fi	Işık uzantılı
OOK	Aç kapa anahtarlama
OWC	Optik kablosuz haberleşme
RF	Radyo frekansları
RGB LED	Kırmızı yeşil mavi LED
SNR	Sinyal gürültü oranı
TLBO	Öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon
VLC	Görünür ışık iletişimi
Wi-Fi	Kablosuz bağlantı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Fotofon.....	4
Şekil 2.2. LED desenleri	5
Şekil 2.3. LED armatür tasarımı	6
Şekil 2.4. Sistem modeli	7
Şekil 2.5. Önerilen oda modeli ve LED atamaları	9
Şekil 2.6. Kullanıcı önceliklendirme mekanizması	10
Şekil 2.7. Deney odası	12
Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrum.....	16
Şekil 3.2. Sistem modeli	22
Şekil 3.3. Gönderilen ışının alıcıya ulaşım yolları.....	25
Şekil 3.4. C-LED'lerden alıcıya ulaşan sinyaller	26
Şekil 3.5. Çoklu kullanıcılar için C-LED seçimi akış şeması.....	34
Şekil 4.1. Kullanılan oda modeli	35
Şekil 4.2. Dizi LED yerleşimleri.....	35
Şekil 4.3. Farklı konumlarda ve farklı sayıdaki iletişim LED'leri için hesaplanan SNR değerleri.....	38
Şekil 4.4. (a) (0, 0, 0.85), (b) (2.5, 2.5, 0.85) (c) (1.25, 3.75, 0.85) koordinatları için seçilen iletişim LED'leri	40
Şekil 4.5. 500Mbit/s veri hızı için (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn)	43
Şekil 4.6. Th_{VR} 'ye göre SNR ve zaman grafiği	44
Şekil 4.7. 750Mbit/s veri hızı için (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn)	45
Şekil 4.8. Th_{VR} 'ye göre SNR ve zaman grafiği	46
Şekil 4.9. 1Gbit/s veri hızı için (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn)	47
Şekil 4.10. Th_{VR} 'ye göre SNR ve zaman grafiği	48
Şekil 4.11. (a) (1Gbit/s), (b) (750Mbit/s) (c) (500Mbit/s) veri hızları için seçilen LED'leri	50
Şekil 4.12. (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn).....	53
Şekil 4.13. Th_{VR} 'ye göre SNR ve zaman grafiği	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Li-Fi ve Wi-Fi sistemlerinin karşılaştırılması.....	17
Çizelge 3.2. Li-Fi sistemleri ile bluetooth sistemlerinin karşılaştırılması	18
Çizelge 3.3. Kablosuz haberleşme sistemlerinin karşılaştırması	19
Çizelge 3.4. LED, akkor lamba ve floresan lamba karşılaştırması	20
Çizelge 3.5. C-LED seçim algoritması	29
Çizelge 4.1. Sistem parametreleri	37
Çizelge 4.2. Kullanıcı konumuna bağlı olarak iletişim LED'lerinin sayısı ve elde edilen SNR değerleri.....	40
Çizelge 4.3. TLBO algoritması.....	42
Çizelge 4.4. TLBO algoritması ile optimize edilmiş SNR sonuçları.....	51
Çizelge 4.5. Tek kullanıcı için TLBO ve $T_{h_{VR}}$ 'ye bağlı C-LED seçim algoritmalarının karşılaştırması	52
Çizelge 4.6. TLBO algoritması ile diğer algoritmaların karşılaştırılması	54

1. GİRİŞ

Nesnelerin internetinin (Internet of Things- IoT) gelişmesi ile birlikte cihaz sayısı ve veri talebi gün geçtikçe artmaktadır (Chowdhury et al. 2018). Bu nedenle 10 GHz altındaki radyo spektrumu yetersiz hale gelmiştir. Spektrumun 10 GHz üzerine çıkarılması durumunda ise yol kaybı ile karşılaşılır (Vasuja et al. 2018; Haas et al. 2015). Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için veri iletiminde RF dalgaları yerine görünür ışık kullanılabilir. Geçmişten günümüze kadar doğal ve yapay ışık kaynakları ile veri iletimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Güneş, akkor flamanlı lamba ve floresan lamba gibi kaynaklar görünür ışık iletişimi (Visible Light Communications- VLC) için kullanılmış ancak güneşin iletişim için sürekli kullanılamaması, akkor flamanlı lambanın yeterince hızlı anahtarlanamaması, floresan lambalarda girişimin oluşması gibi sorunlar nedeniyle arzu edilen performans elde edilememiştir. Ancak LED'lerin icadı ile VLC umut vadeden bir haberleşme biçimi haline gelmiştir (Swami and Moghe, 2020). LED'lerden yayılan ışığın modüle edilerek kablosuz olarak iletilmesi sağlanabilir (Lian et al. 2019). VLC'nin bir varyantı da ışık uzantılı bağlantı (Light Fidelity- Li-Fi)'dir. Li-Fi yüksek hızlı ve çift yönlü bir ağ bağlantısı sunar. Ayrıca kullanım alanlarının genişliği, siber saldırılara karşı daha güvenli olması ve aydınlatma ile beraber veri akışının sağlanmasından dolayı daha az enerji harcaması ile üstün özellikler taşıyan Li-Fi sistemleri geleceğin teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır (Spagnolo et al. 2020).

Li-Fi temel olarak verici, iletim ortamı ve alıcı olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Verici kısımda, gönderilmek istenilen sinyali alıcı tarafa aktarmak için LED kullanılır. Alıcı tarafta ise ışığı algılayan fotodedektör bulunur. Fotodedektör ortamdan algıladığı ışığı elektrik sinyaline dönüştürür. İletim ortamı ise LED'den yayılan ışığın fotodedektöre ulaşana kadar izlediği yoldur. Alıcı ve verici iletim ortamı ile birbirine bağlıdır (Liu et al. 2011a). Işık iletim ortamından geçerken engellerle (yağmur, kar, toz, yarı saydam cisimler vb.) karşılaşabilir. Bu durumda alıcı üzerinde bozucu etkiler oluşturabilir. Ayrıca ışık bir engel nedeniyle fotodedektöre ulaşamazsa iletişim gerçekleşmez. Bu kimi koşullar için bir avantajken kimi koşullar için bir dezavantaj oluşturabilir. Örneğin fotodedektör, telefona entegre ise telefonu cebimize koyduğumuz zaman iletişim kesilir. Ancak bir oda içerisinde sabit bir cihazda kullanıldığında ışık

1. GİRİŞ

duvardan geçemeyeceği için verilerin de güvenliği sağlanmış olur (Ndjiongue and Ferreira 2018).

Günümüzde veri transferinin sağlanmasında en yaygın olarak Wi-Fi kullanılmaktadır. Li-Fi, Wi-Fi teknolojisinin alternatifi olarak gösterilmektedir. Wi-Fi veri iletimi için radyo frekanslarını kullanır. Li-Fi, Wi-Fi teknolojisinin kullandığı RF bant genişliğinin daralmasından ve kısıtlamalarından dolayı oluşabilecek sorunlara çözüm olabilir. Ayrıca RF dalgalarının kullanılmasının uygun görülmediği yerler için de çözüm olabilir. Ayrıca görünür ışığın insan hayatının her alanında var olmasından dolayı kolay uygulanabilirliği ile hayatımıza hızlıca girebilir ve her alanda kullanılabilir (Sharma and Sanganal 2014).

Li-Fi teknolojisi, radyasyon endişeleri, RF'in cihazlarda girişime sebep olması sebebiyle manyetik rezonans (MR) cihazları ve ameliyathaneler gibi Wi-Fi teknolojisinin kullanılmadığı yerlerde kullanılabilir (Riurean et al. 2019). RF sinyalleri uçakların navigasyon sistemlerine etki edebileceği için uçaklarda Wi-Fi kullanılmamaktadır. Uçağın içinde bulunan baş üstü okuma aydınlatması Li-Fi vericisi olarak kullanılarak yüksek hızlı internet imkânı sağlayabilir (Kuradia and Balakrishnan 2015). Sualtı uzaktan kumandalı araçların (Remotely Operated Underwater Vehicle- ROV), kontrol edilmesi ve enerji beslemeleri için uzun kablolar kullanılır. ROV'lar da kullanılan bu kablolar, daha geniş alanları keşfetmelerine izin verecek kadar uzun değildir. Kablo yerine ışık kullanılması (yüksek güçlü LED) geniş alanların keşfedilmesini kolaylaştıracaktır. Ayrıca, dalış, su altı dünyasında araştırma yapmanın başka bir yoludur. Dalışta yaşanan en büyük sorunlardan biri ise dalış sırasında dalgıçların karşılaştığı sağlık sorunlarıdır. Li-Fi kullanarak dalgıçlar için sağlık izleme sistemleri üzerine çalışmalar mevcuttur. Çalışmada kalp atışı, vücut ısısı ve akciğer genişlemesi gibi farklı sağlık verileri bir bellek yongasına kaydedilir. Anormal sağlık sorunu sırasında çevrede bulunan dalgıçlara ve tekneye uyarı gönderilir (Codd-Downey and Jenkin 2018; Durga et al. 2020). Trafikte yol aydınlatmaları, arabaların ön ve arka farlarının LED olması durumunda, araçlar arası iletişim için Li-Fi teknolojisi kullanılabilir. Böylece hem yol aydınlatmaları sayesinde hem de araçlarda bulunan farlar sayesinde araçların birbiri ile haberleşebilir ve sürücüler gerektiğinde uyarılarak trafik kazalarının önüne geçilebilir (Shanmughasundaram et al. 2018).

1. GİRİŞ

Geniş kullanım alanı ve RF bant genişliğinden kaynaklanan kısıtlamalara karşı alternatif olarak gösterilen Li-Fi teknolojisi üzerine araştırma ve çalışmalar devam etmektedir. Hâlâ gelişme aşamasında olan Li-Fi teknolojisinin sunduğu imkanlar sayesinde gelecekte hayatımızın içerisinde önemli bir yere sahip olacağı öngörülmektedir.

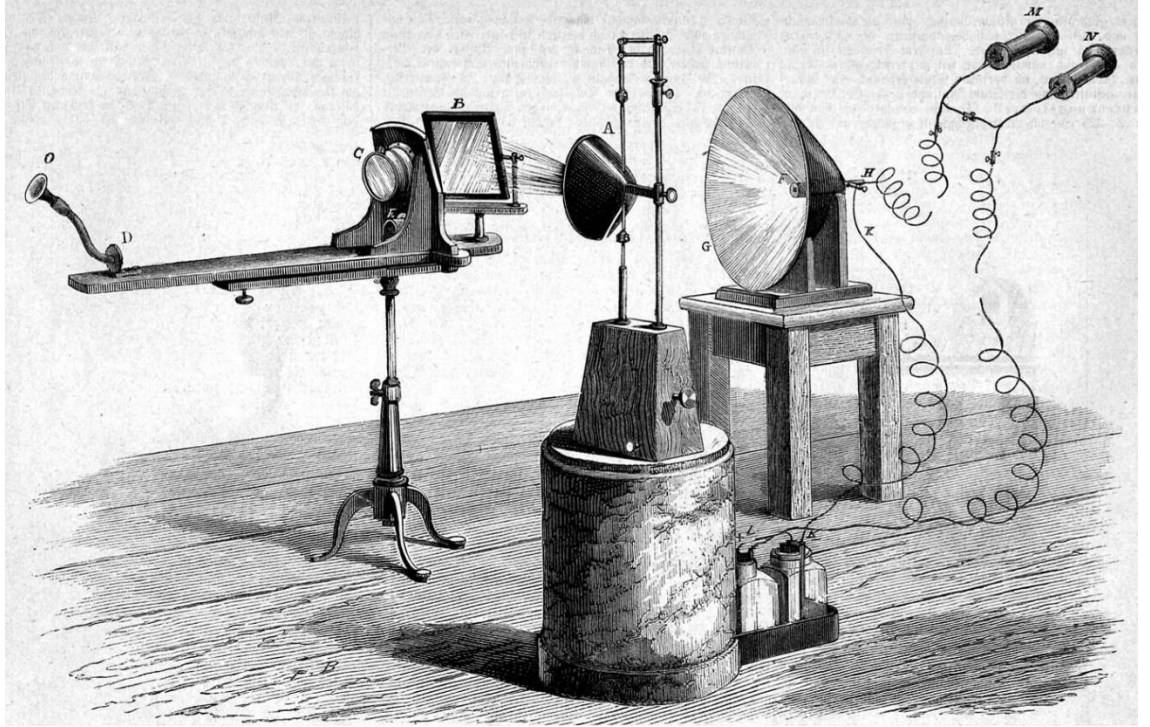
Bu tez çalışması kapsamında 5m×5m×3m'lik bir oda içerisinde dizi LED'ler kullanılarak çoklu kullanıcılar için yüksek hızlı, kaliteli ve kesintisiz iletişim sağlanması amaçlanmıştır. MATLAB R2022a programı kullanılarak bilgisayar ortamında analizleri gerçekleştirilen çalışmada önce aydınlatma, direkt ve yansımali optik güç parametrelerine dair hesaplamalar gerçekleştirilmiş, Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (International Organization for Standardization- ISO) standartlarına uygun yeterli aydınlatma sağlandıktan sonra çoklu kullanıcılar için optimum LED'leri seçerek yüksek hızlarda, kesintisiz ve kaliteli bir iletişim sağlamak hedeflenmiştir.

Çalışma beş kısımdan oluşmaktadır. Giriş bölümünde Li-Fi sistemlerinin neden önemli olduğu, teknolojiye ne tür gelişmelerin yaşanacağı ve hangi kısıtlama ve sorunlara çözüm olacağı açıklanmıştır. Kaynak özeti kısmında son yıllarda yapılan çalışmalar ağırlıklı olmak üzere literatürde görünür ışık iletişimi sistemleri, tek ve çok kullanıcıli sistemler için yapılan çalışmalar incelenmiş ve birçok çalışmaya yer verilmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde Li-Fi sistemlerine, Li-Fi sistem modelinde kullanılan hesaplamalara, tekli kullanıcılar için yapılan LED seçim algoritmasına ve çoklu kullanıcılar için uygulanan LED seçim algoritmasına yer verilmiştir. Araştırma Bulguları ve Tartışma kısmında tekli kullanıcılar için farklı LED sayıları kullanılarak sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio- SNR) hesabı yapılmıştır. SNR'ı artırmak için tanımlanan geçerli oran eşiğine dayalı LED seçim algoritması uygulanmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. İkinci aşamada ise çoklu kullanıcılarda optimum SNR'ı elde etmek için Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teach Learning Based Optimization- TLBO) algoritması uygulanarak uygun LED seçimi yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Sonuç ve Öneriler bölümünde ise gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca Li-Fi sistemlerinin geleceğine ve çalışmanın daha da ileriye taşınması için yapılabilecekler değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

1873 yılında Willoughby Smith ilk olarak platin elektrotları içeren selenyum dedektörlerin güneş ışınlarına duyarlı olduğunu ve ışıkla direncinin değiştiğini fark etmiştir (Sabine 1878). 1880 yılında Alexander Graham Bell, Sumner Tainter ile birlikte selenyum-pirinç dedektörü üretti ve bu selenyum-pirinç dedektörünün, selenyum-platin dedektörüne göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca, Şekil 2.1’de gösterilen ve fotofon adı verdiği sistem düzeneğini tasarlamıştır. Düzeneğin verici tarafında düz ayna ve gümüş mikroskop camı, alıcı tarafında ise selenyum hücresi kullanılmıştır. Kullanılan selenyum hücresinin direncinin, gelen ışık yoğunluğundaki dalgalanmalarla doğru orantılı olarak değişmesi ile telefon alıcısından geçen akım modüle edilmiştir. Sonuç olarak çıkışta orijinal sesin yeniden üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ses iletimini başarılı bir şekilde gerçekleştiren Bell ve Tainter bu iletimin ne kadar mesafede iletileceğine dair çalışmalar yapmış ve 213m’ye kadar iletimini gerçekleştirmişlerdir (Bell 1880; MIMS III 1980).

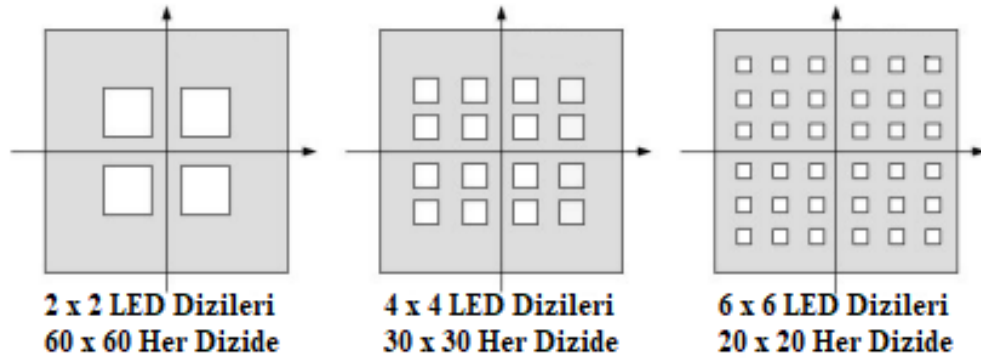


Şekil 2.1. Fotofon

1880 yılından beri VLC sistemleri üzerinde çalışmalar devam etmiştir. Aydınlatmanın hayatımıza girmesi ile birlikte ampul (akkor flamanlı), floresan lamba ve

lazer diyotlar kullanılarak ışıkla iletişim yapılmaya çalışılmıştır. Ancak akkor lambaların harcadığı enerjinin çok düşük bir bölümünü ışığa çevirmesi kullanım ömrünün ve veriminin az olmasından dolayı VLC sistemlerinde tercih edilmemiştir. Florasan lambaların ise içerilerinde bulundukları civa buharı yüzünden verimlilikleri düşüktür ve kırılmaları durumunda insan sağlığı açısından tehlikelidir. Ancak Florasan lamba iletişimi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Liu et al. 2009b; Liu et al. 2008b; Şenyer et al. 2016). LED'lerin aydınlatmada kullanılmaya başlanması ile birlikte VLC sistemlerinde de kullanılacakları fikri ilk olarak Japonya'da ortaya çıkmıştır (Tanaka et al. 2000).

Zeng et al. (2009) tarafından yapılan çalışmada çok kullanıcı sistemler için iki farklı tasarım yapılmıştır. İlk tasarımda her bir kullanıcı için optik yoğunlaştırıcı kullanılmıştır. İkinci tasarımda ise birden çok piksele bölünmüş bir dedektörle bağlantılı olarak tek bir görüntüleme optik yoğunlaştırıcısı (örneğin lens) kullanan bir alıcı yapısı kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 2.2'de gösterildiği gibi çalışmada toplam LED sayısı değiştirilmeden farklı LED dizi konumlandırmaları kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda farklı tasarımlar karşılaştırılmış ve iletişim hızı Mbit/s seviyelerinden Gbit/s seviyelerine kadar çıkarılmıştır.



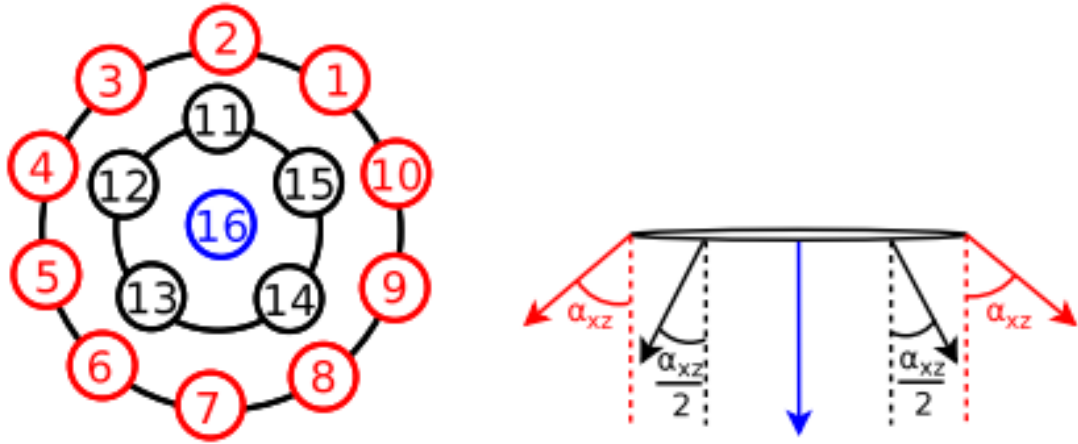
Şekil 2.2. LED desenleri

2011 yılında, TED konferansında Li-Fi teknolojisini tanıtan Edinburgh Üniversitesi Mobil İletişim Başkanı Harald Haas gelecek için umut vadeden bir konuşma gerçekleştirmiştir. Konuşma sırasında yaptığı prototipi de tanıtan Haas verici olarak bir masa üstü bir armatüre LED yerleştirmiş ve alıcı kısımda fotodedektör kullanarak video iletimi gerçekleştirmiştir. Konuşma esnasında alıcının ışığı almasını engellediğinde

2. KAYNAK ÖZETLERİ

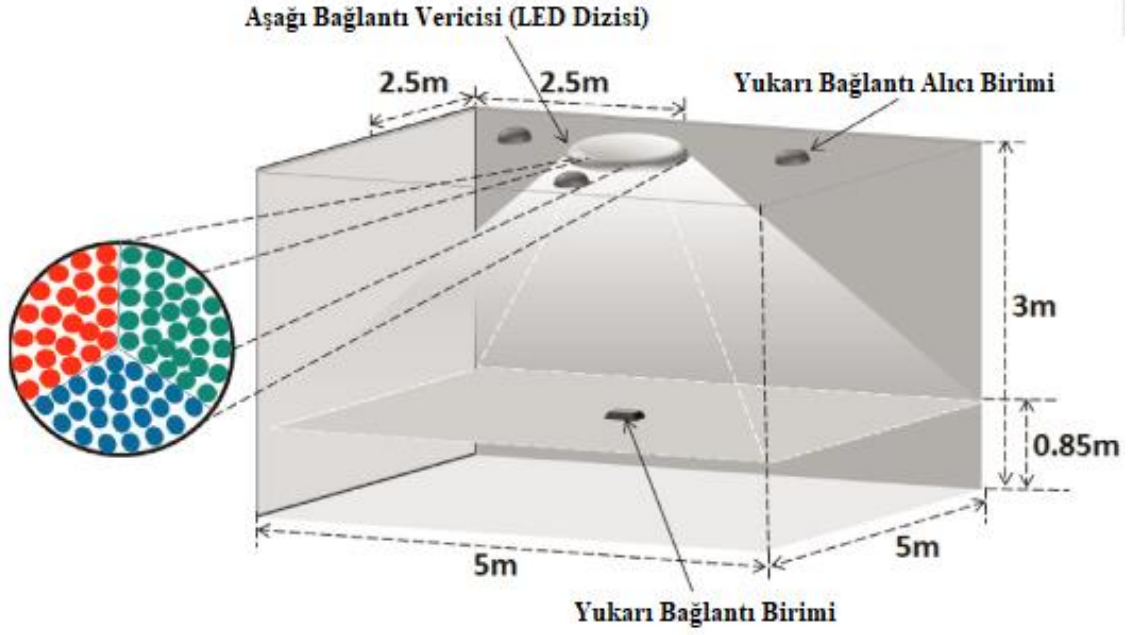
videonun durakladığını daha sonra engeli kaldırdığında videonun tekrar oynadığını göstermiştir (Haas et al. 2015).

2015 yılında Cogalan, Haas ve Panayirci tarafından yapılan çalışmada çok kullanıcıli Li-Fi sistemi için bir LED atama algoritması sunulmuştur. Algoritmaya göre her kullanıcı için DC kanal kazançları hesaplanır ve her kullanıcıya bir LED tahsis edilir. Eğer LED bir kullanıcı için kullanılıyorsa kullanıcıya DC kazancı yüksek olan başka bir LED atanır. Tasarlanan LED dizisi Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Bilgisayar ortamında yapılan simülasyon sonuçlarında çok kullanıcıli sistemler için yeterli bit hata oranı (Bit Error Rate- BER) performansı sağladığı sonucuna varılmıştır (Cogalan et al. 2015).



Şekil 2.3. LED armatür tasarımı

Sewaiwar et al. (2015) yaptığı çalışmada RGB (Red, Green, Blue) LED kullanılarak çift yönlü Li-Fi sistem tasarımı yapmıştır. Alıcı tarafta ise renk ayrımı yapabilen dedektör kullanmıştır. Aşağı bağlantı için sırasıyla kırmızı, mavi, yeşil kullanıldığı zaman, yukarı bağlantı için yeşil, kırmızı, mavi renkler kullanmıştır. Böylece girişim minimuma indirilmiştir. Kullanıcılar bu farklı renk yoğunlukları ile iletişimi gerçekleştirmiştir. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi standart bir kapalı VLC ortamında yapılan simülasyon sonuçları bu çalışmanın verimli ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Sistem modeli

Wang et al. (2015) yaptıkları çalışmada uzaktan yönetilebilen IoT sistemleri için Li-Fi/Wi-Fi hibrit sistemi önermişlerdir. IoT sistemlerinde bulunan çok sayıda cihaz nedeniyle RF spektrumu yetersiz kalmaktadır ve bu da haberleşmede düşük veri hızlarına neden olmaktadır. Li-Fi/Wi-Fi hibrit sistemi ile kesintisiz bir kapsama alanı oluşturulmuş ve haberleşme hızı artırılmıştır. Ayrıca çalışmada bu hibrit sistem için evrimsel oyun teorisine dayalı yük dengeleme algoritması önerilmiştir. Sonuç olarak önerilen algoritmanın geleneksel merkezi algoritmadan daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Yin et al. (2016) tarafından yapılan çalışmada görünür ışık iletişimi ile kullanıcı konumunu bulmak için ivmeölçerlerle bağlantılı bir açı çeşitleme vericisi (Angle Diversity Transmitter- ADT) kullanımı önerilmiştir. Önerilen sistemin geleneksel varış açısı (Angle of Arrival- AOA), varış zamanı (Time of Arrival- TOA), varış zamanı farkı (Time Difference of Arrival- TDOA) gibi yöntemlere göre dahi iyi sonuçlar verdiği, alıcının 45° eğildiğinde bile 0,15 m'den daha az bir ortalama lokalizasyon hatasının elde edilebileceğini göstermektedir. Bu sayede kullanıcıların konumlarının daha iyi bir şekilde belirlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Wang et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada tek kullanıcının olduğu durumda farklı LED sayılarına göre SNR hesabı yapılmış ve çok düşük SNR değerleri elde edildiği görülmüştür. Düşük SNR değerini iyileştirmek amacıyla tek kullanıcının olduğu iç mekân Li-Fi sisteminde bir eşik değerine dayalı kapsamlı saldırı algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile iletişim için tüm LED'lerin kullanılması yerine sadece kullanıcı için yararlı olan LED'lerin kullanılması amaçlanmıştır. Alıcıya ilk ulaşan sinyal referans alınarak diğer sinyaller için negatif ve pozitif kısımlar tanımlanmıştır. Pozitif kısmın, negatif kısma oranı eşik değerinden büyük olduğu durumda iletişim için LED seçimi yapılır. Sadece seçilen bu LED'ler ile iletişim sağlanır ve diğer LED'ler aydınlatma için kullanılmaya devam eder. Çalışma sonucunda SNR 30dB seviyelerine çıkarılmış ve kesintisiz iletişim için gerekli olan SNR'nın 13,6 dB üzerinde olması şartı sağlanmıştır. Ayrıca uygun eşik değeri seçimi ile 700Mb/s ve daha yüksek veri hızlarına ulaşılmıştır. Çalışmada çoklu kullanıcılar için de genetik algoritma kullanılmış ve semboller arası girişim değeri azaltılarak her kullanıcıda yaklaşık aynı SNR değerleri elde edilmiştir.

Niaz et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise Şekil 2.5'de gösterildiği gibi akıllı ev sistemleri için bir VLC sistem tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda RGB LED ve beyaz fosforlu LED'ler kullanılmıştır. Veri indirmede (Downlink) kırmızı renk bandı kullanıcılar için, yeşil renk bandı ise akıllı cihazlar için tahsis edilmiştir. Veri yükleme (Uplink) için mavi renk bandı ve beyaz LED birlikte kullanılmıştır. Yapılan çalışmada görünür ışık iletişimde kullanılan aç kapa anahtarlama (On Off Keying- OOK) modülasyonu yerine ortogonal frekans bölmeli çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing- OFDM) modülasyonu kullanılarak 5 kullanıcıya kadar veri hızının 230 Mbit/s civarında olduğu ve kullanıcı sayısının artması ile veri hızında da düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 30dB'lik SNR'da bit-hata oranı performansının 10 kat iyileştirildiği, güç tüketiminin ve maliyetlerin en aza indirdiği gösterilmiştir.



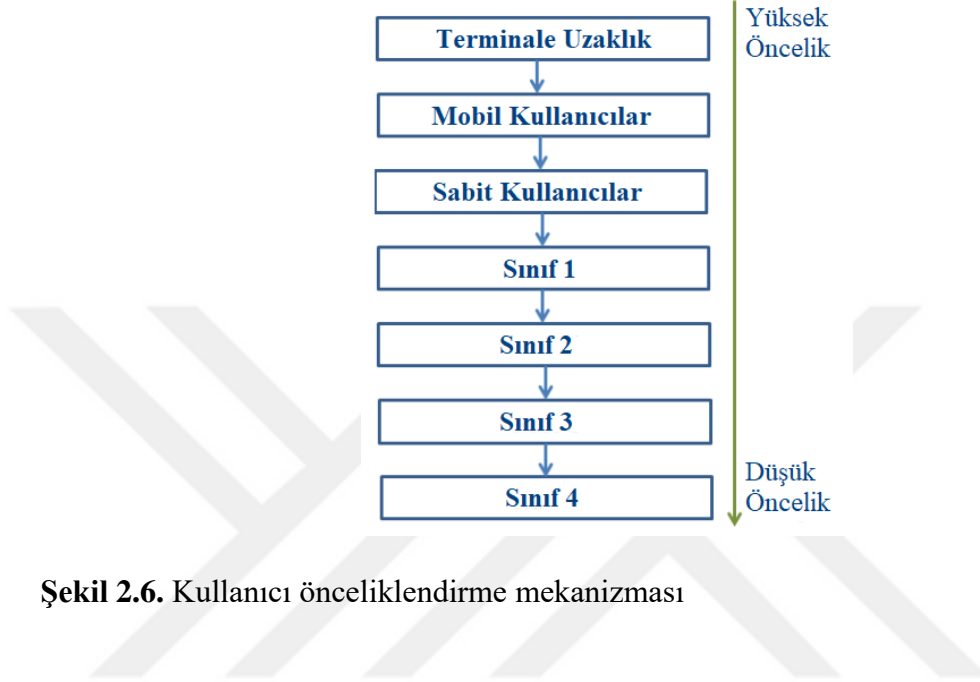
Şekil 2.5. Önerilen oda modeli ve LED atamaları

Papanikolaou et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada ortak ana taşıyıcıya sahip çok kullanıcılu hibrit bir Li-Fi/Wi-Fi sisteminde ağın güç tahsisi problemi araştırılmıştır. Bu tür bir hibrit sistemde standart uygulanan toplam oran optimizasyonunda, Li-Fi sisteminin ana taşıyıcıdan mevcut hızın çoğunu kullanabileceği ve Wi-Fi kullanıcıları için hızın azalabileceği ve dolayısıyla sağlanan hizmet kalitesinin düşebileceği bildirilmiştir. Çalışmada tüm kullanıcılara güç oran tahsisi için bir algoritma kullanılmıştır. Sonuç olarak uygulanan optimizasyon ile kaynak tahsisi yapılarak bu sorun çözülmüştür. Ayrıca sınırlı kanal kapasitesinde aynı ana taşıyıcıya ait Li-Fi/Wi-Fi karşılaştırılması yapılmış ve Li-Fi'nin Wi-Fi'ye göre daha hızlı olduğu ve 4 kat daha fazla ortalama güce sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Dinev (2019) tarafından yapılan bir çalışmada hareketli kullanıcılar için Li-Fi optik baz istasyonları (attoceller) arasında yatay geçişi simüle eden trafik önceliklendirmeli bir tasarım yapılmıştır. Çalışmada kullanıcılar terminale öncelik sıralamasına göre göre bağlanırlar. Şekil 2.6'da kullanıcılar için öncelik mekanizması gösterilmiştir. Erişim noktasına en yakın kullanıcı önceliğe sahiptir. Eğer kullanıcıların erişim noktasına olan mesafesi eşit ise kullanıcının hareketli ya da sabit olup olmadığına bakılır ve hareketli kullanıcıya öncelik verilir. Hareketli kullanıcılarda ise hareket hızı yüksek olan kullanıcı için daha yüksek öncelik tanımlanmıştır. Diğer kullanıcılar için

2. KAYNAK ÖZETLERİ

öncelik ataması 4 sınıfa ayrılarak gerçekleştirilmiştir. Sınıf 1 sesli çağrılar, sınıf 2 görüntülü çağrılar, sınıf 3 taramalar ve sesli çağrılar, sınıf 4 ise arka plan trafiği olarak ayrılmıştır. Öncelik kullanıcıların mesafesinden başlar ve sınıf 4'e geldiği zaman öncelik düşer.



Şekil 2.6. Kullanıcı önceliklendirme mekanizması

Majeed and Murdas (2019) tarafından yapılan çalışmada Li-Fi kullanılarak bir sağlık izleme sistemi oluşturulmuştur. Hasta tarafından bir Fiber Bragg Izgara (FBG) dedektöründen tavanda bulunan alıcıya veri iletimi gerçekleştirilir. Çalışmada alıcı istenilen sinyalleri kabul eder ve istenmeyenleri kabul etmez. Yazarlar deneysel sonuçların optik arka plan gürültü gücünü ortadan kaldırarak alınan sinyalin %100 doğrulukla çalıştığını ve literatüre göre çok daha doğru veriler elde ettiklerini vurgulamışlardır.

Eroğlu et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada çoklu kullanıcılar için piezoelektrik aktüatörler kullanılarak ışın izlemesi ile veri hızının maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Veri hızlarını artırmak için her ışının iletim gücü optimize edilmiştir. Son olarak kullanıcıların veri hızlarını daha da artırmak için ışın yönlendirme ve ortogonal olmayan çoklu erişim (Non Orthogonal Multiple Access- NOMA) kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre ışın yönlendirme yönteminin çoklu kullanıcılar için verimli bir şekilde çalıştığı ve güç optimizasyonu ile on üç kata kadar

2. KAYNAK ÖZETLERİ

toplam oran kazancının sağlanabileceği görülmüştür. NOMA uygulandığı zaman ise her kullanıcı çifti için ek 10 Mbit/s toplam oran kazancı elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Dinev et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada çoklu kullanıcılar için farklı optik baz istasyonları arası devir işlemi ve gönderilen verilerin hata yüzdeleri incelenmiştir. Hazırlanan deney ortamında kullanıcıların hızı sırasıyla 1m/s, 2m/s ve 3m/s olduğu durumlar için 0.5m, 0.8m, 1m, 1.2m ve 1.5m mesafelerde optik baz istasyonlarına gönderilen 10.000 karakter için hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Kullanıcı hızı 1m/s olduğunda tüm mesafeler için 10.000 karakter %0 hata ile iletilmiştir. Çalışma sonucunda hız ve mesafe arttıkça hata yüzdesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Alamir et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada radyo frekansında kanal tahmininde sıkça kullanılan sıkıştırma algılama (Compressive Sensing- CS) tekniği, optik kablolu iletişim sistemlerine uyarlanmıştır. Çok giriş çok çıkışlı ortogonal frekans bölümlü çoklu (Multiple Input Multiple Output- Orthogonal Frequency Division Multiplexing- MIMO-OFDM) sistemleri için CS ile birlikte kullanılan Öklid mesafesi yerine yüksek dereceli istatistik (Higher Order Statistics- HOS) benzerlik ölçümü olarak kullanılmıştır. Geliştirilen sistem ile birlikte simülasyon sonuçlarının geleneksel CS kanal tahmin algoritmasına göre üstün bit hata oranı performansı sergilediği gösterilmiştir.

Ahmad et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada hibrit bir Li-Fi sistemi için kullanıcı memnuniyetini sağlamayı ve ortalama ağ verimini artırmak için uygun erişim noktasının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada gradyan iniş tabanlı takviyeli öğrenme (Gradient Descent-Based Reinforcement Learning- RL) yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan yöntem geleneksel sinyal gücü stratejisi (Signal Strength Strategy- SSS) ile karşılaştırılmış ve sonuçların geleneksel yöntemlere göre kullanıcı memnuniyeti, ortalama ağ verimi ve kesinti olasılığı açısından önemli bir iyileştirme gösterdiği anlaşılmıştır.

Pham et al. (2020) tarafından insansız hava araçlarına NOMA ve VLC sistemi entegrasyonu üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada yapay sinir ağları ve Harris Hawks Optimizasyonu (HHO) kullanılmıştır. Bu yöntemler ile İHA'nın güç tahsisini gerçek zamanlı olarak hesaplanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Won et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada ortamdaki ışık kaynaklarından (Florasana lamba ve LED) üretilen parazit gürültüsünü ve atış gürültüsünü azaltmak için diferansiyel eşitleme tekniği kullanılmıştır. Uygulanan teknik ile Sıfıra Dönüşsüz Aç Kapa Anahtarlama (Non Returned to Zero On Off Keying- OOK-NRZ) tekniği ile modüle edilmiş sinyalin SNR'ı 7,5 dB arttırılmıştır. Ortamda bulunan ışık kaynaklarının gücünün 6 dB arttırılması durumunda bile bit hata oranı 1×10^{-5} değerinde tutulmuştur.

Eldeeb et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada çoklu kullanıcılar için üç boyutlu bir deney senaryosunda ışın izleme metodu kullanılmıştır. Şekil 2.7'de gösterilen odada deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve korelasyonu gösteren yol kaybı ve gecikme yayılması analizleri yapılmıştır. Ayrıca kullanıcıların oda içerisinde birbirlerine yakın ve uzak olmalarına göre farklı konumlar için SNR hesaplaması yapılmış ve kullanıcıların 20dB SNR değerinde birbirine yakın olduğu durumda 500Mbit/s, kullanıcıların birbirine uzak olduğu durumda ise 1.300Mbit/s hız değerine ulaştığı görülmüştür.



Şekil 2.7. Deney odası

Vijayaraghavan and Global (2021) tarafından yapılan çalışmada hibrit Li-Fi/Wi-Fi yapısı için farklı gecikme ve veri hızı ihtiyacını karşılamak için, Branch and Bound (B&B) algoritması tabanlı bir çözücü olan Couenne ve Genetik Algoritma kullanılmıştır. Sonuç olarak bu yöntemlerin mevcut olan yüksek SNR değerini elde etmeye dayalı yöntemlere kıyasla ağ gecikmesini önemli ölçüde azaltabileceği sonucuna varılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Meng et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada VLC sistemlerinde iç mekân ışık konumlandırması için geleneksel olarak kullanılan alınan sinyal gücü algoritmasında hareketli kullanıcılarda dedektörün sahip olduğu dönüş açısından kaynaklanan hataları minimize etmek için geliştirilmiş balina optimizasyonu uygulanmıştır. Ayrıca elit öğrenme ve Lévy uçuş stratejisine dayalı olarak geliştirilen bir balina optimizasyonu tasarlanmış ve standart olarak uygulanan balina optimizasyonunun yakınsama hızı ve sistem doğruluğu geliştirilmiştir. Bu optimizasyon ile dedektörün sahip olduğu dönüş açısından kaynaklanan sorunlar ile üç boyut iç mekân konumlandırma sorunu çözülmüştür. Simülasyon sonuçları ile konumlandırma hatalarının %95 oranında iyileştirme yapıldığını göstermiştir.

Doğadan esinlenerek oluşturulan metasezgisel algoritmalar problemleri optimize etmek için kullanılmıştır. Genetik algoritma, biyolojik evrimin hesaplamalı bir modelidir. Genetik algoritmalar son derece karmaşıktır ve değişik yapılar geliştirme kabiliyetine sahiplerdir. Bu algoritmalar, genel olarak popülasyon genetiğinden gelen fikirlere dayanmaktadır. Öncelikle, rastgele birey popülasyonu oluşturulur. Her birey bir aday çözüm olarak düşünülür. Popülasyondaki bireyler arasındaki farklılıklar, seçim adımında yeni bir aday çözüm kümesinin seçimi için kullanılır. Seçim esnasında, daha başarılı bireyler bir sonraki nesle aktarılmak suretiyle kopyalanır, daha azca başarılı bireyler ise yok edilir. Kopyalama işlemi esnasında mutasyon, çaprazlama gibi aşamalar gerçekleşir. İlk olarak seçilen iyi bireyler bu işlemlerden sonrasında yeni bireylere dönüştürülür. Bu işlemler devam ettikçe yeni elde edilen bireylerin başarısı gittikçe artar (Forrest 1996).

Ek olarak bazı metasezgisel algoritmalara örnekleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Karınca kolonisi algoritması, doğada yemek arayan işçi karıncaların yemek bulduktan sonra yuvaya taşırken salgıladıkları feromon hormonun diğer karıncalar için yiyecek kaynağının yol güzergahını göstermesinden esinlenerek oluşturulmuş bir algoritmadır (Dorigo and Gambardella 1997).

Yapay arı kolonisi algoritması ise arıların yiyecek bulma davranışlarından ilham alınarak oluşturulan görevli, gözcü ve kâşif arılardan esinlenen bir algoritmadır (Karaboga and Akay 2009).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Parçacık sürüsü optimizasyonu kuş ve balık gibi farklı birçok hayvan sürülerinin yiyecek kaynağı bulma, avcı hayvan türlerinden kaçma gibi çevre adaptasyon süreçlerinden esinlenerek oluşturulmuş bir algoritmadır (Kennedy and Eberhart 1995).

Optikten esinlenen bir algoritma ise içbükey yüzeylerde gelen ışınların yansdıktan sonra birbirlerine yaklaşmaları, dışbükey yüzeylerde gelen ışınların ise yansdıktan sonra birbirlerinde uzaklaşmalarından ve bu yansıma davranışlarının, nesne ile yüzey arasındaki mesafeye bağlı olarak farklı görüntüler oluşturmasında yararlanılarak oluşturulmuş bir algoritmadır (Husseinzadeh Kashan 2015).

Gri kurt algoritması ise kurtların avlanma davranışlarını ve sürü şeklinde hareket ederken oluşturdukları dizilimden esinlenerek oluşturulmuş bir algoritmadır (Mirjalili et al. 2014).

Guguk kuşu arama algoritması ise dişi guguk kuşlarının yumurtlama zamanı geldiğinde yumurtalarını bırakmak için kendi yumurtasına benzeyen yuvayı bulup yumurtalarını bırakmak için çıktıkları göç sürecinden esinlenmiştir (Yang and Deb 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu kısımda iç mekân Li-Fi sistemlerinde çoklu kullanıcılarda kaliteli ve kesintisiz iletişim sağlamak için kullanılan yöntem hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Oda içerisinde bulunan tüm LED'lerin iletişim için kullanılması yerine sadece kullanıcıların yararına olacak LED'lerin seçilmesi amaçlanmıştır. Seçilen bu yararlı LED'ler iletişim LED'i (Communication LED- C-LED) olarak adlandırılır. Diğer LED'ler ise aydınlatma amacı ile kullanılmaya devam eder. Kullanıcılar için kesintisiz iletişim garanti edilirken aynı zamanda oda içerisindeki aydınlatmanın da ISO tarafından belirlen standartlara uygun olmasına dikkat edilmiştir.

Bu çalışmada tasarlanan iç mekân Li-Fi sisteminde veri iletimi için OOK modülasyon tekniği kullanılmıştır. Dijital olarak aktarılacak olan bilgi bu modülasyon tekniği ile iletilirken LED'in yanması durumu için 1, LED'in sönmesi durumu için 0 bilgisini alıcı tarafa gönderir. Bu da bir LED'den aynı anda sadece bir bilgi gönderilebilir anlamına gelmektedir. Sonuç olarak bu teknik ile bir LED sadece bir kullanıcıya hizmet verebilir. Eğer tüm LED'ler iletişim için kullanılırsa yalnızca bir kullanıcı bu hizmetten yararlanabilir. Ayrıca alıcının, kullanıcının konumuna bağlı olarak her LED'e olan mesafesi farklı olur. Bu mesafe farkından dolayı alıcıya ilk ulaşan sinyalden sonra diğer LED'lerden gelen gecikmeli sinyaller ve yansımalar ISI'ya sebep olur.

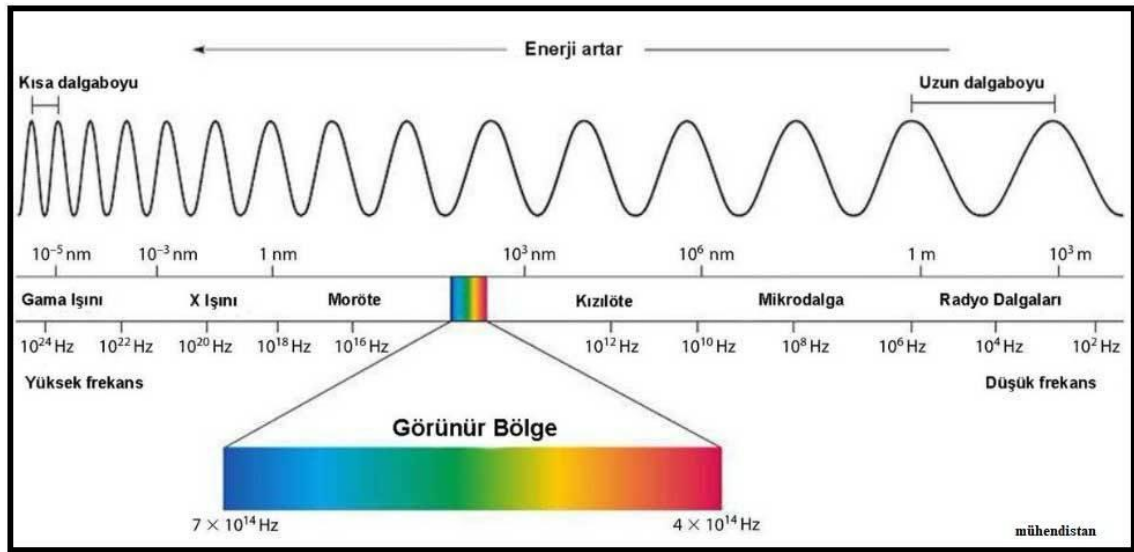
Çalışmada iç mekân oda modellenmesi gerçekleştirildikten sonra ISO standartlarına uygunluğu kontrol etmek amacıyla aydınlatma kontrolü yapılmış ve daha sonra hem ISI etkisini azaltmak hem de birden fazla kullanıcıya hizmet verebilmek için TLBO'ya dayalı LED seçim algoritması kullanılmıştır.

3.1. Li-Fi

Bulduğumuz teknoloji çağında, hızla gelişen elektronik cihazlarda (telefon, tablet, bilgisayar, robot, drone vb.) ve haberleşme sistemlerinde internet önemli bir yer kapsamaktadır. Bununla birlikte kullanıcıların veri talebi de gün geçtikçe artmaya devam etmektedir (Badeel et al. 2021). Veri ihtiyacının karşılanmasında kullanılan en popüler yöntem kablosuz bağlantı (Wireless Fidelity- Wi-Fi) teknolojisidir. Wi-Fi verileri

3. MATERYAL ve YÖNTEM

aktarmak için Radyo Frekansını (Radio Frequency-RF) kullanmaktadır (D Lumoindong et al. 2018). Ayrıca RF, genlik modülasyonu (Amplitude Modulation- AM) ve frekans modülasyonu (Frequency Modulation- FM), radyo yayıncılığı, televizyon yayıncılığı, mobil iletişim için küresel sistem (Global System for Mobile Communications- GSM), askeri uygulamalar veya uydu iletişimleri gibi farklı birçok alanlarda da kullanılmaktadır (Cailean 2014). Wi-Fi teknolojisinin günlük hayatımızda hemen hemen her alana yayılması ve birçok cihazda entegre bir şekilde bulunması RF kullanımını da artmaktadır. 2019 yılı ile 2020 yılının 1. Çeyreği kıyaslandığında ortalama geniş bant veri kullanımının %47 arttığı gözlemlenmiştir (Popadić and Kočan 2021). Dolayısıyla gün geçtikçe de kullanım alanlarının yaygınlığı ve artan talepler RF’de tıkanıklığa yol açmaktadır. RF, 300 GHz’lik bir spektrum aralığına sahiptir. Öte yandan Şekil 3.1’de görüldüğü gibi VLC 380 THz ile 780 THz arasındaki görünür ışık spektrumundan yararlanır ve kablosuz iletişim için 400 THz kullanılabilir bant genişliği sağlar. Sonuç olarak, görünür ışık spektrumunun, RF spektrumundan 10.000 kat daha fazla bant genişliği içerdiğini ortaya koymaktadır (Cailean 2014).



Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrum

Görünür ışık iletişimi üzerine yapılan çalışmalar yapay ve doğal ışık kaynakları ile birlikte çok eski zamanlardan beri devam etmektedir. Bell ve Tainter’in bir ışık huzmesi üzerinden bir konuşmayı iletmesi ile VLC çalışmaları başlamış ve zamanla diğer ışık kaynaklarının icadı ile çalışmalar devam etmiştir (Bell 1880; MIMS III 1980). Özellikle son yıllarda LED teknolojisinin gelişmesi ile birlikte VLC adına çalışmalar da

hız kazanmıştır. LED'lerin ilk modellerine bakıldığında üretim maliyetlerinin fazla olması ve yeterli miktarda ışık yayamamaları önemli bir sorundu. Daha sonra LED teknolojisinin gelişmesi ve LED'lerin aydınlatma amacıyla kullanılmaya başlanması ile birlikte aydınlatma ve optik haberleşme sistemlerinde (Optical Communication Systems-OCS) birlikte kullanılması fikri ortaya çıkmıştır (Tanaka et al. 2000). 2011 yılında Edinburgh Üniversitesi Mobil İletişim Başkanı Harald Haas tarafından TED Global konferansında tanıtılan Li-Fi, aydınlatmanın olduğu her yerde kullanılabilir bir VLC tabanlı bir teknoloji olarak karşımıza çıkmıştır (Haas et al. 2015). Li-Fi'de 1µs'nin altında anahtarlanabilen LED'ler tarafından ikili bilgilerin gönderilmesi ile veri iletimi gerçekleştirilir. Bu LED'lerin insan gözünün fark edebileceğinden daha hızlı açılıp kapanması anlamına gelir. Böylece LED'ler sürekli yanıyormuş gibi görünür. Alıcı tarafta insan gözünün fark edemeyeceği bu yanıp sönmeleri algılayabilen ışığa duyarlı bir dedektör kullanılır (Sarkar et al. 2015).

Li-Fi sistemleri Wi-Fi sistemlerinin sınırlamalarına ve RF bandının doyuma ulaşmasına çözüm olarak kullanılacak alternatif bir çözümdür. Özellikle daha hızlı ve düşük maliyetli oluşu Li-Fi teknolojisini ön plana çıkartmıştır. Işığın opak maddelerden geçememesi Li-Fi'nin kullanım alanını sınırlarken güvenlik için önemli bir avantaj sağlar. Çizelge 3.1' de Li-Fi ve Wi-Fi sistemleri sistemlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir (Misbah et al. 2016).

Çizelge 3.1. Li-Fi ve Wi-Fi sistemlerinin karşılaştırılması

Özellikler	Li-Fi	Wi-Fi
Çevre	Veri iletim ortamı olarak görünür ışık kullanılır.	Veri iletim ortamı olarak radyo dalgaları kullanılır.
Menzil	LED ışık gücüne bağlıdır	Menzil büyüktür, 100 metreye kadar uzatılabilir.
Maliyet	Işık kullandığı için daha ucuzdur.	Radyo spektrumu kullandığı için pahalıdır.
Teknoloji	Noktadan noktaya ağ topolojisini kullanır.	Noktadan çok noktaya ağ topolojisini kullanır.
Veri Yoğunluğu	Veri yoğunluğu çok yüksek.	Veri yoğunluğu nispeten düşüktür.
Değer	Piyasa değeri düşük	Piyasa değeri yüksek
Veri Aktarımı	Verilerin iletimi doğrudan bitler kullanılarak yapılır.	Verilerin iletimi radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilir.
Engel Müdahalesi	Engel tepkisi çok yüksek.	Engel müdahalesi düşük veya neredeyse ihmal edilebilir.
Kullanılabilirlik	Aydınlatmanın olduğu hemen hemen her yerde kullanılabilir.	Kullanılabilirliği düşüktür.

Ayrıca Li-Fi sistemleri diğer kablosuz iletişim sistemleriyle kıyaslandığında da üstün özellikler gösterir. Örneğin, diğer bir yaygın kablosuz iletişim teknolojisi olan Bluetooth ile karşılaştırıldığı zaman menzil ve veri aktarım hızı olarak Li-Fi ön plana çıkartmaktadır. Çizelge 3.2’de, Li-Fi ve Bluetooth karşılaştırılmasına yer verilmiştir (Misbah et al. 2016).

Çizelge 3.2. Li-Fi sistemleri ile bluetooth sistemlerinin karşılaştırılması

Özellikler	Li-Fi	Bluetooth
Güç Tüketimi	Orta	Düşük
Menzil	LED ışık gücüne bağlıdır	10 metre
Maliyet	Düşük	Düşük
Teknoloji	Noktadan noktaya ağ topolojisini kullanır.	Noktadan çok noktaya ağ topolojisi kullanır
Çalışma Bandı	Çalışma bandı görünür ışık bandında çalışır.	2,5Mhz’de çalışıyor.
Veri Aktarımı	>1 Gb/sn	800Kbps

Çizelge 3.3’de ise küresel konumlandırma sistemi (Global Positioning System- GPS), hücreli ağlar, ZigBee, Wi-Fi, kızılötesi (Infrared- IR), Bluetooth, ultra genişbant (Ultra wideband- UWB), radyo frekansı ile tanımlama (Radio Frequency Identification- RFID) gibi diğer kablosuz iletişim yöntemlerine ait veri yoğunluklarının ve ulaşılabilir veri hızlarının karşılaştırması verilmiştir (Luo et al. 2017).

Çizelge 3.3. Kablosuz haberleşme sistemlerinin karşılaştırması

Sistem	Mesafe	Maliyet	Güç Tüketimi	Avantajlar	Kısıtlamalar
GPS	16km	Yüksek	Yüksek	Tüm dünyayı çevreler	Pahalı altyapı
Hücreli Ağlar	80km	Orta	Yüksek	Geniş kapsama alanı	Düşük hassasiyet
ZigBee	30-60m	Düşük	Düşük	Düşük maliyet ve güç tüketimi	Düşük veri iletimi
Wi-Fi	35m	Orta	Yüksek	Geniş kullanım alanı	Daralan bantgenişliği
Kızılötesi	Birkaç Metre	Orta	Düşük	Düşük güç tüketimi	Ekstra donanım maliyeti ve düşük mesafe
Bluetooth	10m	Düşük	Düşük	Düşük maliyet ve güç tüketimi	Sınırlı kapsama alanı
UWB	Birkaç Metre	Yüksek	Düşük	Hassasiyet	Sınırlı kapsama alanı
RFID	1m	Düşük	Düşük	Düşük maliyet ve güç tüketimi	Yüksek tepki süresi
Li-Fi	10m	Düşük	Düşük	Yüksek veri hızı ve güvenilirlik	Sınırlı kapsama alanı

3.2. LED

Doğal ya da yapay ışık kaynakları görünür ışık iletişimi için bir araç olarak kullanılabilirler. Güneş, akkor flamanlı lamba, floresan vb. gibi ışık kaynakları görünür ışık iletişimi için kullanılmıştır. Görünür ışık iletişiminin ilk çalışmalarında güneş ışığı ile ses sinyallerinin iletimi gerçekleştirilmiştir. Suni aydınlatma kaynaklarının ortaya çıkması ile birlikte görünür ışık iletişimi için çalışmalar devam etmiştir. Akkor lambalar ve floresan lambalar ile yapılan çalışmalarda 100-150Hz arasında parazit sinyallerin bulunduğu bunun da BER’i artırabileceği tespit edilmiştir (Fuada and Adiono 2017). Ayrıca akkor lambaların 1.000 saat ömrünün olması ve tüketilen enerjinin sadece %5’inin ışığa çevirmesi, floresan lambaların ise 10.000 saat ömrünün olması ve tüketilen enerjinin sadece %20 ile %25’lik bir kısmının ışığa dönüştürmeleri haberleşme sisteminin verimini düşürürler. Diğer bir sorun da floresan lambaların çakışan optik spektrumlarıdır ve bu nedenle girişim oluşmasıdır. LED’lerin, üretim maliyetlerinin azalması, parlaklıklarının artması ve boyutlarının küçülmesi, önemli ışık kaynaklarından biri olmalarına neden olmuştur. Özellikle aydınlatmada, diğer aydınlatma kaynaklarına göre çok daha verimlidirler. Ayrıca fiziksel dayanırlıkları, anahtarlama hızları, düşük karbon yayılımı nedeniyle çevre duyarlılıkları ve akıllı sistemlerle kontrol edilebilmeleri, LED’lerin

3. MATERYAL ve YÖNTEM

kullanımını artırmış ve daha cazip hale getirmiştir (Ching, Seong and Yong, 2013). LED ve diğer aydınlatma kaynakları ile ilgili karşılaştırma Çizelge 3.4’de verilmiştir (Şenyer et al. 2016).

Çizelge 3.4. LED, akkor lamba ve floresan lamba karşılaştırması

Özellikler	LED	Akkor Lamba	Floresan Lamba
Elektrik Kullanımı	6-8 Watt	60 Watt	13-15 Watt
Cıva İçeriği	Hayır	Hayır	Evet
RoHS Uyumluluğu	Evet	Evet	Hayır
CO2 Yayılımı	451 libre/yıl	4.500 libre/yıl	1.051 libre/yıl
Neme Duyarlılık	Yok	Az Miktarda	Evet
Ani Olarak Açılma	Evet	Evet	Hayır
Açma Kapama Döngüsü Etkisi	Yok	Az Miktarda	Evet
Kırılma	Dayanıklı	Dayanıksız	Dayanıksız
Isı Yayılımı	3,4 btu/saat	85 btu/saat	30 btu/saat

*RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directive-Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama Yönetmeliği)

3.2.1. LED türleri

LED’ler kendilerini oluşturan malzemenin türüne ve katkılama oranına bağlı olarak farklı dalga boylarında (renklerde) ışımaya yaparlar. Bu farklı dalga boyları, farklı kullanıcılara atanabilir. Farklı renklerin farklı kullanıcılara atanması ile çoklu kullanıcılar için görünür ışık iletişimi gerçekleştirilmiştir (Nakagawa et al. 2014; Ndjiongue et al. 2016). Görünür ışık iletişiminde LED’lerin özellikle hızlı anahtarlanabilir olmaları arzu edilir. Bu sayede yüksek hızlarda iletişim gerçekleştirilebilir.

3.2.1.1. Fosfor tabanlı LED’ler

Beyaz ışık üretmek için kullanılan yöntemlerden birisi de fosfor katkılamadır. Genellikle İndiyum Galyum Nitrid’den (Indium Gallium Nitride-InGaN) üretilmiş mavi LED’ler üzerine farklı renkteki fosforların katkılanması ile beyaz LED’ler elde edilir. Katkılanan fosfor miktarına bağlı olarak farklı beyazlık katagorileri elde edilir. Maliyetinin ucuz ve yapısının az karmaşıklığa sahip olması nedeniyle tercih edilirler (Ohno 2004).

3.2.1.2. RGB LED'ler

Beyaz ışığı üretmek için kullanılan bir diğer yöntem de içerisinde kırmızı, mavi ve yeşil LED'leri kullanmaktır. Bu üç rengin uygun oranlarda karıştırılması ile beyaz ışık elde edilir. Farklı ışık yoğunluklarında karıştırma yapılarak, farklı renkler de elde edilebilir. Yüksek veri hızı, tepki süresi, verim ve modülasyon bant genişliğine sahiptirler (Karunatilaka et al. 2015; Luo et al. 2017).

3.2.1.3. Organik ışık yayan diyotlar (OLED)

Organik ışık yayan LED'ler (Organic Light-Emitting Diode-OLED), anot ve katot arasına bir organik madde (karbon temelli madde) katılanması ile oluşturulur. OLED'ler aydınlatma amacıyla kullanıldıkları zaman yüksek ışık verimliliği, renk ayarlanabilirliği, esneklik, şeffaflık, küçük boyut, geniş lüminesans alanı vb. avantajlar sunarlar. Geniş bir aydınlatma alanına sahiptirler. Ancak kullanım ömürlerinin kısa olması dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır (Geffroy et al. 2006; Han et al. 2018).

3.2.1.4. Mikro LED'ler

Mikro LED'ler inorganik madde olarak Alüminyum Galyum Nitrür'den (Aluminum Gallium Nitride-AlGa₃N) üretilen LED'lerdir. OLED teknolojisine kıyasla daha ince ve düşük güç tüketimine sahiptir ancak aynı ekran parlaklığını üretirler. Diğer bir avantajı ise uzun ömürlü olmalarıdır. OLED'ler de kullanılan organik maddenin ömrünün kısa olması ve zamanla mavileşmeye başlaması sorunu vardır ancak mikro LED'ler uzun kullanım ömrüne sahiptir. Görünür ışık iletişiminde kullanıldıklarında 1.5Gbit/s hızlara kadar ulaşılabilir (Karunatilaka et al. 2015).

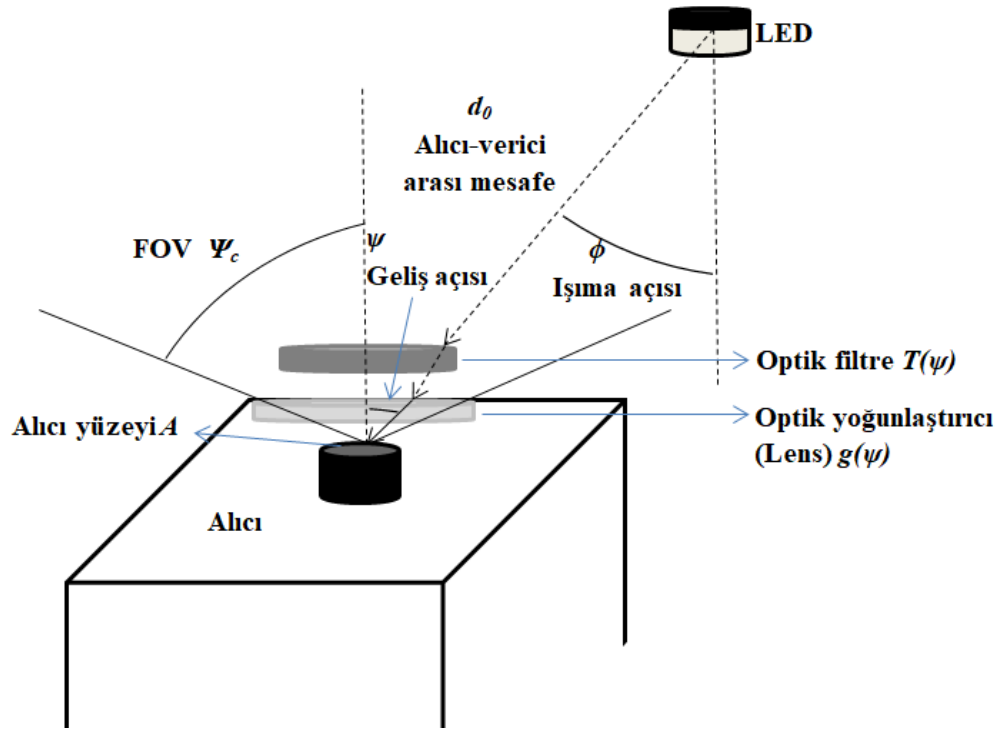
3.3.Fotodedektör

Li-Fi sistemlerinde veri LED ışığı aracılığı ile ortama aktarıldıktan sonra iletilen sinyalleri alıcı kısım da bir fotodedektör algılar ve alınan optik gücü elektrik sinyaline dönüştürür (Cevik and Yilmaz 2015). Fotodedektörler, gelen ışıkla orantılı olarak akım oluşturan yarıiletken malzemeden yapılmış ve yüksek bant genişliğine sahip bir p-n

eklemi içeren elektronik cihazlardır. Fotonlar absorbe edildiği zaman fotodedektörde akım oluşturulur. Ayrıca fotodedektöre ışık düşmediğinde de fotodedektörde çok küçük bir akım oluşur. Foto akımın değeri fotodedektörün hassasiyetine bağlı olarak değişiklik gösterir. Ancak alıcıya ulaşan ışık yalnızca vericiden değil, aynı zamanda yapay ya da doğal ışık kaynaklarından da gelebileceği için alıcıda parazit sinyaller oluşur. Optik filtreler ya da vericide kullanılan LED'in dalga boyuna uyumlu olarak seçilen bir fotodedektör, oluşan parazitleri ortadan kaldırılabılır (Afgani et al. 2006; Minh et al. 2008; Vučić et al. 2010). Ayrıca parazitlerin etkisi görüş alanı (Field of View-FOV) açısı daraltılarak da azaltılabilir (Liu et al. 2011).

3.3.1. Li-Fi sistem modeli

VLC sistem analizi için boş bir oda tasarımı dikkate alınmıştır. Her bir LED konumu bir K matrisi içerisinde tanımlanır. LED'lerin farklı konumlarından dolayı iletilen veriler farklı yollardan ve farklı açılardan alıcıya ulaşır. Şekil 3.2'de bir vericiden alıcıya ulaşan sinyale ait bilgiler verilmiştir (Aydin and Duman 2022).



Şekil 3.2. Sistem modeli

Çalışmada, her bir LED çipinin bir Lambert yayılım modeli olduğu varsayılarak DC kanal kazanç hesabı yapılmıştır. DC kanal kazancı, her bir LED'den alıcıya ulaşan sinyal gücü olarak tanımlanır ve Denklem 3.1'deki gibi hesaplanır (Kahn and Barry 1997).

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d_0^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi \geq \Psi_c \end{cases} \quad (3.1)$$

Bu ifadede m , Lambert yayılımının derecesini temsil eder. LED'in yarı aydınlıktaki güç açısı $\phi_{1/2}$ kullanılarak Denklem 3.2'deki gibi hesaplanır.

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2}) \quad (3.2)$$

Denklem 3.1'de ifade edilen $g(\psi)$ optik yoğunlaştırıcı kazancını temsil eder ve Denklem 3.3'de gösterildiği gibi hesaplanır (Kahn and Barry 1997; Komine et al. 2009).

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi \geq \Psi_c \end{cases} \quad (3.3)$$

3.4.SNR Hesabı

Görünür ışık kanalı, arka plan ışığından kaynaklanan ek beyaz Gauss gürültüsü (Additive white Gaussian noise-AWGN) kanalına sahip olacak şekilde modellenmiştir (Hussein et al. 2016). Fotodetektöre ulaşan optik sinyal nedeniyle oluşan akım Denklem 3.4'de ifade edilmiştir.

$$y(t) = \gamma h(t) \otimes x(t) + n(t) \quad (3.4)$$

Bu ifadede $y(t)$ fotodedektör tarafından alınan sinyal akımını temsil eder, γ fotodedektör duyarlılığını ifade eder, $x(t)$ iletilen optik darbedir, $h(t)$ darbe yanıtıdır ve $n(t)$ AWGN'dir.

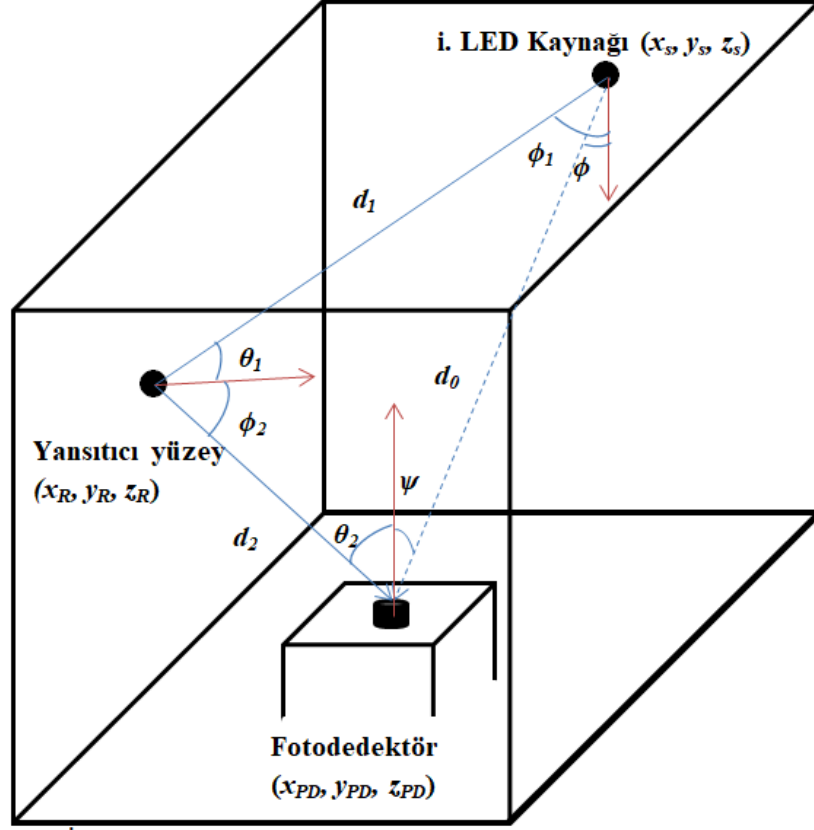
Kanal darbe yanıtı $h(t)$, Denklem 3.5'de gösterildiği gibi görüş hattı ve görüş hattı olmayan bileşenlerin toplamına eşittir.

$$h(t) = h_{LOS}(t) + h_{NLOS}(t) \quad (3.5)$$

Burada görüş hattı $h_{LOS}(t)$, görüş hattı olmayan bileşen ise $h_{NLOS}(t)$ ile ifade edilmiştir. Bu yazıda, $h_{LOS}(t)$ yolu dikkate alınmış ve LED'lerden fotodedektöre iletilen optik darbe yanıtı Denklem 3.6'daki gibi ifade edilmiştir (J. Wang et al. 2017).

$$h_{LOS} = \frac{(m+1)A \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi)}{2\pi d_0^2} \delta\left(t - \frac{d_0}{c}\right) \quad (3.6)$$

Gönderilen sinyallerin varış süreleri farklıdır çünkü her LED'in fotodedektöre olan mesafeleri kullanıcının konumuna bağlı olarak farklıdır. Şekil 3.3'de alıcıya direkt ve yansımalar sonucunda ulaşan sinyaller gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Gönderilen ışının alıcıya ulaşım yolları

Tek LED için ifade edilen Şekil 3.3’de sinyalin doğrudan alıcıya ulaşma mesafesi Denklem 3.7’deki, sinyalin alıcıdan yansıtıcı yüzeye ulaşma mesafesi Denklem 3.8’deki ve yansıma sonucu alıcıya ulaşma mesafesi Denklem 3.9’daki, ulaşma süresi ise Denklem 3.10’daki gibi ifade edilir (Allycan Mapunda et al. 2020).

$$d_0 = \sqrt{(x_s - x_{PD})^2 + (y_s - y_{PD})^2 + (z_s - z_{PD})^2} \quad (3.7)$$

$$\cos(\phi) = |z_s - z_{PD}| / d_0 = \cos(\psi)$$

$$d_1 = \sqrt{(x_s - x_R)^2 + (y_s - y_R)^2 + (z_s - z_R)^2} \quad (3.8)$$

$$\cos(\phi_1) = |z_s - z_R| / d_1 \quad \cos(\theta_1) = |x_s - x_R| / d_1$$

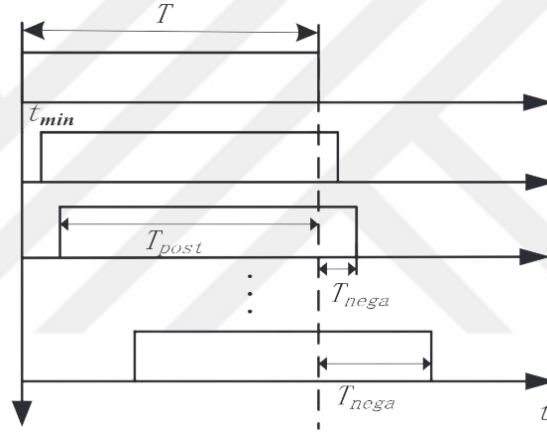
3. MATERYAL ve YÖNTEM

$$d_2 = \sqrt{(x_R - x_{PD})^2 + (y_R - y_{PD})^2 + (z_R - z_{PD})^2} \quad (3.9)$$

$$\cos(\phi_2) = |x_R - x_{PD}| / d_2 \quad \cos(\theta_1) = |z_R - z_{PD}| / d_2$$

$$t_0 = \frac{d_0}{c} \quad (3.10)$$

Şekil 3.4'de T , sinyalin periyodudur. Her bir LED ile alıcı arasındaki mesafe, kullanıcının konumuna bağlı olarak değiştiğinden dolayı sinyallerin alıcıya ulaşma süresi de değişir. LED'ler arasındaki optik yollardaki farklılıklar nedeniyle, varış süresi değişkendir.



Şekil 3.4. C-LED'lerden alıcıya ulaşan sinyaller

Gönderilen ilk sinyal referans alındıktan sonra alıcıya ulaşan diğer her LED sinyali için bir negatif ve bir pozitif bileşen tanımlanabilir. İstenilen sinyalin gücü ($P_{rsignal}$), sinyallerin pozitif bileşenlerinden sağlanırken, ISI gücü, sinyallerin negatif bileşenlerinden (P_{rISI}) kaynaklanmaktadır. T_{nega} , T_{post} , $P_{rsignal}$ ve P_{rISI} Denklem 3.11'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_{nega} = t_{x,y} - t_{first}$$

$$T_{post} = T - T_{nega}$$

(3.11)

$$P_{rsignal} = \int_{t_0}^{T+t_0} \left(\sum_{i=1}^{LEDS} h_i(t) \otimes x(t) \right) dt$$

$$P_{rISI} = \int_{T+t_0}^{\infty} \left(\sum_{i=1}^{LEDS} h_i(t) \otimes x(t) \right) dt$$

Bu çalışmada veri hızının 500Mbit/s'dan fazla olması hedeflenmiştir. ISI, yüksek veri hızlarının elde edilmek istendiği durumlarda dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. ISI azaltarak, sistem performans verimliliğini ve SNR artırılabilir.

SNR ifadesi Denklem 3.12'deki gibi hesaplanır.

$$SNR = \frac{(\gamma P_S)^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 + (\gamma P_{ISI})^2}$$

(3.12)

3.5.Li-Fi Sistemlerinde Karşılaşılan Gürültü Türleri

3.5.1. Atış gürültüsü

Atış gürültüsüne, LED'lerin ürettiği ışık ve ortam ışığı neden olur. LED'ler öngerilim voltajı tarafından kontrol edilir. Düşük öngerilim seviyelerinde bile, alıcıda gürültüye neden olabilecek ışık oluşabilir. Ayrıca dedektörün güneşten kaçınılmaz olarak aldığı büyük miktarda görünür ışık vardır. Bazı yapay ışık kaynaklarının (floresan, akkor vb.) yaydıkları ışık da fotodedektörü etkiler. Bu ışık kaynaklarından bazıları genellikle 50 Hz'lik bir frekansta modüle edilirken, diğer ışık kaynakları (floresan gibi) yüzlerce kHz'de modüle edilir ve bunlar LED'in modüle edilmiş sinyalini etkileyebilir. Bu gürültü kaynakları tarafından üretilen atış gürültüsü, literatürde genellikle ilave beyaz gürültü

olarak anılır ve denklem 3.13’de gösterildiği gibi hesaplanır (Komine and Nakagawa 2004).

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{rsignal} + P_{rISI})B + 2qI_{bg} I_2 B \quad (3.13)$$

3.5.2. Termal gürültü

Termal gürültü esas olarak alıcı tarafta kullanılan amplifikatör tarafından üretilir ve alıcı için ek gürültü kaynağı olur. Sıcaklığın etkisi ile hareket eden elektronlar nedeniyle oluşan akım termal gürültüye neden olur. Harici bir elektrik alanının yokluğunda, iletkendeki elektronlar düzgün olmayan termal hareket yaparlar. Belirli bir yönde net bir elektron hareketliliği olmadığı için akım oluşmaz. İletkenlerde ve yarı iletkenlerde voltaj yükselmeleri veya voltaj düşmeleri nedeniyle gürültü voltajları meydana gelir. Termal gürültünün ortalama kare (mean square) değeri, geri besleme direnci gürültüsünden ve alan etkili transistör (Field Effect Transistör- FET) gürültüsünden oluşur. Termal gürültü Denklem 3.14’deki gibi ifade edilir (Hua et al. 2018).

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi kT_k}{G} \eta A I_2 B + \frac{16\pi^2 kT_k \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3 \quad (3.14)$$

3.6. Geçerli Oran Eşiği

ISI etkisini en aza indirmek ve sistem verimliliğini artırmak için geçerli oran eşiğine (Valid ratio threshold- Th_{VR}) dayalı C-LED seçimi yapılabilir. Kullanıcıya uzak olan LED’lerden gelen sinyaller, kullanıcıya en yakın LED’den gelen sinyale göre gecikmelidir. Ayrıca yansılardan sonucunda alıcıya ulaşan sinyaller de alıcı üzerinde olumsuz etkiler oluşturur. Bu etkileri azaltmak için geçerli oran eşiği kullanılabilir. Bu amaçla Şekil 3.4’de gösterildiği gibi iletilen sinyaller pozitif ve negatif kısımlara ayrılır. Bir LED’den gelen sinyalin pozitif kısmının, negatif kısmına oranı, Th_{VR} değerinden büyük olan LED’ler C-LED olarak seçilir. Örneğin Th_{VR} değerinin 1 olarak seçilmesi ile Denklem 3.15’de gösterildiği gibi LED seçimi yapılabilir.

$$k = \begin{cases} 1, & \frac{T_{post}}{T_{nega}} > Th_{VR} \\ 0, & diğ\text{erleri} \end{cases} \quad (3.15)$$

Bu ifadede, k'nın 1'e eşit olması ilgili LED'nin iletişim LED'i olarak kullanılacağını göstermektedir. Kullanıcıya ulaşan sinyallerin pozitif kısmının, negatif kısmından küçük olduğu LED'ler iletişim amacıyla değil sadece aydınlatma amacıyla kullanılabilirler. Çizelge 3.5'de C-LED seçim algoritması için sözde kod (pseudocode) verilmiştir (L. Wang et al. 2017).

Çizelge 3.5. C-LED seçim algoritması

```
Her LED'den alıcıya gelen optik sinyalin ulaşma süresini hesaplanır.  
Bu değerler küçükten büyüğe doğru sıralanır ve tekrarlanan değerler silinir.  
n=0;  
For her ulaşma zamanı  
    % Başlat  
    Snr0=0;  
    =1;  
    'ye göre Denklem (3.13)'den yeni K matrisini elde edin.  
    SNR hesapla.  
    Snr1=SNR;  
    While (Snr1>Snr0)  
        =+1;  
        Snr0=Snr1;  
        'ye göre Denklem (3.13)'den yeni K matrisini elde edin.  
        SNR hesapla.  
        Snr1=SNR;  
    end  
    Snr(n)=Snr0;  
    n=n+1;  
end  
İletişim LED'lerini belirlemek için maksimum SNR değeri için elde edilen LED deseni bulun.
```

3.7.Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon

Doğada bulunan birçok olay ve canlı, mühendislik tasarımlarının kaynağı olmuştur. Doğadan elde edilen benzetimler kullanılarak belirli sınırlar içinde metasezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar ile optimizasyon problemleri çözülebilir. Bu algoritmalarından biri de TLBO algoritmasıdır. Öğretmen ve öğrenci

arasındaki bağlantıdan yararlanılarak oluşturulan TLBO algoritmasında bir sınıf içerisinde en geniş bilgiye sahip olan kişinin öğretmen olduğu varsayılarak elde edilmek istenilen en iyi sonuç öğretmen olarak atanır. Diğer sonuçlar ise öğrenci olarak belirlenir ve diğer değerler de bu istenilen sonuca yaklaştırılmaya çalışılır. Bu aşamada öğrenciler ve öğretmen araştırma, bilgilerini paylaşma ve kişisel yetenekler ile kendilerini geliştirebilir ve daha iyi sonuçlar elde edebilir. Rao (2011)'den bu algoritma hakkında daha detaylı bilgiye ulaşılabilir.

Bu tezde, birden fazla kullanıcı arasındaki mesafeye bağlı olarak uygun C-LED'leri seçerek optimum SNR'yi elde etmek için TLBO algoritması kullanılmıştır. TLBO algoritması, Öğretmen Aşaması ve Öğrenci Aşaması olmak üzere iki aşamadan oluşur. Bu algoritmada optimizasyon süreci beş adımda özetlenebilir (Yücel et al. 2021).

Adım 1: İlk adımda, iç mekân Li-Fi modeli ve LED'lerin yerleşimi geometrik bir şekil olarak tanımlanmış ve LED'lerin alıcıya olan uzaklığı (X_i) olarak tasarım değişkeninin maksimum (X_i^{\max}) ve minimum (X_i^{\min}) değerleri belirlenmiştir. Kullanıcıya en yakın olan LED'in mesafesi minimum değer olarak, en uzak LED'in mesafesi ise maksimum değer olarak belirlenir. Sistem değişkenlerinin aralığı Denklem 3.16'de gösterilmektedir.

$$X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max} \quad i = 1, vn \quad (3.16)$$

burada vn değişken sayısını ifade eder.

Adım 2: Her bir LED dizisinden rastgele seçilen X_i ile SNR hesabı yapılarak başlangıç çözüm matrisi (CL) oluşturulur. Bu rastgele seçilen LED'lerin kullanıcıya olan mesafesi X_i^{\min} ile X_i^{\max} arasındadır ve kullanıcıların farklı konumlarına göre değişkenlik gösterebilir. Bu LED'lere göre hesaplanan SNR değeri ilk çözüm matrisini oluşturur. Ortaya çıkan SNR değerleri, CL ile karşılaştırılmak üzere $f(X)$ içinde saklanır. Başlangıç çözüm matrisi ve $f(X)$, Denklem 3.17'deki gibi ifade edilmiştir.

$$CL = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & \cdots & X_{1,vn} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & \cdots & X_{2,vn} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ X_{pn-1,1} & \cdots & \cdots & \cdots & X_{pn-1,vn} \\ X_{pn,1} & \cdots & \cdots & \cdots & X_{pn,vn} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$f(X) = \begin{bmatrix} f(X_1) \\ f(X_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ f(X_{pn-1}) \\ f(X_{pn}) \end{bmatrix}$$

burada pn popülasyon sayısıdır.

Adım 3: Bir sınıfta en geniş bilgiye sahip olan kişiler öğretmenlerdir. Bu benzetme kullanılarak elde edilen maksimum SNR değeri Denklem 3.18'de görüldüğü gibi öğretmen olarak atanır.

$$X_{teacher} = X_{\max f(x)} \quad (3.18)$$

Öğretmenin asıl amacı sınıf ortalamasının (X_{mean}) yüksek olmasını sağlamaktır. Bu benzetmeye göre, elde edilen SNR değeri ($X_{old,i}$) Denklem 3.19'de gösterildiği gibi öğretmen ve sınıf ortalamasına göre yeni aday çözüme ($X_{new,i}$) dönüştürülür.

$$X_{new,i} = X_{old,i} + rand(0,1)(X_{teacher} - T_F X_{mean}) \quad (3.19)$$

Bu denklemde, $rand(0,1)$ ifadesi 0 ile 1 arasında rastgele seçilmiş bir sayı, T_F öğrenme faktörüdür. T_F rastgele değişkenlere göre Denklem 3.20'da gösterildiği gibi 1 veya 2'ye yuvarlanır.

$$T_F = \text{round}[1 + \text{rand}(0,1)] \rightarrow \{1, 2\} \quad (3.20)$$

Elde edilen sonuçlara göre yeni çözüm eski çözümden daha iyi ise $X_{new,i}$ yeni çözüm olarak kabul edilir.

Adım 4: Öğrenciler kendi aralarında bilgilerini birbirleriyle paylaşarak, kişisel olarak sahip oldukları yetenekleri, yaptıkları araştırmalar ve çalışmalara göre kendilerini geliştirebildikleri gibi, bilgilerinde gerileme olduğu da görülmektedir. Bu benzetimden yararlanılarak rastgele iki öğrenci seçilir. Bu iki öğrencinin SNR değerine ait LED düzenleri etkileşime sokularak yeni bir LED düzeni ve bu LED düzenine ait SNR değeri elde edilir. Etkileşim sonucunda elde edilen SNR değeri yeni çözüm olarak atanır. Bu yeni çözüm, eski çözümden daha iyi performans gösteriyorsa yani öğrenci bilgisi artmışsa, eski çözüm yerine yeni çözüm kullanılabilir. Öğrencilerin kendilerini geliştirebileceklerinden yararlanılarak öğrenci aşaması Denklem 3.21'deki gibi ifade edilir.

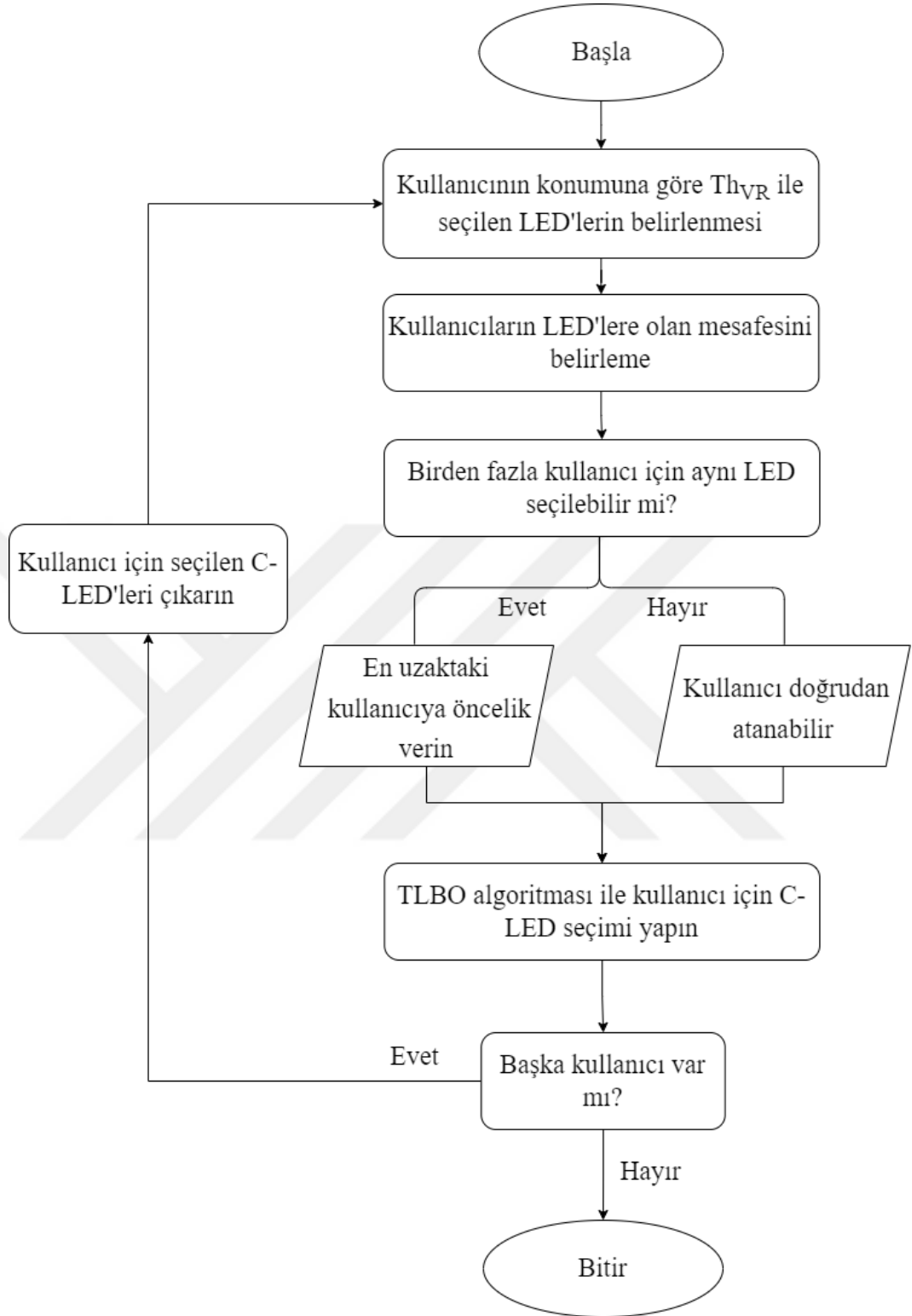
$$X_{new,i} = \begin{cases} X_{old,i} + \text{rand}(0,1)(X_i - X_j); & f(X_i) > f(X_j) \\ X_{old,i} + \text{rand}(0,1)(X_j - X_i); & f(X_i) < f(X_j) \end{cases} \quad (3.21)$$

Bu ifadede X_i ve X_j sınıftan rastgele seçilmiş öğrencilerdir.

Adım 5: Adım 3 ve 4 iterasyon sayısı kadar tekrarlanır.

TLBO algoritmasında Adım 5'de belirtilen iterasyon sayısı ve Adım 2'de belirtilen çözüm matrisi oluşturulurken kullanılan popülasyon sayısının uygun bir değerde seçilmesi gerekir. İterasyon ve popülasyon sayısının düşük tutulması düşük SNR elde edilmesine neden olurken iterasyon ve popülasyon sayısının yüksek seçilmesi ise C-LED seçim süresinin gereksiz yere artmasına neden olacaktır. Bu nedenle iterasyon ve popülasyon sayısının dikkatle seçilmesi gerekir. Bu çalışmada, iterasyon ve popülasyon sayıları 2'den başlayarak ve 2'şer 2'şer 70'e kadar artırılmıştır. Uygun iterasyon ve popülasyon sayısı hesaplanan SNR ve C-LED seçim süresi dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çok kullanıcılı iç mekân VLC sistemlerinde önemli bir konu, kullanıcılar için atama önceliğinin belirlenmesidir. Oda içerisinde birden fazla kullanıcı olması durumunda bir LED birden fazla kullanıcı için faydalı olabilir. OOK modülasyonu uygulanırken bir LED sadece bir kullanıcıya atanabileceği için bu LED'in hangi kullanıcı için atanması gerektiği belirlenmelidir. Dolayısıyla, kullanıcıların konumuna göre uygun C-LED'leri seçmek için bir atama önceliği belirlenir. Kullanıcılar için Th_{vR} oranına bağlı olarak C-LED'ler seçilir. Daha sonra aynı armatürden C-LED'i seçen kullanıcılar arasından en uzaktaki kullanıcıya öncelik verilir. Bu kullanıcı için TLBO algoritması uygulanarak en iyi C-LED modeli oluşturulur. Öncelikli bir kullanıcının kullandığı LED'ler çıkarıldıktan sonra kalan LED'ler ile yeni kullanıcı arasındaki mesafeye göre yeni bir seçim yapılır. Bu işlemler tüm kullanıcılar için LED ataması yapılmıncaya kadar devam eder. Şekil 3.5'de C-LED seçimi için kullanılan akış şeması gösterilmektedir.

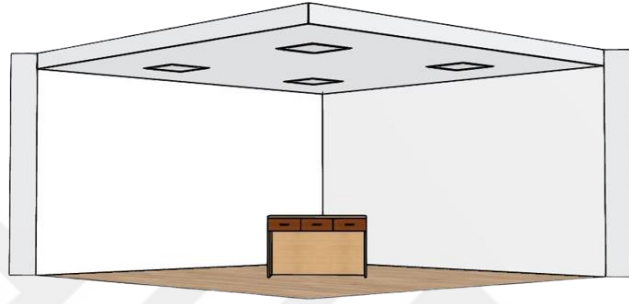


Şekil 3.5. Çoklu kullanıcılar için C-LED seçimi akış şeması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

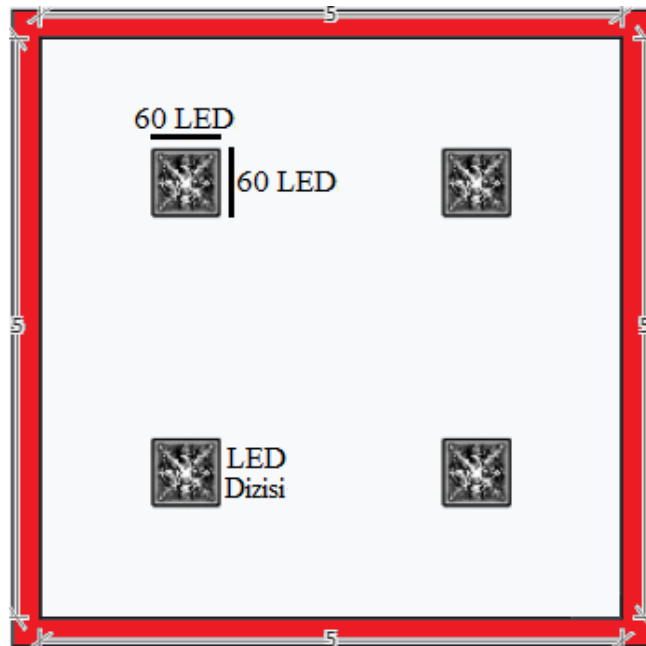
4.1. Tek Kullanıcı için SNR Hesabı

İç mekân Li-Fi sistemi simülasyonu için 60×60 toplam 3.600 LED içeren dört armatür tarafından aydınlatılan bir oda düşünülmüştür. Şekil 4.1’de gösterilen oda modelinde alıcı yerden 0,85m yükseklikte bir masa üzerine konumlandırılmıştır.



Şekil 4.1. Kullanılan oda modeli

LED dizileri 5.0m×5.0m×3.0m boyutlarındaki odanın tavanında Şekil 4.2’de gösterildiği gibi eşit mesafelerde yer almaktadır.



Şekil 4.2. Dizi LED yerleşimleri

Her bir LED armatürü K_{11} , K_{12} , K_{21} , K_{22} matrisleri ile ifade edilmiş ve bu matrisler de bir K matrisi içerisinde tanımlanmıştır. Her bir LED armatür içlerinde 60×60 toplam 3.600 LED bulunur. Alıcı ise bir masa üzerine yerleştirilmiştir. LED armatürlerin merkezleri arasındaki mesafe 2,5 m, armatürlerin merkezi ile duvarlar arasındaki mesafe ise 1,25m'dir. Her bir armatür içerisinde LED'ler 1'er cm aralıklarla bulunmaktadır. Simülasyonlar için Denklem 4.1'de LED'lerin konumlarını gösteren matris verilmiştir.

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{95,95} & \cdots & k_{95,154} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{154,95} & \cdots & k_{154,154} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} k_{95,345} & \cdots & k_{95,404} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{154,345} & \cdots & k_{154,404} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} k_{345,95} & \cdots & k_{345,154} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{404,95} & \cdots & k_{404,154} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} k_{345,345} & \cdots & k_{345,404} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{404,345} & \cdots & k_{404,404} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

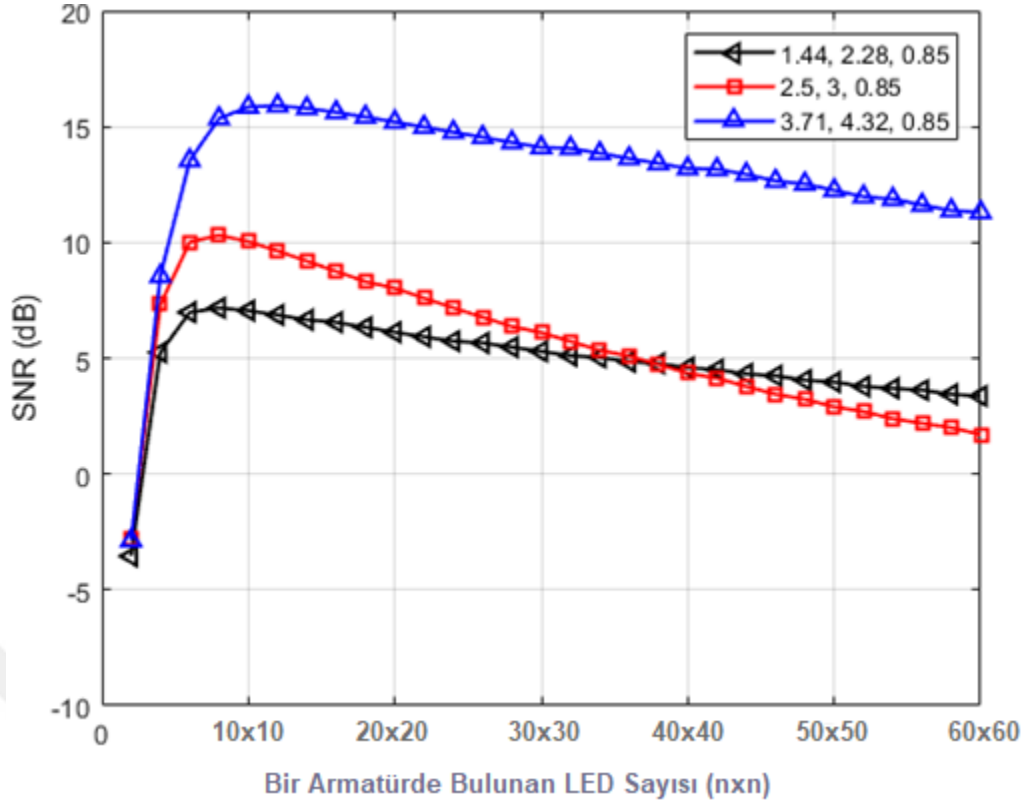
Burada, K_{11} , K_{12} , K_{21} ve K_{22} matrisleri her bir LED armatürün odanın tavanında bulunan konumunu göstermektedir.

OOK modülasyonu kullanılan sistem simülasyonunda, iletişim hızı 500Mbit/s olarak düşünülmüştür. İletişim için $n \times n$ sayıdaki LED'lerin tümü kullanıldığında elde edilen SNR değerleri, $n=2$ 'den $n=60$ 'a kadar, odadaki rasgele 3 farklı noktada bulunan kullanıcılar için hesaplanmıştır. Bu simülasyonlarda, Çizelge 4.1'de verilen sabitler kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Sistem parametreleri

Parameter	Symbol	Value
Her bir LED tarafından iletilen güç	Pt	20 mW
Yarı güçteki yarı aç	$\Phi_{1/2}$	70°
Işık şiddeti	$I_{(0)}$	0,73cd
Bir armatürdeki LED sayısı	-	3.600 (60×60)
LED armatürün boyutu	-	0,59×0,59
LED'ler arasındaki mesafe	-	1 cm
FOV	Ψ_c	60°
Fotodetektör fiziksel alanı	A	1 cm ²
Optik filtre kazancı	T(Ψ)	1
Fotodetektör merceğinin kırılma indisi	n	1,5
Duvarın yansımaya katsayısı	ρ	0,8
Açık döngü kazancı	G	10
Sabit kapasitans	η_c	112 pF/cm ²
FET kanal gürültü faktörü	Γ	1,5
FET geçirgenliği	g_m	30mS
Arka plan akımı	I_{bg}	5.100[μ A]
Gürültü bant genişliği faktörleri	I_2 and I_3	0,562 and 0,0868
Fotodetektör dönüştürme verimliliği	γ	0,53 A/W
Elektron yükü	q	$1,6 \times 10^{-19}$
Boltzmann sabiti	k	$1,380649 \times 10^{-23}$
Mutlak sıcaklık	T_k	273 K
Kırılma indisi	n	1,5
Veri hızı	B	500-750-1.000 Mbit/s

Şekil 4.3'de, konumları (1.44, 2.28, 0.85), (2.5, 3.0, 0.85) ve (3.71, 4.32, 0.85) olan 3 kullanıcı için elde edilen SNR değerleri gösterilmektedir.



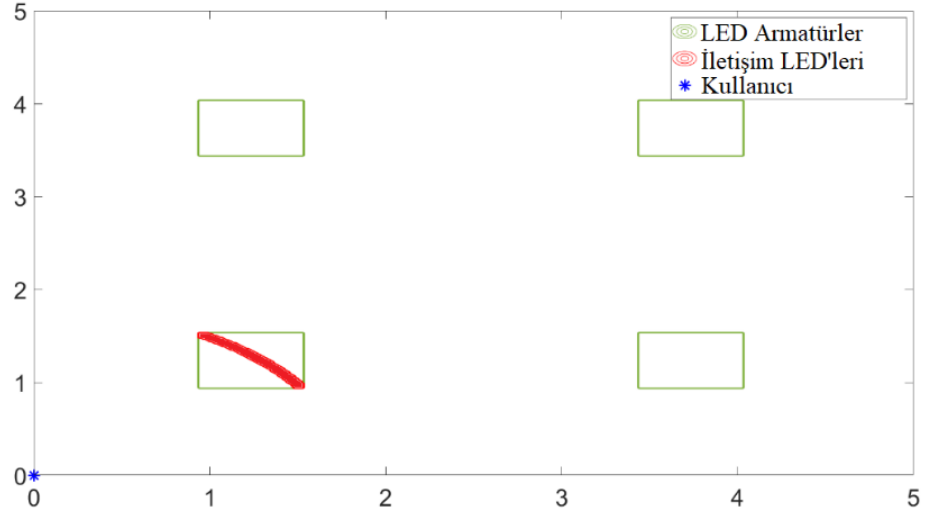
Şekil 4.3. Farklı konumlarda ve farklı sayıdaki iletişim LED'leri için hesaplanan SNR değerleri.

Şekil 4.3'den anlaşılacağı gibi n 10'a eşit oluncaya kadar SNR değeri artmış ve n 'nin daha fazla artırılması ile SNR değerinin azaldığı görülmektedir. LED'lerden alıcıya geç ulaşan ve duvarlardan yansıyan ışığın alıcıda ISI'yı artırması dolayısıyla SNR'ı azaltması sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla haberleşme amacıyla kullanılacak LED sayısı için bir optimum değer söz konusudur. Bu optimum değer yukarıda ele alınan oda ve aydınlatma geometrisi için 10×10 olarak elde edilmiştir.

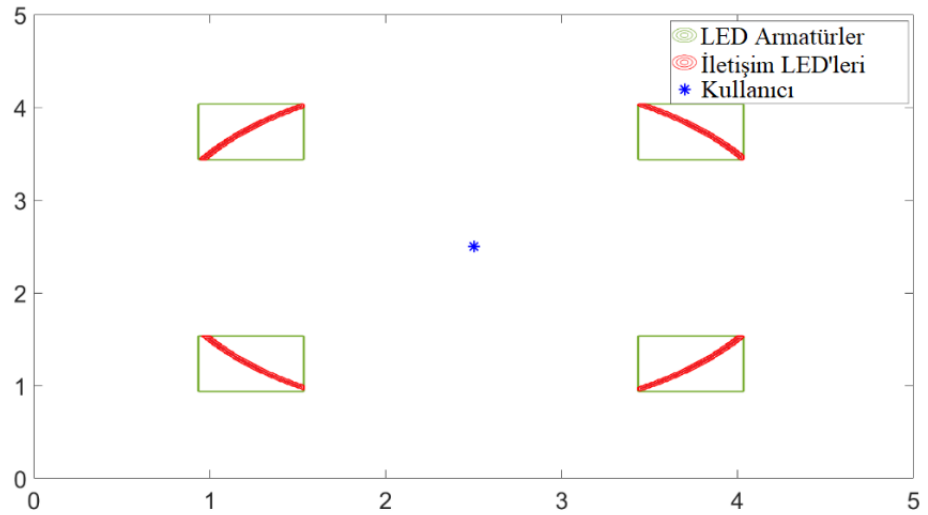
İç mekân VLC sistemlerinde iletişim kalitesinin yanı sıra dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da odada yeterli aydınlatmanın sağlanmasıdır. ISO tarafından, standart bir ofis için aydınlatmanın 300lx - 1.500lx aralığında olması gerektiği belirtilmiştir (Kohne and Nakagawa 2004). LED sayısı yetersiz olduğunda hem yeterli aydınlatma sağlanamayabilir hem de iletişim için gerekli SNR değerini oluşturacak güç elde edilemeyebilir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

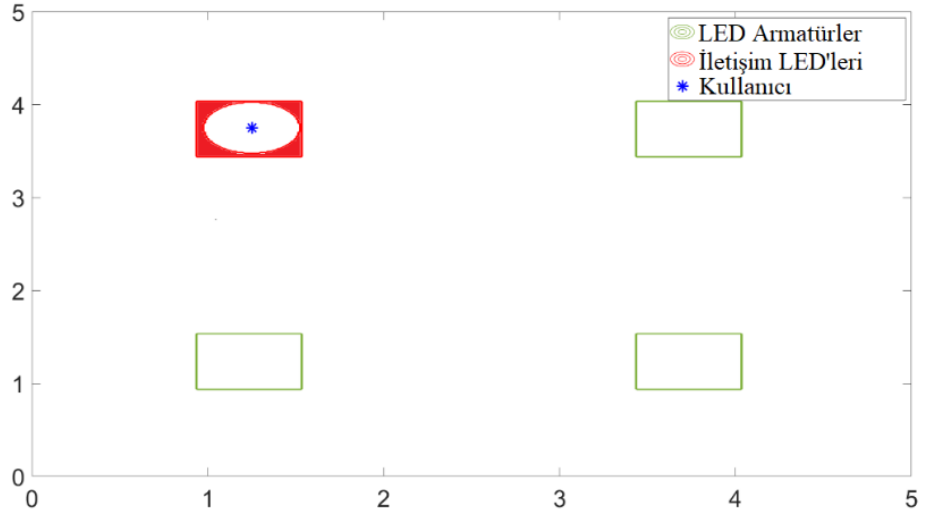
Tek kullanıcının bulunduğu bir Li-Fi sisteminde SNR değerini artırmak için geçerli oran eşliğine dayalı LED seçimi yapılabilir. Çizelge 3.5’de yer alan C-LED seçim algoritması ile kullanıcı için LED ataması yapılarak ISI etkisi azaltılmış ve SNR değeri artırmıştır. Şekil 4.4’de bir kullanıcının üç farklı konumu için elde edilen LED desenleri verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.4. (a) (0, 0, 0.85), (b) (2.5, 2.5, 0.85) (c) (1.25, 3.75, 0.85) koordinatları için seçilen iletişim LED'leri.

Çizelge 4.2'de, Şekil 4.4'deki kullanıcı konumlarına göre seçilen haberleşme LED'lerinin sayıları, elde edilen SNR değerleri ve uygun Th_{VR} değerleri sunulmaktadır. Çizelge 4.2'den sadece haberleşme LED'lerinin sayısının artmasının daha yüksek SNR değerine ulaşmak anlamına gelmediği görülmektedir. Bir kullanıcı için en iyi SNR değeri, kullanıcının konumuna göre optimum sayıda uygun iletişim LED'leri seçilerek elde edilebilir. Ayrıca tüm kullanıcı konumları için elde edilen SNR değerlerinin kesintisiz iletişim için gerekli olan SNR değeri olan 13.6 dB'nin üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2. Kullanıcı konumuna bağlı olarak iletişim LED'lerinin sayısı ve elde edilen SNR değerleri.

Konum	Seçilen LED Sayıları	SNR (dB)	Th_{VR}
0, 0, 0.85	612	23,8987	10
2.5, 2.5, 0.85	1.306	30,7660	20
1.25, 3.75, 0.85	1.239	39,6052	2

4.2.Çoklu Kullanıcılar İçin SNR Hesabı

İç mekân Li-Fi sistemlerinde tüm LED'lerin iletişim için kullanılması durumunda OOK modülasyonu ile birden fazla kullanıcıya hizmet vermek mümkün olmaz. OOK modülasyonunda, LED "1" bilgisini gönderirken yanar ve "0" bilgisini gönderirken söner. Bu nedenle, bir LED aynı anda birden fazla kullanıcıya hizmet veremez. Bu çalışmada, birden çok kullanıcı için uygun LED seçiminin gerçekleştirilmesinde TLBO algoritması kullanılmıştır.

Birden fazla kullanıcı olması durumunda önemli olan bir konu da öncelik atamasıdır. Bir LED, birden fazla kullanıcı tarafından seçilmek istenebilir. LED atamasının yanlış yapılması durumunda diğer kullanıcılar için SNR değeri düşer. Örneğin, armatür etrafında bulunan iki kullanıcıdan armatüre yakın olan kullanıcıya öncelik tanınırsa, bu kullanıcı kendisine en kısa mesafede bulunan LED'leri seçer ve LED'ler bu kullanıcıya atanır. Aynı bölgede bulunan armatüre daha uzak olan diğer kullanıcı için LED seçimi yapılmak istenirse diğer kullanıcıya atanan LED'ler haricince kendisine en yakın LED'ler seçilir. Ancak, bu durumda LED'ler ikinci kullanıcıda düşük SNR değeri oluşturabilir.

Bu çalışma için hazırlanan algorithmada, aynı armatürden C-LED'i seçen kullanıcılar arasından en uzaktaki kullanıcıya öncelik verilir. Kullanıcının konumuna bakılarak $T_{post}/T_{nega} > Th_{VR}$ durumunu sağlayan LED'ler seçilir ve daha sonra TLBO algoritması uygulanır.

TLBO algoritması uygulandıktan sonra en yüksek SNR değerine sahip C-LED modeli seçilir. Öncelikli bir kullanıcının kullandığı LED'ler çıkarıldıktan sonra mesafeye göre yeni bir seçim yapılır. Uygulanan TLBO algoritması Çizelge 4.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. TLBO algoritması

Veri girişi

Sabit değerlerin, iç mekân Li-Fi sisteminin, LED konumlarını ve kullanıcı konumlarının tanımlanması ve değişkenlerin alt ve üst limitlerinin belirlenmesi.

CL matrisi ve $f(x)$ vektörünün oluşturulması

Rassal olarak seçilen LED'ler ile popülasyon sayısı kadar çözüm matrisinin oluşturulması.

Her çözüm matrisi için SNR değerinin hesaplanması ve amaç vektöründe saklanması.

for t=1: iterasyon sayısı

Yeni çözüm matrisinin oluşturulması**(Öğretmen fazı)**

En iyi amaç fonksiyonuna ait tasarım değişkenini (SNR değeri) belirle ve öğretmen olarak ata.

for j=1:N_{popülasyon}

Öğretme faktörünü hesapla (Denklem (3.20)).

Yeni tasarım değişkenlerini oluştur (Denklem (3.19)) ve yeni çözüm vektörünü üretin.

Yeni çözüm vektörü ile amaç fonksiyonu hesapla ve amaç fonksiyon vektörüne kaydet.

if $X_{yeni,j} > X_{eski,j}$

$X_{eski} = X_{yeni}$

end

end

(Öğrenci fazı)

for j=1:N_{popülasyon}

Çözüm vektörlerinden rassal olarak iki tane seçin.

Yeni tasarım değişkenlerini (Denklem (3.21)) oluştur ve yeni çözüm vektörünü oluştur.

Yeni çözüm vektörü ile amaç fonksiyonu hesapla ve amaç fonksiyon vektörüne kaydet.

if $X_{yeni,j} > X_{eski,j}$

$X_{eski} = X_{yeni}$

end

end

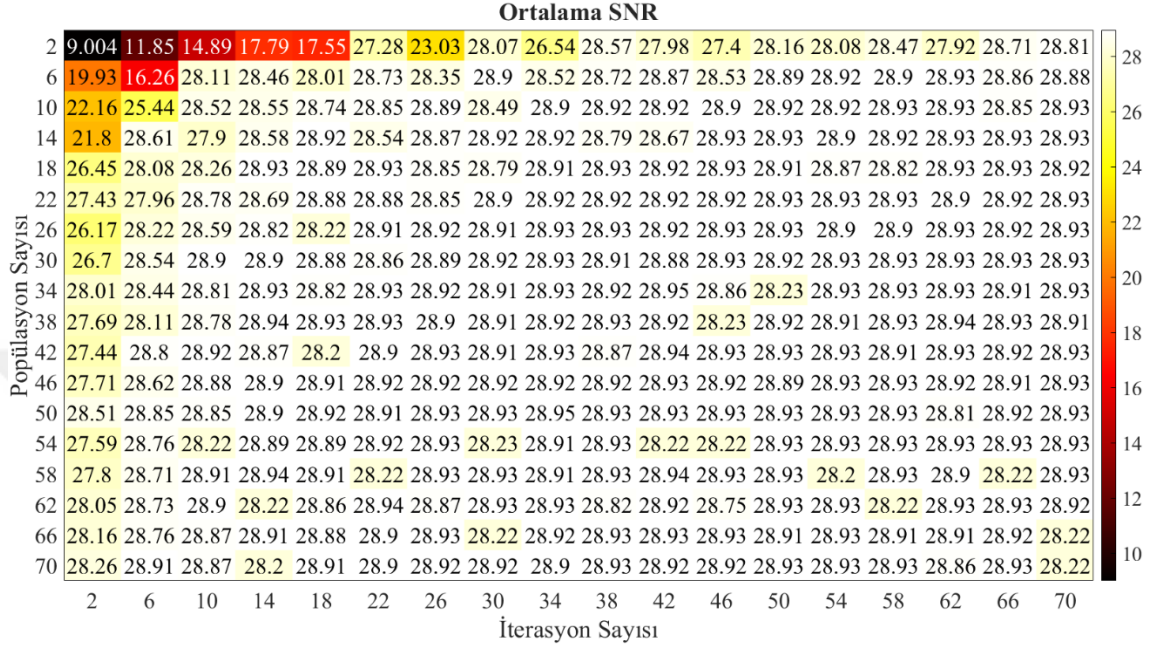
end

En yüksek SNR değerine sahip LED desenini kullanıcıya ata.

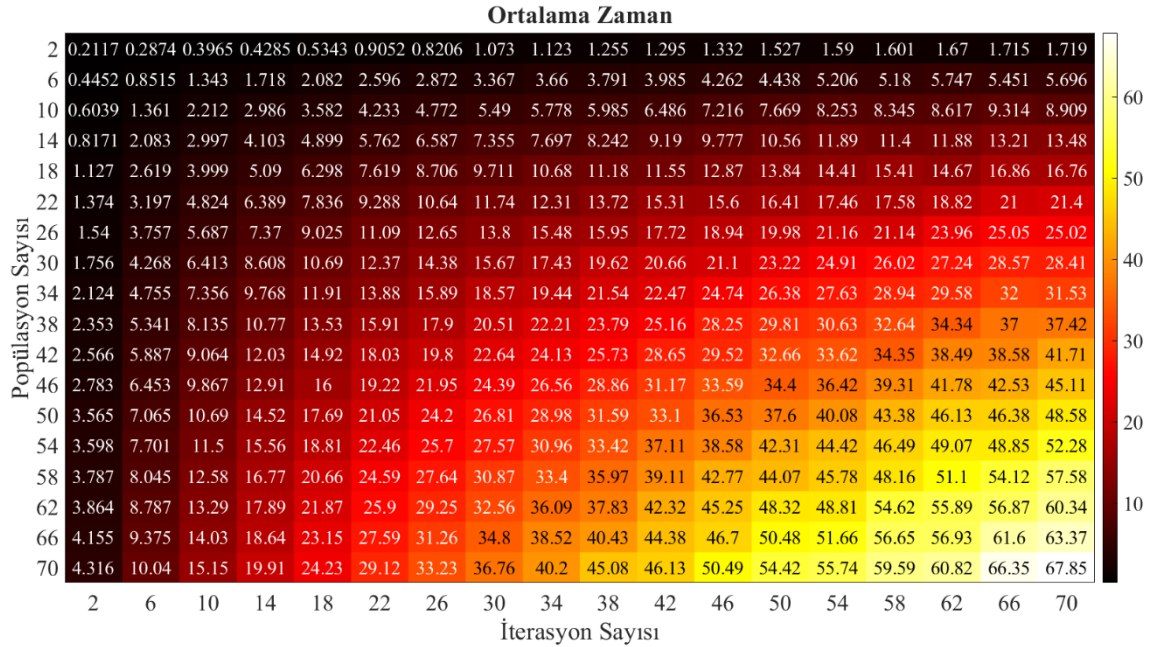
Oda içerisinde farklı konumlarda bulunan on kullanıcı için yapılan simülasyonda uygun iterasyon ve popülasyon sayısının belirlenmesinde ortalama SNR ve C-LED seçim süresi kullanılmıştır. İterasyon ve popülasyon sayıları 2'den başlayarak 2'şer 2'şer 70'e kadar artırılmış ve on kullanıcının ortalama SNR değeri ve C-LED seçim süresi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde düşük iterasyon ve popülasyon değeri ile yüksek SNR değeri ve kısa C-LED seçim süresi elde edilebildiği görülmüştür. Şekil

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.5’de $Th_{VR}=1$ ve 500 Mbit/s veri hızı için elde edilen ortalama SNR ve zaman değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.5’den iterasyon sayısının 22, popülasyon sayısının ise 18 olarak seçilmesinin uygun olduğu görülmektedir.



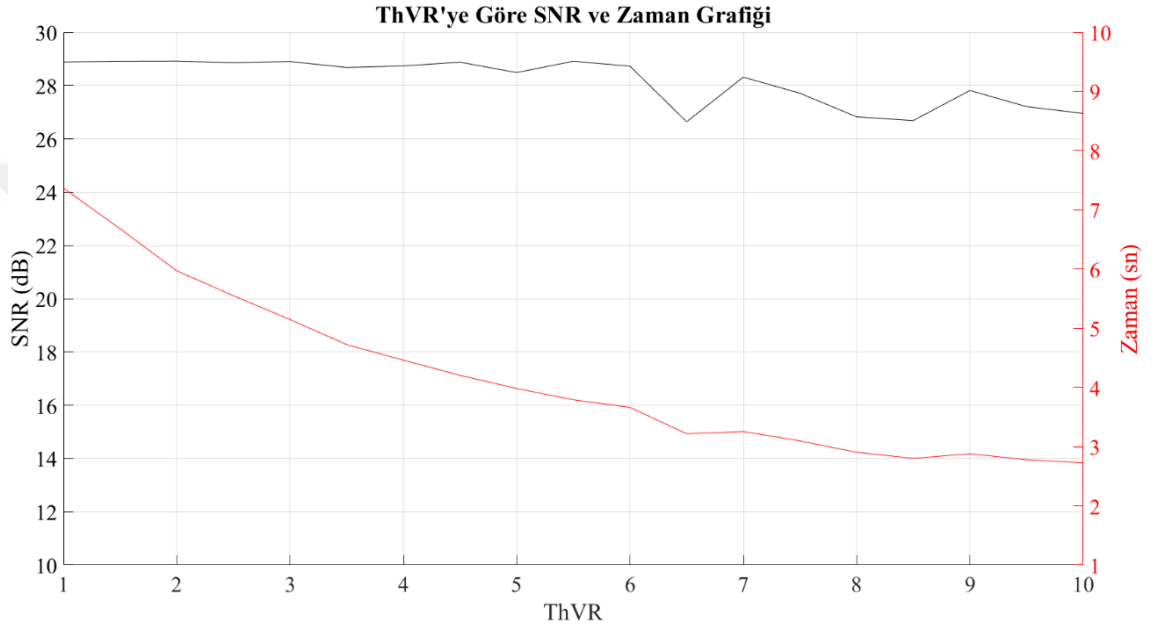
(a)



(b)

Şekil 4.5. 500Mbit/s veri hızı için (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn).

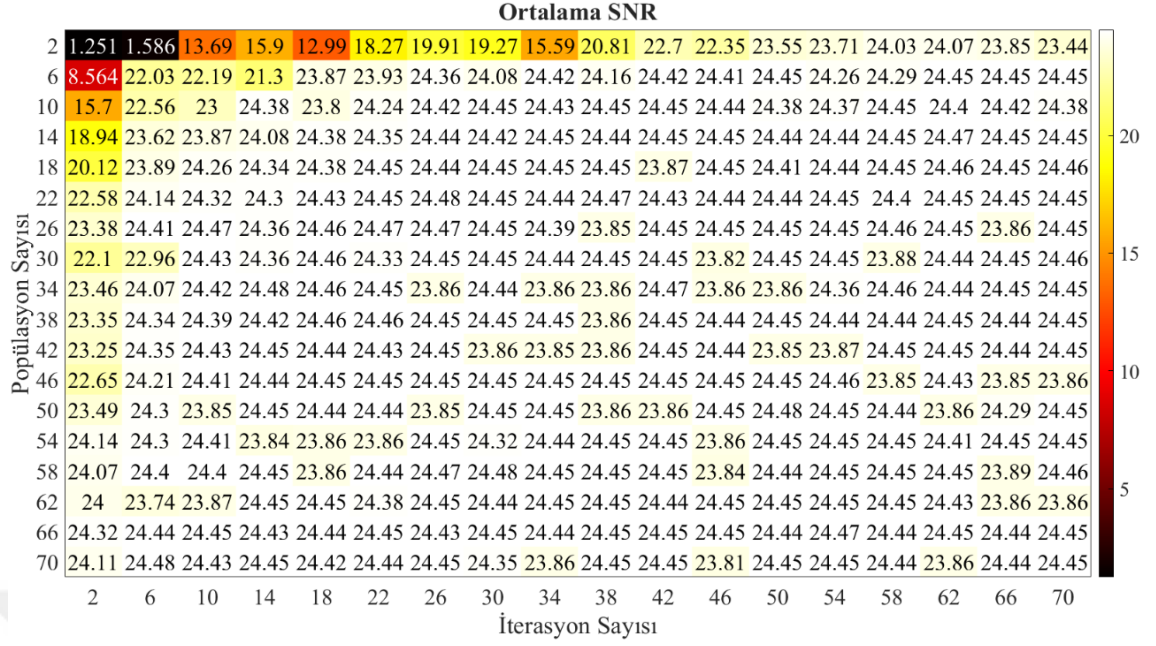
Uygun iterasyon ve popülasyon değeri belirlendikten sonra C-LED seçim hızını artırmak için uygun Th_{VR} seçimi yapılmıştır. Şekil 4.6'da Th_{VR} 'ye bağlı olarak SNR ve C-LED'lerin seçilmesi için harcanan sürenin değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.6'dan Th_{VR} değerinin 5.5 olması durumunda yüksek SNR elde edilebileceği ve C-LED seçimi için geçen sürenin düşük olacağı görülmektedir. Bu nedenle simülasyonlarda Th_{VR} değeri 5.5 olarak seçilmiştir.



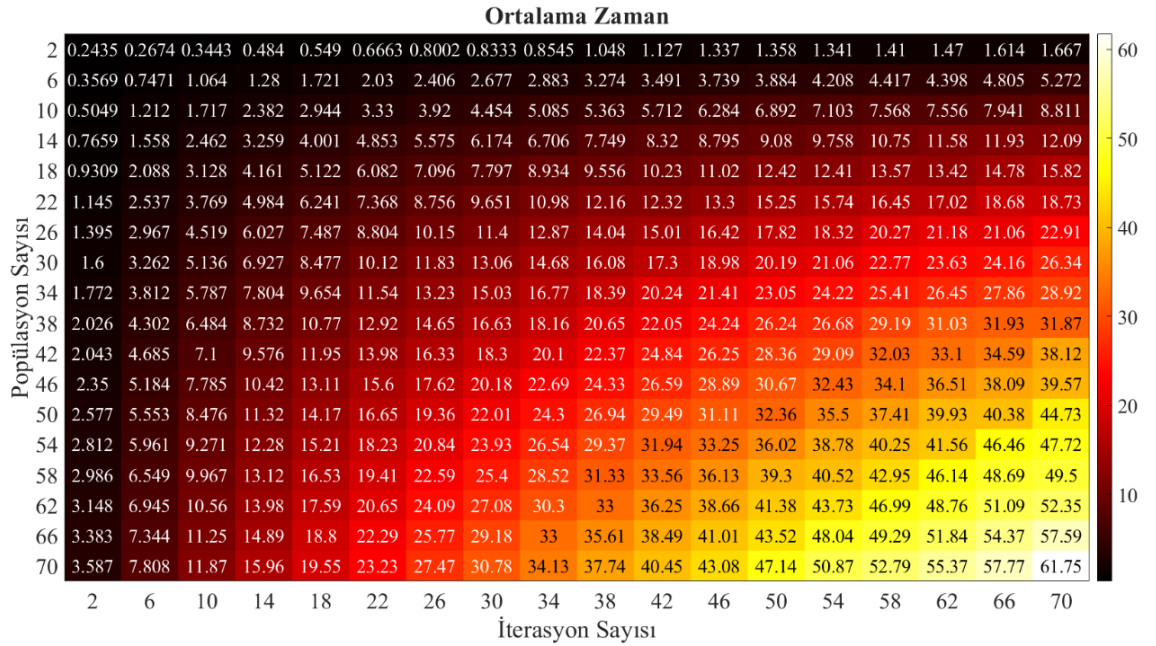
Şekil 4.6. Th_{VR} 'ye göre SNR ve zaman grafiği

Şekil 4.7'de $Th_{VR}=1$ ve 750 Mbit/s veri hızı için elde edilen ortalama SNR ve C-LED seçim süresi gösterilmektedir. Şekil 4.7'den iterasyon sayısının 18, popülasyon sayısının ise 26 olarak seçilmesinin uygun olduğu görülmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



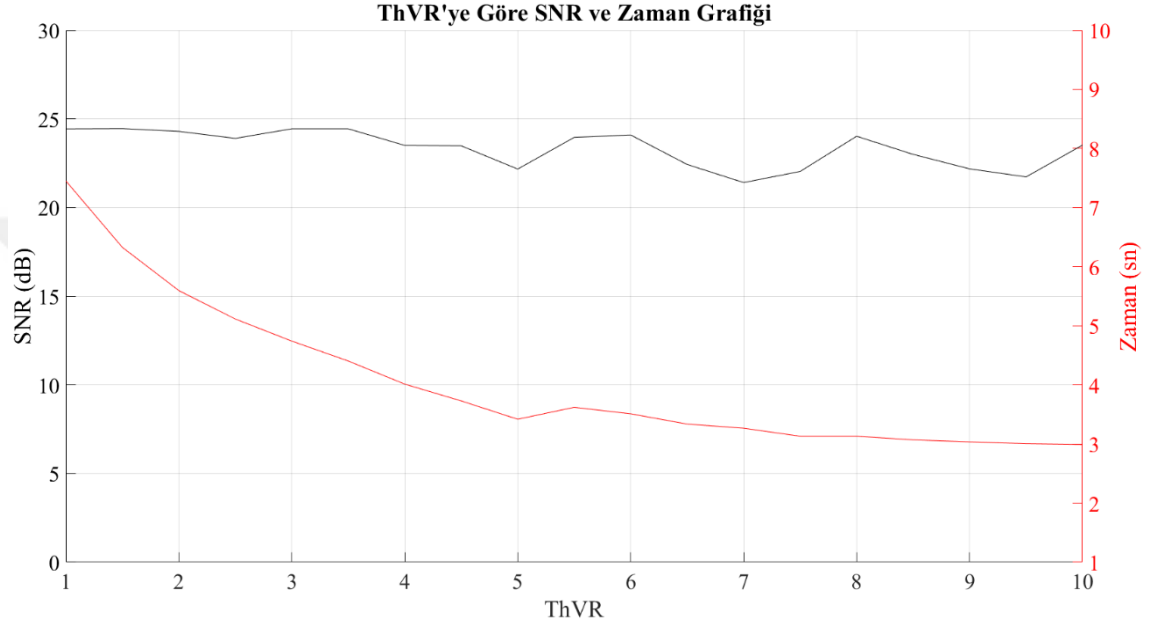
(a)



(b)

Şekil 4.7. 750Mbit/s veri hızı için (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn).

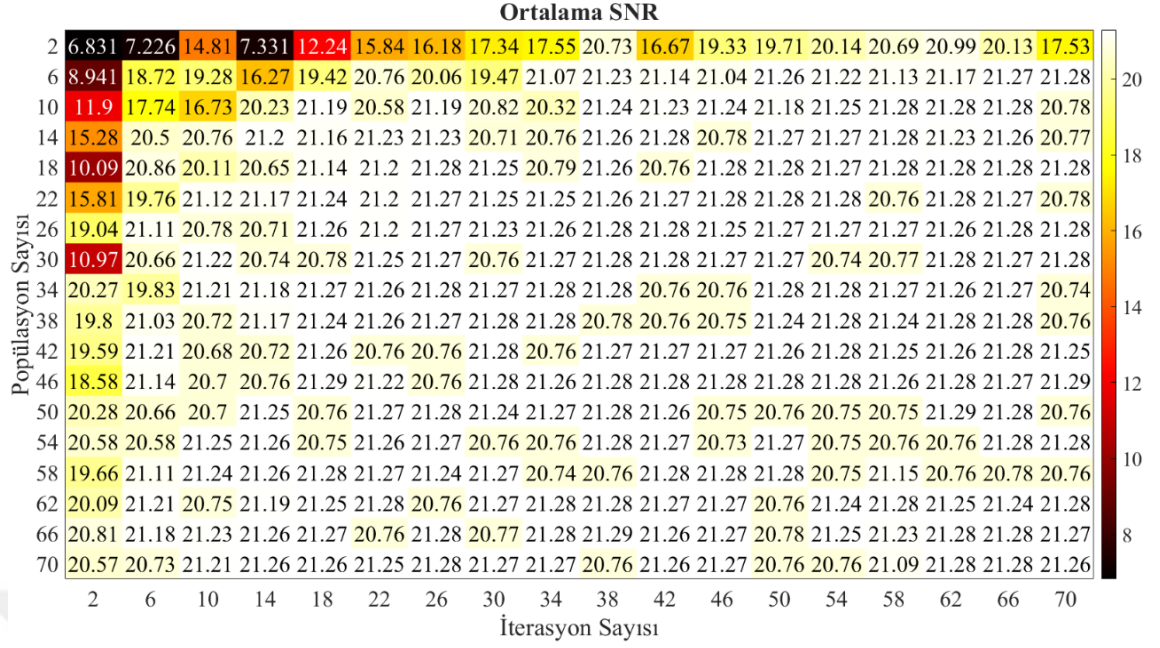
Uygun iterasyon ve popülasyon değeri belirlendikten sonra C-LED seçim hızını artırmak için Th_{VR} seçimi yapılmıştır. Şekil 4.8’de Th_{VR} ’ye bağlı olarak SNR ve C-LED’lerin seçilmesi için harcanan sürenin grafiği verilmiştir. Şekil 4.8’de Th_{VR} ’nin 3.5 olması durumunda SNR değerinin yüksek C-LED seçimi için geçen sürenin ise düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle simülasyonlarda Th_{VR} 3.5 olarak seçilmiştir.



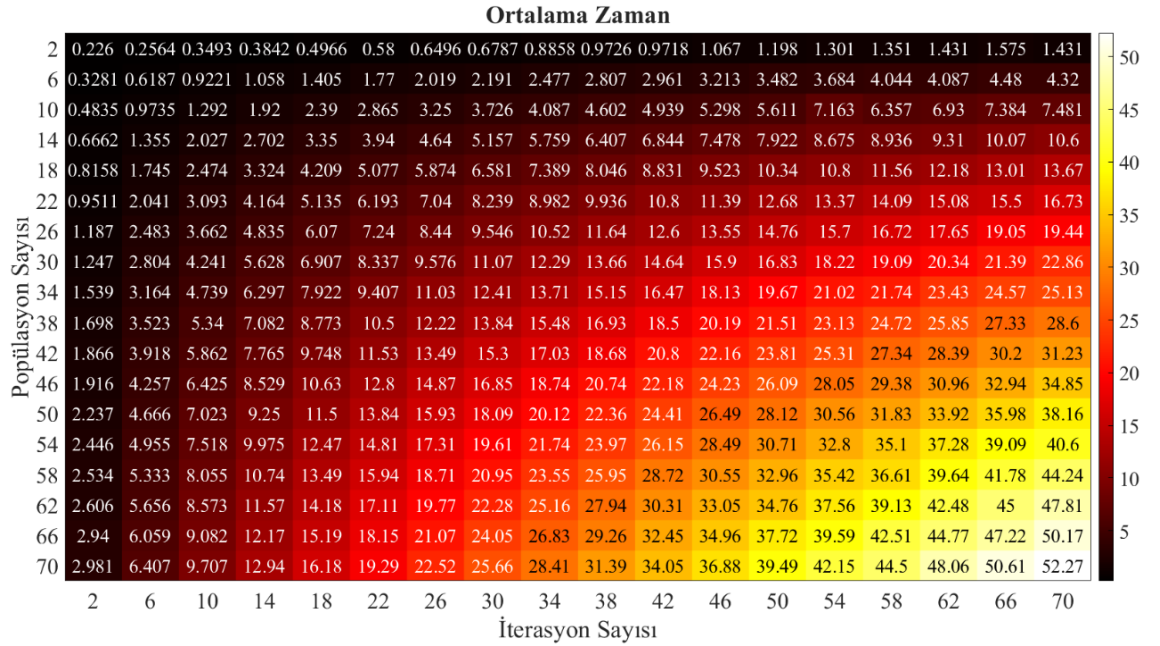
Şekil 4.8. Th_{VR} ’ye göre SNR ve zaman grafiği

Şekil 4.9’da $Th_{VR}=1$ ve 1 Gbit/s veri hızı için elde edilen ortalama SNR ve C-LED seçim süresi gösterilmektedir. Şekil 4.9’dan iterasyon sayısının 18, popülasyon sayısının ise 26 olarak seçilmesinin uygun olduğu görülmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



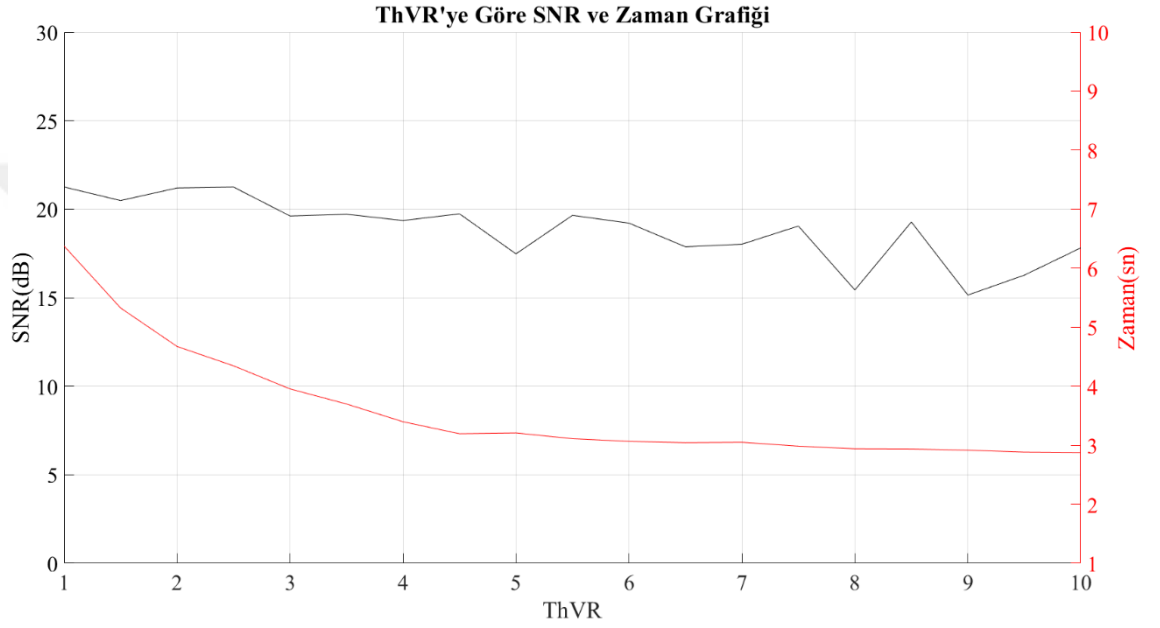
(a)



(b)

Şekil 4.9. 1Gbit/s veri hızı için (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn).

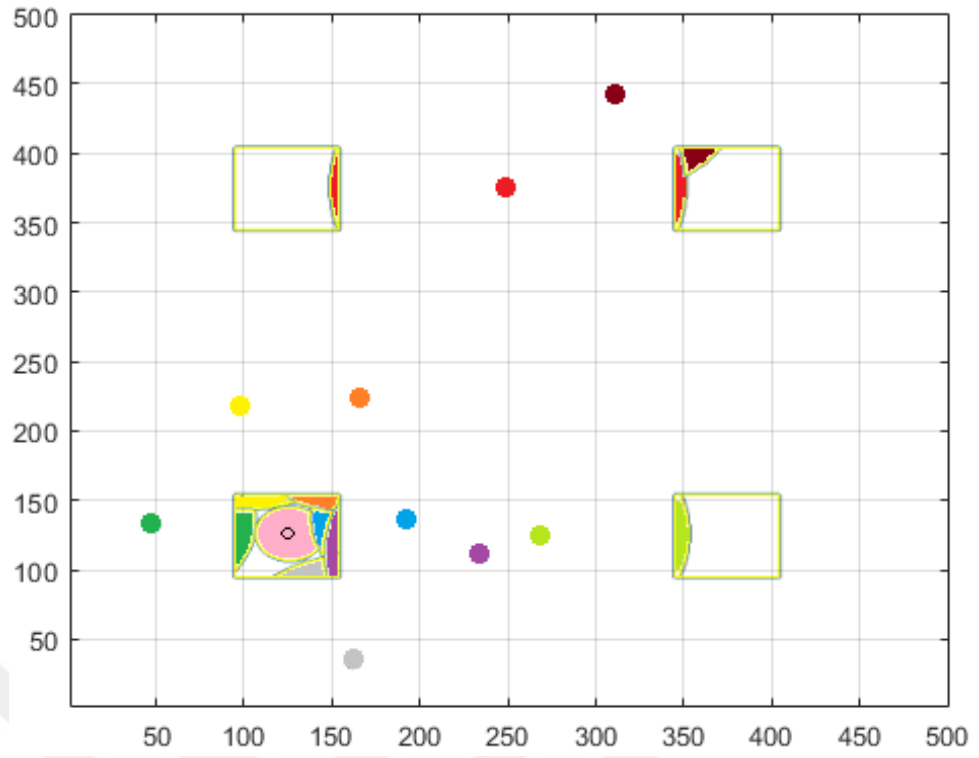
Uygun iterasyon ve popülasyon değeri belirlendikten sonra C-LED seçim hızını artırmak için Th_{VR} seçimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10'da Th_{VR} 'ye bağlı olarak SNR ve C-LED'lerin seçilmesi için harcanan sürenin grafiği gösterilmektedir. Şekil 4.10'da Th_{VR} değerinin 2.5 olması durumunda SNR değerinin yüksek ve C-LED seçimi için geçen sürenin düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle simülasyonlarda Th_{VR} 2.5 olarak seçilmiştir.



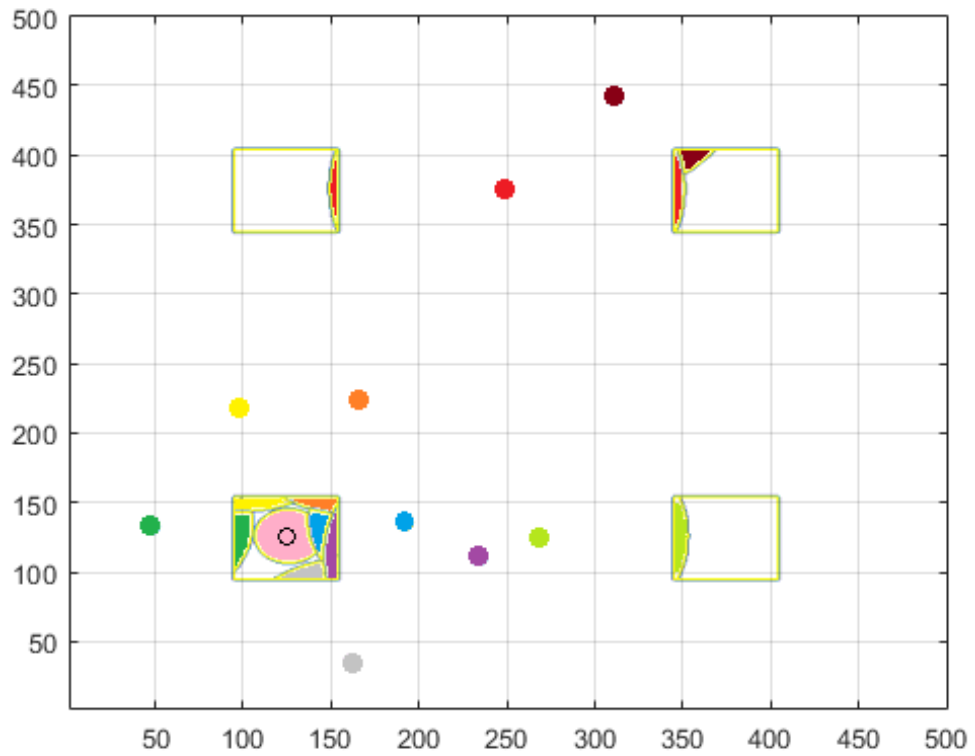
Şekil 4.10. Th_{VR} 'ye göre SNR ve zaman grafiği

Şekil 3.5'de belirtilen adımlar takip edilerek C-LED seçim işlemi gerçekleştirilmiştir. 1 Gbit/s, 750Mbit/s ve 500Mbit/s veri hızları için yapılan simülasyonda farklı C-LED'lerin seçildiği görülmektedir.

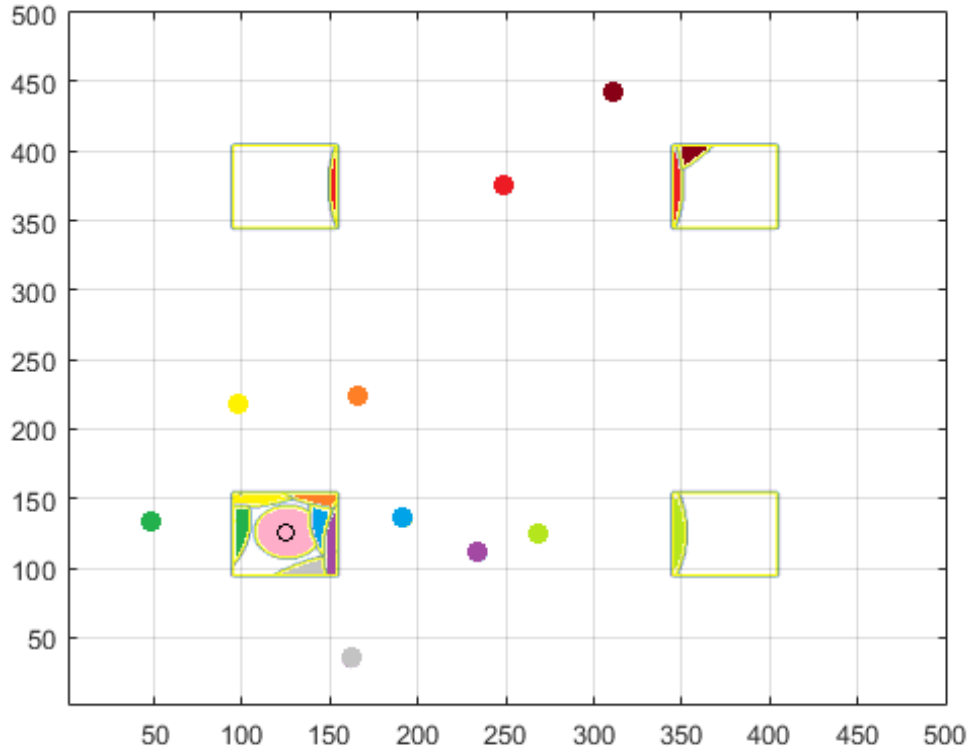
Şekil 4.11 (a), (b), (c)'de sırasıyla 1Gbit/s, 750Mbit/s ve 500Mbit/s'lik farklı veri hızlarında seçilen C-LED'leri göstermektedir. Noktalar, kullanıcıların konumlarını belirtir ve kullanıcılar için atanan C-LED'ler kullanıcılar için belirtilen renk ile aynı renklerle ifade edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.11. (a) (1Gbit/s), (b) (750Mbit/s) (c) (500Mbit/s) veri hızları için seçilen LED'ler

Şekil 4.11'den, veri hızının C-LED deseni üzerinde fazla bir etkisi olmadığını göstermektedir. TLBO algoritması kullanılarak C-LED seçimi ile hem çok kullanıcılı bir sisteme geçilir hem de iletişim hızının artmasıyla birlikte kaliteli ve kesintisiz bir iletişim sağlanmış olur. Ayrıca kullanıcı önceliği algoritmasının düzgün çalıştığı görülmüştür. Beklendiği gibi, artan veri hızları ile SNR değerleri azalmaktadır.

Farklı veri hızları için elde edilen SNR sonuçları ve kullanıcı konumları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi veri hızı arttıkça SNR azalmaktadır ancak tüm durumlarda SNR değeri 13.6 dB'nin üstündedir ve 1Gbit/s'a kadar kesintisiz iletişim elde edilmektedir.

Çizelge 4.4. TLBO algoritması ile optimize edilmiş SNR sonuçları

Veri Hızı	Konum	SNR (dB)
500Mbit/s ($Th_{VR}=5.5$)	2.34, 1.11, 0.85	28,2702
	1.66, 2.24, 0.85	24,6617
	0.98, 2.18, 0.85	27,2425
	1.62, 0.35, 0.85	24,9170
	1.92, 1.36, 0.85	27,7923
	0.48, 1.33, 0.85	30,1363
	2.68, 1.25, 0.85	29,2433
	2.49, 3.75, 0.85	30,1498
	3.11, 4.42, 0.85	24,0217
	1.25, 1.25, 0.85	42,6861
750Mbit/s ($Th_{VR}=3.5$)	2.34, 1.11, 0.85	23,9247
	1.66, 2.24, 0.85	20,2597
	0.98, 2.18, 0.85	22,8429
	1.62, 0.35, 0.85	20,4737
	1.92, 1.36, 0.85	22,9300
	0.48, 1.33, 0.85	25,6896
	2.68, 1.25, 0.85	24,9110
	2.49, 3.75, 0.85	25,8491
	3.11, 4.42, 0.85	19,5302
	1.25, 1.25, 0.85	37,9987
1 Gbit/s ($Th_{VR}=2.5$)	2.34, 1.11, 0.85	20,7446
	1.66, 2.24, 0.85	16,9989
	0.98, 2.18, 0.85	19,5998
	1.62, 0.35, 0.85	17,2049
	1.92, 1.36, 0.85	20,0395
	0.48, 1.33, 0.85	22,4985
	2.68, 1.25, 0.85	21,7683
	2.49, 3.75, 0.85	22,7495
	3.11, 4.42, 0.85	16,0229
	1.25, 1.25, 0.85	34,8856

Oda içerisinde tek kullanıcının bulunduğu Th_{VR} değerine bağlı C-LED seçim algoritması ile TLBO algoritmasının karşılaştırılmasında Çizelge 3.5’de belirtilen konumlarda bulunan kullanıcılar için TLBO algoritması kullanılarak C-LED seçimi yapılmış ve SNR değerleri hesaplanmıştır. TLBO algoritması kullanılarak tek kullanıcı için yapılan simülasyonlarda haberleşme hızı 500Mbit/s, iterasyon sayısı 22 ve

popülasyon sayısı ise 18 alınmıştır. Çizelge 4.5’de her iki metotla elde edilen SNR değerleri karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir.

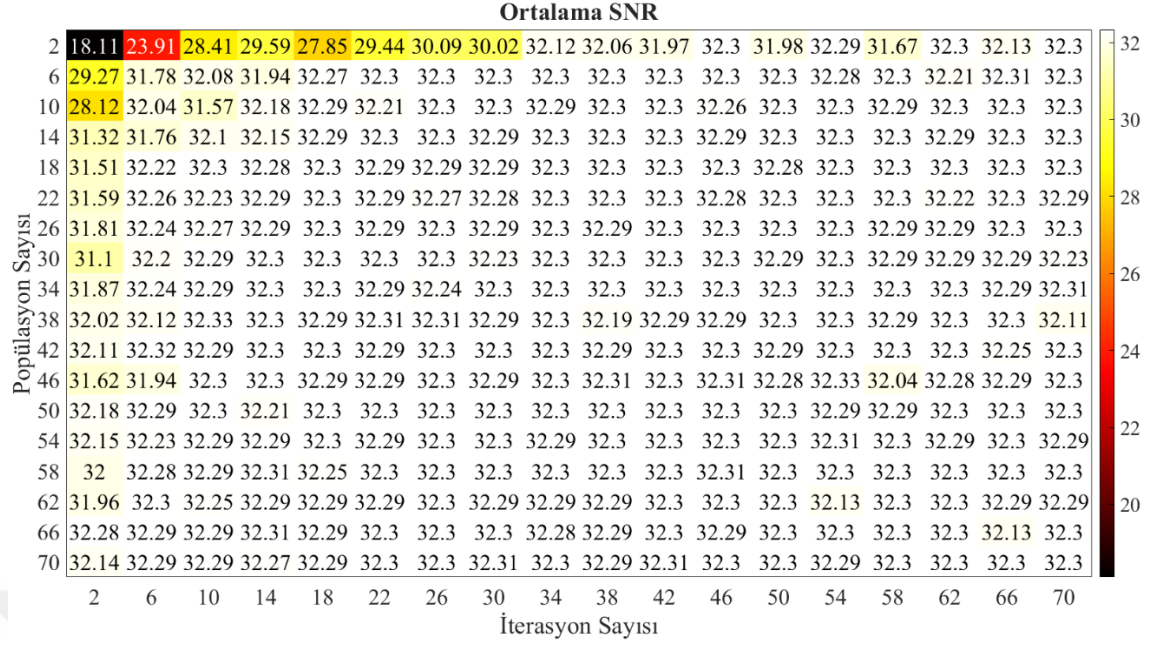
Çizelge 4.5. Tek kullanıcı için TLBO ve Th_{VR} ’ye bağlı C-LED seçim algoritmalarının karşılaştırması.

Konum	TLBO Algoritması İle Elde Edilen SNR	Th_{VR} ’ye Bağlı C-LED Seçim Algoritması İle Elde Edilen SNR
0, 0, 0.85	18,058	23,8987
2.5, 2.5, 0.85	21,284	30,7660
1.25, 3.75, 0.85	42,771	39,6052

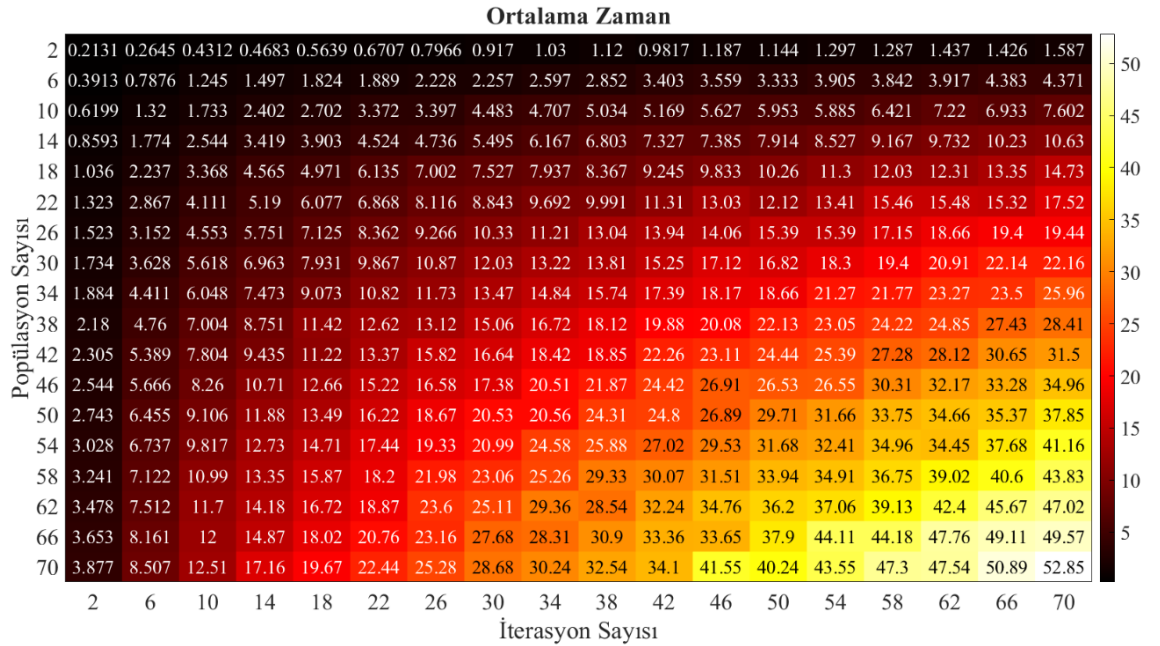
Çizelge 4.5’den ilk iki kullanıcı konumunda Th_{VR} değerine bağlı C-LED seçim algoritması ile daha iyi SNR değerlerinin elde edildiği ve armatürün tam altında bulunan kullanıcı için TLBO algoritmasıyla daha iyi bir SNR değeri elde görülmektedir. Bazı kullanıcı konumları için önerilen Th_{VR} değerine bağlı C-LED seçim algoritması daha iyi sonuçlar verse de çok kullanıcıli durumlarda bu algoritmanın önerilen hali ile kullanılamaması TLBO algoritmasına ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

Önerilen TLBO algoritmasının literatürdeki diğer algoritmalarla karşılaştırılması için Ren et al. (2021) tarafından bildirilen sonuçlar dikkate alınmıştır. Ren et al. (2021), tarafından yapılan çalışmada düşünülen oda ile aynı boyutlarda bir oda ve oda içerisinde 50×50 LED bulunan 4 armatür düzenini dikkate almıştır. Odada farklı konumlarda yer alan kullanıcıların 200Mbit/s veri hızında haberleşmesinde C-LED seçiminin Genetik algoritma, Geliştirilmiş Genetik Algoritma ve Hiper Sezgisel Algoritma optimizasyon yöntemleri ile yapılması durumunda elde edilen en yüksek SNR değerleri sunulmuştur. Bu çalışmada önerilen TLBO algoritmasının uygulanabilmesi için gerekli iterasyon ve popülasyon sayılarının bulunmasında Şekil 4.12’de yer alan ortalama SNR ve ortalama C-LED seçim süresi verilerinden yararlanılmış ve 200Mb/s haberleşme hızında uygun iterasyon ve popülasyon sayısı 18 olarak seçilmiştir. Karşılaştırma için TLBO algoritması uygulanırken her birinin içerisinde 50×50 LED bulunan 4 armatür düzenini düşünülmüştür.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



(a)

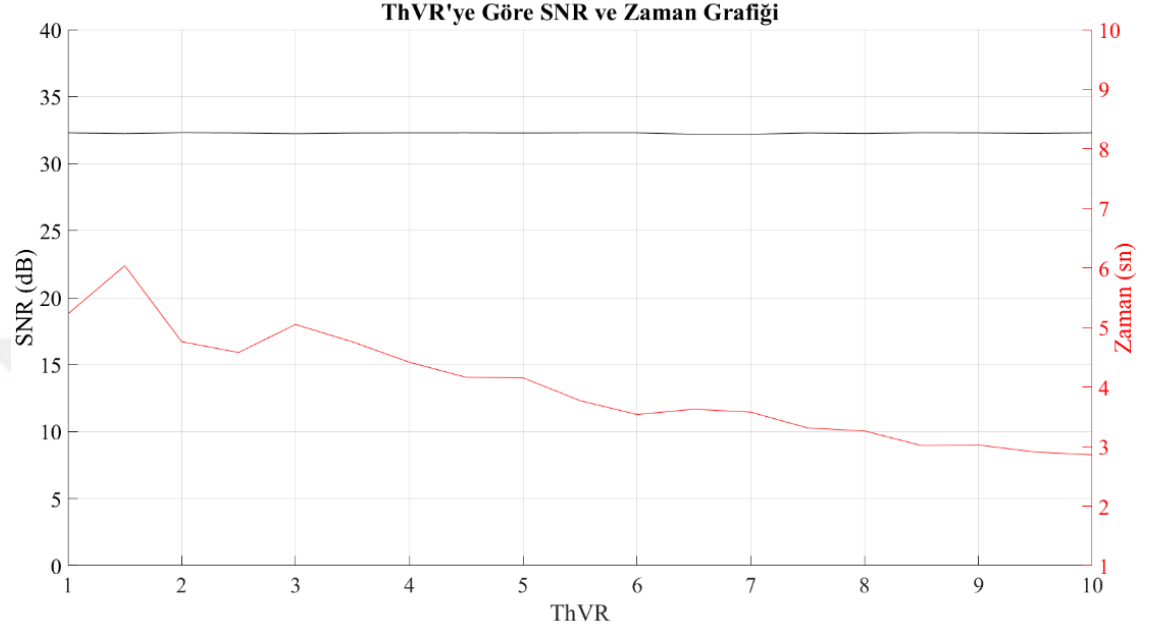


(b)

Şekil 4.12. (a) Ortalama SNR, (b) Programın ortalama çalışma süresi (sn)

Uygun iterasyon ve popülasyon değeri belirlendikten sonra C-LED seçim hızını artırmak için Th_{VR} seçimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13’de Th_{VR} ’ye bağlı olarak SNR ve

C-LED'lerin seçilmesi için harcanan sürenin grafiği gösterilmektedir. Şekil 4.13'de Th_{VR} değerinin artması ile SNR değerinde çok fazla değişiklik olmadığı görülmektedir. Bu nedenle simülasyonlarda Th_{VR} 10 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.13. Th_{VR} 'ye göre SNR ve zaman grafiği

Uygun iterasyon sayısı, popülasyon sayısı ve Th_{VR} değeri belirlendikten sonra Ren et al. (2018)'nin çalışmasında belirtilen her bir kullanıcı konumu için SNR değeri önerilen TLBO algoritması kullanılarak hesaplanmış ve çalışmada belirtilen değerlerle birlikte Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. TLBO algoritması ile diğer algoritmaların karşılaştırılması

Konum	TLBO	Genel GA	Geliştirilmiş GA	Hiper Sezgisel
2.31, 2.06, 0.85	29,1326	22,60	22,94	21,97
1.44, 2.28, 0.85	33,6551	21,34	25,55	22,17
1.08, 2.25, 0.85	32,0583	23,39	23,58	23,13
1.65, 0.53, 0.85	34,4843	22,58	23,07	22,68
4.11, 0.05, 0.85	32,1642	23	23,02	22,72

Çizelge 4.6'dan önerilen TLBO algoritması ile diğer yöntemlere nazaran daha yüksek SNR değeri elde edilebildiği görölmektedir. Haberleşme hızının artması ile SNR değerinin azalması bekleneceği için diğer optimizasyon yöntemlerinin yüksek veri hızlarında iyi bir performans sağlayamayacağı görölebilir. Ancak önerilen TLBO algoritması ile 1Gbit/s veri hızında dahi kesintisiz ve kaliteli iletişim elde edilebilmiştir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bir iç mekân Li-Fi sisteminin birden fazla kullanıcıya yüksek hızlı, kaliteli ve kesintisiz iletişim imkânı sağlaması amaçlanmıştır. Bu nedenle yüksek güçlü LED'lerin kullanıldığı boş bir oda içerisinde Li-Fi sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin analizleri aydınlatma, sinyal gücü ve ISI etkisi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Analizler MATLAB R2022a programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Oda içerisinde bulunan her noktada benzer kalitede iletişim sağlamak için odanın tavanına eşit mesafelerde dizi LED'lerden oluşan dört adet armatür yerleştirilmiştir. Odanın boyutları, kullanıcı ve LED konumuna bağlı olarak optik DC kazanç hesabı yapılmıştır. Bununla birlikte LED'lerden iletilen optik darbeler için kanal dürtü yanıtı hesaplanmıştır.

Tek kullanıcının bulunduğu Li-Fi sisteminde tüm LED'ler haberleşme amacıyla kullanılmış ve sistem analizleri ISI etkisi göz önüne alınarak 500Mbit/s veri hızında gerçekleştirilmiştir. Tüm LED'lerin iletişim için kullanılması durumunda üç kullanıcı konumu için 3,3644dB, 1,70601dB ve 11,2961dB değerleri elde edilmiştir. Geçerli oran eşliğine dayalı LED seçim algoritması uygulandıktan sonra oda içerisinde kullanıcıların köşede, oda merkezinde ve bir armatürün tam altında olması durumunda sırasıyla 23,8987dB, 30,7660dB ve 396052dB değerinde SNR elde edilmiştir. Buna göre kaliteli bir iletişim gerçekleştirmek için gerekli olan 13,6dB üzerine çıkıldığı gözlemlenmiştir.

C-LED seçimi yapıldıktan sonra sistem gereksinimlerini sağlamak amacıyla diğer LED'ler aydınlatma için kullanılmaya devam eder. Literatürde bu çalışmada kullandığımız geometriyi kullanan çalışmalar incelendiğinde, ISO standartlarına uygun aydınlatma sağlanabilirliği görülmüştür. Optimum sayıda C-LED seçilerek SNR değeri 20dB üzerinde artırılmıştır. ISI etkisini oluşturan yansımalar için duvardan kaynaklanan birinci yansımalar sistem analizine dahil edilmiştir. Hesaplamaların karmaşıklığını gidermek için oda içerisine sade alıcı yerleştirilmiştir.

Literatür incelemesi sonucunda çok kullanıcılı Li-Fi sistemleri için farklı metasezgisel optimizasyon yöntemleri kullanıldığı görülmüştür. Ancak TLBO algoritmasına dayalı C-LED seçimi üzerine çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Çok kullanıcılı Li-Fi sistemleri için yapılan analizlerde ise oda içerisinde bulunan kullanıcıların konumlarına bağlı olarak öncelik atama mekanizması kullanılmıştır. Oda eşit olarak dört parçaya ayrıldığı düşünülürse bir armatür etrafında bulunan kullanıcılar içinde en uzak olan kullanıcıya öncelik tanınır. Daha sonra aynı armatüre uzak diğer kullanıcıya öncelik tanınır. Bu sayede kullanıcılar için yararlı olan C-LED'lerin daha iyi bir şekilde seçilmesi sağlanmıştır. Rastgele konumlarda yer alan on kullanıcı için TLBO algoritmasına dayalı C-LED seçimi 500Mbit/s, 750Mbit/s ve 1Gbit/s veri hızlarında gerçekleştirilmiştir. Her bir veri hızı için optimum iterasyon, popülasyon sayısı ve T_{thr} değerleri belirlenmiş ve C-LED seçim süresi düşürülmüş ve yüksek SNR değerleri elde edilebilmiştir.

Oda içerisinde tek kullanıcının bulunduğu durum için yapılan analizde kullanılan geçerli oran eşiğine dayalı C-LED seçimi ile hesaplanan maksimum SNR değerinin bazı konumlarda, TLBO algoritması kullanılarak hesaplanan maksimum SNR değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, C-LED seçimi için bu çalışmada önerilen TLBO algoritmasının, literatürde bulunan diğer metasezgisel yöntemler ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Önerilen TLBO algoritması ve LED armatür düzeni ile farklı kullanıcı konumları için elde edilen maksimum SNR değerinin, diğer metasezgisel yöntemler ile elde edilenlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Sistem analizleri, iç mekân Li-Fi sistemlerinin yüksek hızlarında veri iletimi sağladığını açıkça göstermektedir. Sistemde yansımaların azalması, düşük görüş açısında fotodetektörün veri transferi yapan LED'lere otomatik olarak yönelmesi, daha yüksek güçlü LED'lerin kullanılması, OOK modülasyonu yerine çok taşıyıcılı modülasyon tekniklerinden olan OFDM modülasyon çeşitlerinin kullanılması SNR ve veri hızını artırabilir.

KAYNAKLAR

- Afgani, M.Z., Haas, H., Elgala, H. ve Knipp, D. 2006. Visible Light Communication Using OFDM in 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENTCOM 2006), 01-03 March, 134-139, Barcelona, Spain.
- Ahmad, R., Soltani, M. D., Safari, M. ve Srivastava, A. 2020. Load Balancing of Hybrid LiFi WiFi Networks Using Reinforcement Learning in 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 31 August-03 September, 1-6, London, UK.
- Alamir, A., Esmail, H. ve Hussein, H. S. 2020. Efficient optical MIMO-OFDM channel estimation based on correntropy compressive sensing. *Wireless Personal Communications*, 115(3), 1955-1971.
- Aydin, B. ve Duman, Ç. 2022. Comparison of OOK-RZ and 4-PPM performances in Li-Fi systems using LED arrays. *Optics & Laser Technology*, 153, 108247.
- Badeel, R., Subramaniam, S. K., Hanapi, Z. M. ve Muhammed, A. 2021. A review on LiFi network research: Open Issues, Applications and Future Directions. *Applied Sciences*, 11(23), 11118.
- Bell, A. G. 1880. On the production and reproduction of sound by light. *American Journal of Science*, 20(118), 305.
- Cailean, A. 2014. Etude et Réalisation d'un Système de Communications par Lumière Visible (VLC/LiFi). Application Au Domaine Automobile. PhD Thesis, Université De Versailles Saint-Quentin En Yvelines Ecole Doctorale Stv Université "Stefan Cel Mare" De Suceava, 175, France
- Cevik, T. ve Yilmaz, S. 2015. An overview of visible light communication systems. *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, 7(6), 139-150.
- Ching, L. C., Seong, T. C. ve Yong, W. H. 2013. Visible Light Communication (VLC) and Its Future Prospective in International Construction Week, March, 107-109, Malaysia.
- Chowdhury, M. Z., Hossan, M. T., Islam, A. ve Jang, Y. M. 2018. A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and Applications. *IEEE Access*, 6, 9819-9840.
- Codd-Downey, R. ve Jenkin, M. 2018. Wireless Teleoperation of an Underwater Robot Using Li-Fi in 2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), 11-13 August, 859-864, Wuyishan, China.
- Cogalan, T., Haas, H. ve Panayirci, E. 2015. Power Control-Based Multi-User Li-Fi Using a Compound Eye Transmitter in 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 06-10 December, 1-6, San Diego, CA, USA.

- Dinev, D., Aleksieva, V. ve Valchanov, H. 2020. Study of Li-Fi Indoor Network Reliability in 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), 03-06 June, 1-4, Bourgas, Bulgaria.
- Dinev, D. Z. 2019. Simulation Framework for Realization of Horizontal Handover in Li-Fi indoor network in 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), 12-14 September, 1-4, Sozopol, Bulgaria.
- Lumindong, C. W. D., Muslim, A., Nasreddin, B. M. ve Galina, M. 2018. Performance and environmental impacts review of Li-Fi and Wi-Fi technologies, *Journal of Environmental Engineering and Waste Management*, 3(2), 68-75.
- Dorigo, M. ve Gambardella, L. M. 1997. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, April, 53-66.
- Durga, R., Venkatesh, R. ve Selvaraj, D. 2019. Underwater Li-Fi Communication for Monitoring the Divers Health in International Conference on Emerging Current Trends in Computing and Expert Technology, 07 November, 35, 1574-1579, Cham.
- Eldeeb, H. B., Mana, S. M., Jungnickel, V., Hellwig, P., Hilt, J. ve Uysal, M. 2021. Distributed MIMO for Li-Fi: channel measurements, ray tracing and throughput Analysis. *IEEE Photonics Technology Letters*, 33(16), 916-919.
- Eroglu, Y. S., Anjinappa, C. K., Guvenc, I. ve Pala, N. 2019. Slow beam steering and NOMA for indoor multi-user visible light communications. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(4), 1627-1641.
- Forrest, S. 1996. Genetic algorithms. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 28(1), 77-80.
- Adiono, T. ve Fuada, S. 2017. Investigation of Optical Interference Noise Characteristics in Visible Light Communication System in 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017), 4-7 December, 612-615, Cancun, Mexico.
- Geffroy, B., Le Roy, P. ve Prat, C. 2006. Organic light-emitting diode (OLED) technology: materials, devices and display technologies. *Polymer International*, 55(6), 572-582.
- Haas, H., Yin, L., Wang, Y. ve Chen, C. 2015. What is lifi?. *Journal of Lightwave Technology*, 34(6), 1533-1544.
- Hua, L., Zhuang, Y., Qi, L., Yang, J. ve Shi, L. 2018. Noise analysis and modeling in visible light communication using allan variance. *IEEE Access*, 6, 74320-74327.
- Hussein, Y. S., Alias, M. Y. ve Abdulkafi, A. A. 2016. On Performance Analysis of LS and MMSE for Channel Estimation in VLC Systems in 2016 IEEE 12th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), 04-06 March, 204-209, Melaka, Malaysia.
- Kashan, A. H. 2015. A new metaheuristic for optimization: optics inspired optimization (OIO). *Computers & Operations Research*, 55, 99-125.

- Kahn, J. M. ve Barry, J. R. 1997. Wireless infrared communications. Proceedings of the IEEE, 85(2), 265-298.
- Karaboga, D. ve Akay, B. 2009. A comparative study of artificial bee colony algorithm. Applied Mathematics and Computation, 214(1), 108-132.
- Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V. ve Parthiban, R. 2015. LED based indoor visible light communications: state of the Art. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(3), 1649-1678.
- Kennedy, J. ve Eberhart, R. 1995. Particle Swarm Optimization in Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks, 27 November - 01 December, 1942-1948, Perth, WA, Australia.
- Komine, T., Lee, J. H., Haruyama, S. ve Nakagawa, M. 2009. Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment. IEEE Transactions on Wireless Communications, 8(6), 2892-2900.
- Komine, T. ve Nakagawa, M. 2004. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 50(1), 100-107.
- Karthika, R. ve Balakrishnan, S. 2015. Wireless communication using Li-Fi technology. SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG-IJECE), 2(3), 32-40.
- Liu, C. B., Sadeghi, B. ve Knightly, E. W. 2011. Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks. In Proceedings of the Eighth ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking, 41-50.
- Liu, X., Makino, H. ve Maeda, Y. 2008. Basic Study on Indoor Location Estimation Using Visible Light Communication Platform in 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 20-25 August, 2377-2380, Vancouver, BC, Canada.
- Liu, X., Umino, E. ve Makino, H. 2009. Basic Study on Robot Control in an Intelligent Indoor Environment Using Visible Light Communication in IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 26-28 August, 323-325, Budapest, Hungary.
- Luo, J., Fan, L. ve Li, H. 2017. Indoor positioning systems based on visible light communication: State of The Art. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(4), 2871-2893.
- Majeed, A. F. ve Murdas, I. A. 2019. Novel design for Li-Fi healthcare monitoring system. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, 12(6), 59-70.
- Mapunda, G. A., Ramogomana, R., Marata, L., Basutli, B., Khan, A. S., ve Chuma, J. M. 2020. Indoor visible light communication: a tutorial and survey. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020, 1-46.

- Meng, X., Jia, C., Cai, C., He, F. ve Wang, Q. 2022. Indoor high-precision 3D positioning system based on visible-light communication using improved whale optimization algorithm. In *Photonics* 9(2), 93-109.
- MIMS III, F. M. 1980. Alexander Graham Bell and the photophone: the centennial of the invention of light-wave communications. *Optics News*, 6(1), 8-16.
- Le Minh, H., O'Brien, D., Faulkner, G., Zeng, L., Lee, K., Jung, D. ve Oh, Y. 2008. 80 Mbit/s Visible Light Communications Using Pre-Equalized White LED in 34th European Conference on Optical Communication, 21-25 September, Volume 5, 223-224, Brussels.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. ve Lewis, A. 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- Misbah, M., Rabia S. ve Shahbaz P. 2016. LiFi: the future for indoor wireless data communication, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(10), 823-829.
- Luna-Rivera, J. M., Perez-Jimenez, R., Rabadan-Borjes, J., Rufo-Torres, J., Guerra, V. ve Suarez-Rodriguez, C. 2014. Multiuser CSK scheme for indoor visible light communications. *Optics Express*, 22(20), 24256-24267.
- Ndjiongue, A. R. ve Ferreira, H. C. 2018. An overview of outdoor visible light communications. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 29(7), e3448.
- Ndjiongue, A. R., Ferreira, H. C. ve Shongwe, T. 2016. Inter-Building PLC-VLC Integration Based on PSK and CSK Techniques in *International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)*, 20-23 March, 31-36, Bottrop, Germany.
- Niaz, M. T., Imdad, F. ve Kim, H. S. 2017. Power consumption efficiency evaluation of multi-user full-duplex visible light communication systems for smart home technologies. *Energies*, 10(2), 254.
- Ohno, Y. 2004. Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra in *Fourth International Conference on Solid State Lighting*, 20-23 March, Volume 5530, 88-98, Denver, Colorado, United States.
- Papanikolaou, V. K., Bamidis, P. P., Diamantoulakis, P. D. ve Karagiannidis, G. K. 2018. Li-Fi and Wi-Fi with Common Backhaul: Coordination and Resource Allocation in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 15-18 April, 1-6, Barcelona, Spain.
- Pham, Q. V., Huynh-The, T., Alazab, M., Zhao, J. ve Hwang, W. J. 2020. Sum-rate maximization for UAV-assisted visible light communications using NOMA: swarm intelligence meets machine learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 10375-10387.

- Popadić, M. ve Kočan, E. 2021. LiFi Networks: Concept, Standardization Activities and Perspectives in 25th International Conference on Information Technology (IT), 16-20 February, 1-4, Zabljak, Montenegro.
- Rao, R. V., Savsani, V. J. ve Vakharia, D. P. 2011. Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315.
- Riurean, S., Antipova, T., Rocha, Á., Leba, M. ve Ionica, A. 2019. VLC, OCC, IR and LiFi reliable optical wireless technologies to be embedded in medical facilities and medical devices. *Journal of Medical Systems*, 43(10), 308-317.
- Sabine, R. 1878. Action of light on a selenium (Galvanic) element, *Nature*, 17(443), 512-513.
- Sarkar, A., Agarwal, S. ve Nath, A. 2015. Li-Fi technology: data transmission through visible light. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 3(6), 1-12.
- Şenyer, D., Ünalđı, N. ve Akan, Ö. B. 2016. The importance of wireless green communication and the LED technology applications of visible light wireless communication. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 9(1), 65-79.
- Sewaiwar, A., Tiwari, S. V. ve Chung, Y. H., 2015. Novel user allocation scheme for full duplex multiuser bidirectional Li-Fi network. *Optics Communications*, 339, 153-156.
- Shanmughasundaram, R., Vadanam, S. P. ve Dharmarajan, V. 2018. Li-Fi Based Automatic Traffic Signal Control for Emergency Vehicles in Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAIECC), 9-10 February, 1-5, Bangalore, India.
- Sharma, R. R. ve Sanganal, A., 2014. Li-Fi technology: transmission of data through light. *International Journal of Computer Technology and Applications*, 5(1), 150-154.
- Spagnolo, G. S., Cozzella, L., Leccese, F., Sangiovanni, S., Podestà, L. ve PiuZZi, E. 2020. Optical Wireless Communication and Li-Fi: A New Infrastructure for Wireless Communication in Saving Energy Era in IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, 03-05 June, 674-678, Roma, Italy.
- Swami, K. T. ve Moghe, A. A. 2020. A Review of LiFi Technology in 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 01-03 December, 1-5, Jaipur, India.
- Tanaka, Y., Haruyama, S. ve Nakagawa, M. 2000. Wireless Optical Transmissions with White Colored LED for Wireless Home Links in 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2000), 18-21 September, 1325-1329, London, UK.

- Vasuja, M., Mishra, A. K., Chauhan, U. S., Chandola, D. ve Kapoor, S. 2018. Image Transmission Using Li-Fi in Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT), 20-21 April, 287-292, Coimbatore, India.
- Vijayaraghavan, H. ve Kellerer, W. 2021. Delay-Aware Wireless Resource Allocation and User Association in LiFi-WiFi Heterogeneous Networks in IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 07-11 December, 1-6, Madrid, Spain.
- Vučić, J., Fernandez, L., Kottke, C., Habel, K. ve Langer, K. D. 2010. Implementation of a Real-Time DMT-Based 100 Mbit/s Visible-Light Link in 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 19-23 September, 1-5, Turin, Italy.
- Wang, J., Al-Kinani, A., Zhang, W. ve Wang, C. X. 2017. A New VLC Channel Model for Underground Mining Environments in 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 26-30 June, 2134-2139, Valencia, Spain.
- Wang, L., Wang, C., Chi, X., Zhao, L. ve Dong, X. 2017. Optimizing SNR for indoor visible light communication via selecting communicating LEDs. *Optics Communications*, 387, 174-181.
- Wang, Y., Wu, X. ve Haas, H. 2015. Distributed Load Balancing for Internet of Things by Using Li-Fi and RF Hybrid Network in IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 30 August - 02 September, 1289-1294, Hong Kong, China.
- Won, Y. Y., Yoon, S. M., ve Seo, D. 2021. Ambient LED light noise reduction using adaptive differential equalization in Li-Fi Wireless Link. *Sensors*, 21(4), 1060-1076.
- Yang, X. S. ve Deb, S. 2009. Cuckoo Search Via Lévy Flights in 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), 09-11 December, 210-214, Coimbatore, India.
- Yin, L., Wu, X. ve Haas, H. 2015. Indoor Visible Light Positioning with Angle Diversity Transmitter in IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall) , 6-09 September, 1-5, Boston, MA, USA.
- Yücel, M., Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Kim, S. ve Geem, Z. W. 2021. Adaptive-hybrid harmony search algorithm for multi-constrained optimum eco-design of reinforced concrete retaining walls. *Sustainability*, 13(4), 1639-1657.
- Zeng, L., O'Brien, D. C., Le Minh, H., Faulkner, G. E., Lee, K., Jung, D. ve 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.