

VLC Sistemlerinde QLED Kullanan Renk Kaydırmalı Anahtarlama Modülasyonunun Sembol Hata Oranı Analizi

Emin TUĞCU^{1*} 

Öz

Görünür ışık haberleşme (VLC) sistemleri, iç mekan uygulamaları için aydınlatma fonksiyonu ile eş zamanlı olarak yüksek hızlı güvenilir veri iletimini de sağlarlar. VLC sistemlerinde, vericide ışık yayan diyotlar (LED) alıcıda ise yaygın olarak foto-diyotlar (PD) kullanılır. Aydınlatma için LED'lerin iyi bir ışık etkinliğine ve renksel geriverim indeksine (CRI) sahip olması gerekir. Haberleşme için ise LED'lerin yüksek veri hızlarını desteklemesi için geniş bir modülasyon bant genişliğine sahip olmaları gerekmektedir. Yüksek veri hızlarını desteklemek için yeterli renksel geriverim indeksine sahip çok renkli kırmızı-yeşil-mavi (RGB) LED'ler kullanan renk kaydırmalı anahtarlama (CSK) modülasyonu IEEE 802.15.7 VLC standardında tanıtılmıştır. VLC sistemlerinde, daha iyi renksel geriverim indeksine sahip Quadrichromatic LED'ler (QLED) de eşzamanlı aydınlatma ve iletişim için uygundur. QLED sadece ek bir veri kanalı değil, aynı zamanda aydınlatmada daha iyi bir renk kalitesi sunmaktadır. Bu nedenle VLC sistemlerinde QLED hem aydınlatma kalitesi hem de yüksek veri hızları için en iyi seçenektir. Bu çalışmada QLED kullanan VLC sistemlerinde AWGN kanallar için sembol hata oranı (SER) analizi yapılmış ve analitik modeller türetilmiştir. SER analizinde, toplam hata üzerinde etkisi yüksek olan semboller arasındaki geçiş olasılıklarının hesaplanması ile analitik modeller türetilmiştir. Bu analizde semboller arasındaki öklid uzaklıkları kullanılmıştır. Türetilen SER modelleri birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları ile uyum göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Görünür ışık haberleşmesi, Renk kaydırmalı anahtarlama, Quadrichromatic LED, Sembol hata oranı.

Symbol Error Rate Analysis of Color Shift Keying Modulation Using QLED in VLC Systems

Abstract

Visible light communication (VLC) systems provide high-speed reliable data transmission simultaneously with the illumination function for indoor applications. In VLC systems, light emitting diodes (LEDs) are used at the transmitter and photo-diodes (PDs) are commonly used at the receiver. For lighting, LEDs must have good luminous efficacy and a good color rendering index (CRI). For communication, LEDs need to have a wide modulation bandwidth to support high data rates. Color shift keying (CSK) modulation using multicolor red-green-blue (RGB) LEDs with sufficient color rendering index to support high data rates was introduced in the IEEE 802.15.7 VLC standard. In VLC systems, quadrichromatic LEDs (QLED) with a better color rendering index are also suitable for simultaneous illumination and communication. QLED offers not only an additional data channel, but also a better color quality in illumination. Therefore, QLED is the best choice in VLC Systems for both illumination quality and high data rates. In this study, symbol error rate (SER) analysis and analytical models are derived for AWGN channels in VLC systems with QLED. In the SER analysis, analytical models are derived by calculating the transition probabilities between symbols, which have a high impact on the total error. Euclidean distances between symbols were used in this analysis. The derived SER models are compatible with the union bound and simulation results.

Keywords: Visible light communication, Color shift keying, Quadrichromatic LED, Symbol error rate.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, emintugcu@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 18.02.2024

Kabul/Accepted: 14.05.2024

Yayın/Published: 18.06.2024

1. Giriş

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler yüksek hızlı kablosuz haberleşme sistemlerini yaşantımızın temel gereksinimlerinden birisi durumuna getirmiştir. Bu gelişmeler sonucunda, özellikle son yıllarda akıllı cihazların sayısının artması ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarının hızla yaygınlaşması kullanıcı yoğunluğunun ve veri trafiğinin artmasına neden olarak radyo frekans bandında kapasite problemini oluşturmuştur. Kablosuz haberleşme sistemlerinde veri hızının üst sınırı iletişim bant genişliğine bağlıdır (Shannon, 1949). Bu nedenle radyo frekans bandındaki kapasite problemi çözüm bekleyen önemli bir problemdir. Bu probleme bir çözüm, radyo frekans bandını tamamlayıcı nitelikte olan ve aynı zamanda girişim oluşturmayan görünür ışık bandının kullanımıdır. Görünür ışık bandında aydınlatma ile eşzamanlı olarak iletişimin gerçekleştirilmesi dikkat çekici bir gelişme olup akademi ve endüstrinin ilgisini çekmiştir.

Son yıllarda yüksek enerji verimliliklerinden dolayı geleneksel aydınlatma sistemlerinin yerlerini ışık yayan diyotları (LEDs) kullanan aydınlatma sistemleri almaya başlamıştır. LED'lerin düşük fiyatları ve uzun ömürleri nedeniyle de geleneksel aydınlatma sistemlerine göre önemli avantajları vardır (Zukauskas ve ark., 2014). Eski aydınlatma teknolojilerinin aksine, LED aydınlatma sistemlerinde ışık yoğunluğu insan gözünün fark edemeyeceği kadar hızlı bir şekilde değiştirilebilmektedir (Han ve ark., 2015). LED'lerin hızlı anahtarlama özelliği, aydınlatma ile eşzamanlı olarak iletişim amaçlı kullanımlarını da mümkün kılmaktadır. Bu işlevsellik, görünür ışık haberleşme (VLC) teknolojisinin gelişmesine yol açmıştır. LED'lerin aydınlatma sistemlerinde artan kullanımlarından dolayı hem akademik hem de endüstriyel topluluklar, sunduğu lisanssız geniş bant genişliği nedeniyle VLC'ye daha fazla ilgi duymaya başlamıştır.

VLC, radyo frekansına (RF) dayalı geleneksel kablosuz iletişim teknolojilerini tamamlayan umut verici bir teknolojidir. VLC sistemlerinde LED ve lazer gibi ışık yayan diyotlar verici olarak kullanılırlar. Alıcı olarak ise fotodiyotlar (PDs) gibi yarı iletken devre elemanlarının yanı sıra kameralar da kullanılmaktadır. LED'lerin ve PD'lerin fiziksel özellikleri nedeniyle, VLC sistemlerinde yoğunluk modülasyonu ve doğrudan algılama (IM/DD) kullanılır. Aydınlatma fonksiyonu için LED'ler tarafından yayılan ışığın beyaz ışık olması gerekmektedir. Maliyet ve karmaşıklık nedenleriyle genellikle beyaz fosforlu LED'ler kullanılır. Bu LED'ler optik spektrumu verimsiz kullandıkları için yüksek veri hızlarına izin vermezler (Chow ve ark., 2011). Farklı bir yöntem kullanılarak aydınlatma için beyaz ışık, çok renkli LED'lerle birden fazla monokromatik ışığın birleştirilmesiyle elde edilebilir. Dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) teknolojisi sayesinde, çok renkli LED kullanılarak geliştirilen VLC sistemi, daha yüksek modülasyon bant genişliği nedeniyle yüksek hızlı veri iletimi için büyük bir potansiyele sahiptir. Her bir renk bandından iletilen bilginin bağımsız olarak modülasyonunun gerçekleştirilmesi beyaz ışığın üretilmesinde problem

oluşturmaktadır (Jia ve ark., 2015). Bu problemin çözümü için IEEE 802.15.7 VLC standardında, kırmızı-yeşil-mavi (RGB) LED'ler olarak bilinen çok renkli beyaz LED'leri kullanan renk kaydırma anahtarlama (CSK) modülasyonu tanımlanmıştır (IEEE VLC Standard, 2011). Bu yapı TLED-CSK olarak da adlandırılmaktadır. CSK modülasyonu aynı zamanda, yüksek spektral verimlilik ve karartma desteği de sunmaktadır. Buna ek olarak, CSK modülasyonu, renk kanallarından iletilen işaretin gücünün dengeli olmasından dolayı ışığın parlaklığının dalgalanmasını önler ve titreyen ışığın neden olduğu sağlık sorunları riskini azaltır.

Genel aydınlatma açısından değerlendirildiğinde renksel geriverim de ışık kaynaklarının en önemli özelliklerinden birisidir. Işık kaynağı zayıf renksel geriverime sahipse, genel aydınlatma için kullanılamaz. Bu açıdan bakıldığında, RGB LED'ler yeterli renksel geriverimi sağlarlar. Daha yüksek renksel geriverim elde etmek için üçten fazla LED kullanma konsepti sunulmuştur (Butala ve ark., 2012). Dört renge dayalı QLED-CSK adı verilen CSK modülasyonunun geliştirilmiş bir versiyonu (Singh ve ark., 2014) çalışmasında sunulmuştur. QLED-CSK, geleneksel RGB LED'leri kullanan TLED-CSK sistemine göre daha iyi renksel geriverime ve ışık verimliliğine sahiptir (Ohno, 2005). Bu nedenle VLC sistemlerinde QLED-CSK yapısı, hem daha iyi aydınlatma kalitesi elde etmek için hem de yüksek veri hızlarına ulaşmak için en iyi seçenek olarak düşünülebilir. Aynı zamanda QLED-CSK yapısı TLED-CSK yapısına kıyasla ilave dalga boyu ile VLC sistemlerinde önemli bir performans artışı da sunmaktadır (Singh ve ark., 2014).

Yüksek veri hızlarının ve aydınlatma kalitesinin amaçlandığı VLC sistemleri için QLED-CSK yapısının kullanılması etkin bir çözümdür. Bu yapının SER başarımı analizi için 4 boyutlu işaret uzayında özellikle yüksek seviyeli modülasyon türleri için karar bölgelerinin tam olarak belirlenmesi zor bir problemdir. Bu nedenle sembol hata oranının (SER) analitik olarak değerlendirilmesi kolay değildir. (Singh ve ark, 2014) çalışmasında 4 boyutlu sembol uzayında semboller arasındaki en küçük öklid mesafesi kullanılarak analitik olarak SER analizi yapılmıştır. (Singh ve ark., 2015) çalışmasında sembol uzayında tüm semboller arasındaki geçiş olasılıklarının toplanmasıyla birleşim üst sınırı için analiz yapılmıştır. (Tuğcu ve ark, 2018) çalışmasında TLED-CSK yapısı için sembol uzayında sembol hatasının üzerinde etkisi yüksek olan sembollerin değerlendirilmesiyle SER analizi yapılmış ve analitik modeller türetilmiştir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, bu çalışmada da QLED-CSK yapısı için SER analizi yapılarak analitik modeller türetilmiştir. Analizler 4-boyutlu sembol uzayında hata olasılığında etkisi yüksek olan semboller arasındaki geçiş olasılıklarının hesaplanması ile yapılmıştır. Bu değerlendirmede semboller arasındaki öklid uzaklıkları kullanılmıştır. Önerilen modeller işaret uzayındaki tüm semboller arasındaki geçiş olasılıklarının toplandığı birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları ile uyum göstermektedir.

Çalışmanın sonraki kısmında TLED-CSK ve QLED-CSK sistemlerinde modülasyon ve demodülasyon işlemleri genel olarak açıklanmıştır. Üçüncü ve dördüncü bölümde SER analizleri ve elde edilen nümerik sonuçlar verilerek son bölümde çalışmanın sonuçları irdelenmiştir.

2. CSK Modülasyonu ve Demodülasyonu

2.1. TLED-CSK Yapısı

VLC sistemlerinde aydınlatma gereksinimlerinden dolayı renk kanallarından iletilen işaretlerin pozitif olma zorunluluğu vardır. IEEE 802.15.7 VLC standardında sunulan CSK modülasyonunda kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) çok renkli LED'ler tarafından yayılan ışığın yoğunluğu modüle edilerek veri iletimi gerçekleştirilir. CSK modülasyonu CIE 1931 renk uzayında uluslararası aydınlatma komisyonu tarafından tanımlanan x - y renk koordinatları kullanılarak gerçekleştirilir. Verici tarafta iletilecek veri renk kodlaması ile CIE 1931 renk uzayında x - y kromatik değerleri ile tanımlanan M seviyeli sembollere dönüştürülür (IEEE VLC Standard, 2011). Daha sonra kromatik değerlere karşılık gelen optik kanallara ait güç yoğunlukları denklem (1), (2) ve (3) kullanılarak elde edilir.

$$x = P_i x_i + P_j x_j + P_k x_k \quad (1)$$

$$y = P_i y_i + P_j y_j + P_k y_k \quad (2)$$

$$P_i + P_j + P_k = 1 \quad (3)$$

Denklem sistemindeki (x_i, y_i) , (x_j, y_j) ve (x_k, y_k) kullanılan ışık kaynaklarının merkez dalga boylarının kromatik değerlerine karşılık gelirler. Her bir sembole ait hesaplanan $[P_i, P_j, P_k]$ yoğunluk değerleri sembol uzayında $\mathbf{s}_m = [P_i, P_j, P_k]^T$, $0 \leq m \leq M - 1$ olmak üzere 3-boyutlu sembolleri oluştururlar. Alıcı tarafta ise foto detektörler tarafından alınan optik sinyal elektriksel işarete dönüştürülür. AWGN kanal için alıcıda alınan işaret denklem (4) ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_i \\ \hat{P}_j \\ \hat{P}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_i \\ \eta_j \\ \eta_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

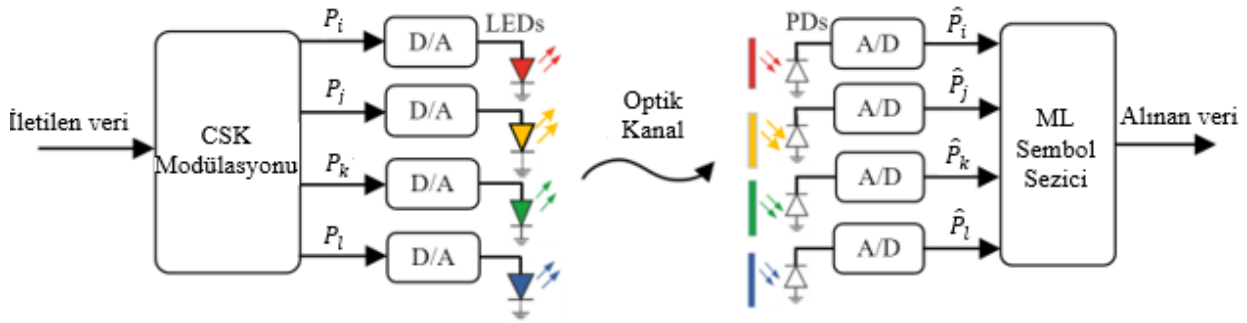
Burada, η_i , η_j ve η_k her birinin varyansı σ^2 olan beyaz gürültüdür. Alınan işaret $\hat{\mathbf{s}} = [\hat{P}_i, \hat{P}_j, \hat{P}_k]^T$, den denklem (5)' de verildiği gibi en büyük olabilirlik (ML) sezici kullanılarak sembol uzayında en küçük öklid mesafesine göre değerlendirme yapılarak iletilen sembollere karar verilir.

$$\bar{s} = \underset{s_l \in A}{\operatorname{argmin}} \|\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s}_l\|_2 \quad (5)$$

Burada A, M seviyeli CSK sembollerinden oluşan kümeyi gösterir.

2.2. QLED-CSK Yapısı

QLED-CSK sisteminde, Şekil 1' de verilen blok diyagramından da görüldüğü gibi TLED-CSK sisteminden farklı olarak 4 farklı renk kanalı kullanılmaktadır.



Şekil 1. QLED-CSK sisteminin blok diyagramı

LED'ler tarafından yayılan ışığın yoğunluğunu modüle etmek için dört farklı LED kullanılır. Renk kanallarından iletilen işaretin güç yoğunluklarını elde etmek için denklem (6), (7) ve (8) kullanılır.

$$x = P_i x_i + P_j x_j + P_k x_k + P_l x_l \quad (6)$$

$$y = P_i y_i + P_j y_j + P_k y_k + P_l y_l \quad (7)$$

$$P_i + P_j + P_k + P_l = 1 \quad (8)$$

TLED-CSK sisteminde olduğu gibi denklem sistemindeki (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , (x_k, y_k) ve (x_l, y_l) kullanılan ışık kaynaklarının merkez dalga boylarının kromatik değerlerine karşılık gelirler. Her bir sembole ait hesaplanan $[P_i, P_j, P_k, P_l]$ yoğunluk bilgileri işaret uzayında $\mathbf{s}_m = [P_i, P_j, P_k, P_l]^T$, $0 \leq m \leq M - 1$ olmak üzere 4-boyutlu sembollerini oluştururlar. TLED-CSK sisteminden farklı olarak denklem (6), (7) ve (8) ile verilen denklem sistemine kromatik değerler uygulandığında doğruluğu olmayan sonuçlar yani negatif güç yoğunluk değerleri elde edilir. Bu nedenle QLED-CSK sistemi herhangi bir anda üç LED kullanacak şekilde tasarlanmaktadır. Renk kanallarına ait güç yoğunlukları TLED-CSK denklem sistemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Singh ve ark., 2014). Tablo 1'de QLED 4-CSK ve QLED 8-CSK modülasyonlarına ait renk kanallarından iletilen işaretin güç yoğunluk değerleri verilmiştir (Singh ve ark., 2014).

Tablo 1. QLED 4-CSK ve QLED 8-CSK Modülasyonlarına ait renk kanallarının güç yoğunlukları.

	4-CSK	8-CSK
Semboller	(1 0 0 0)	(1 0 0 0)
	(0 1 0 0)	(0.5 0.5 0 0)
	(0 0 0 1)	(0 0.5 0.5 0)
	(0 0 1 0)	(0 1 0 0)
		(0.5 0 0 0.5)
		(0 0 0 1)
		(0 0 1 0)
		(0 0 0.5 0.5)

TLED-CSK sisteminde olduğu gibi QLED-CSK sisteminde de alıcı tarafta foto detektörler tarafından alınan optik sinyal elektriksel işarete dönüştürülür. Toplanır beyaz Gauss gürültülü (AWGN) kanal için alıcıda alınan işaret denklem (9) ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_i \\ \hat{P}_j \\ \hat{P}_k \\ \hat{P}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \\ P_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_i \\ \eta_j \\ \eta_k \\ \eta_l \end{bmatrix} \quad (9)$$

Burada, η_i , η_j , η_k ve η_l her birinin varyansı σ^2 olan beyaz gürültüdür. Alınan işaret $\hat{\mathbf{s}} = [\hat{P}_i, \hat{P}_j, \hat{P}_k, \hat{P}_l]^T$, dan denklem (10)' da verildiği gibi ML sezici kullanılarak sembol uzayında en küçük öklid mesafesine göre iletilen sembollere karar verilir.

$$\bar{s} = \underset{s_l \in A'}{\operatorname{argmin}} \|\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s}_l\|_2 \quad (10)$$

Burada A' , M seviyeli CSK sembollerinden oluşan kümeyi gösterir.

3. SER Analizi

Bu bölümde AWGN kanallarda QLED-CSK modülasyonunu kullanan VLC sistemleri için SER analizi yapılmıştır. M seviyeli işaret uzayında üretilen sembollerin eşit olasılıklı olduğu durumda tüm semboller arasındaki geçiş olasılıklarının toplandığı durumda SER ifadesi denklem (11) ile verilmiştir (Singh ve ark., 2014).

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M Q \left(\sqrt{\frac{D(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j)^2}{2N_0}} \right) \quad (11)$$

Burada $D(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j)$ terimi \mathbf{s}_i sembolü ile \mathbf{s}_j sembolü arasındaki öklid uzaklığını gösterir ve denklem (12) ile hesaplanır.

$$D = \|\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j\|_2 \quad (12)$$

Denklem (11)' de N_0 , AWGN gürültünün tek yanlı güç spektral yoğunluğudur. SER analizinde bir sembolün diğer semboller ile arasındaki en küçük öklid mesafesine göre değerlendirme yapıldığında denklem (11)

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left\{ N_{n,i} Q \left(\sqrt{\frac{d_{min}^2}{2N_0}} \right) \right\} \quad (13)$$

şeklinde elde edilir (Singh ve ark., 2014). Burada $N_{n,i}$ i. sembole en yakın komşu sembollerin sayısına karşılık gelir. Denklem (13) kullanılarak QLED-CSK yapısı için 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK için elde edilen sembol hata olasılıkları sırasıyla aşağıda denklem (14), (15) ve (16) ile verilmiştir.

$$P_s = 3 \times Q \left(\frac{1}{\sqrt{N_0}} \right) \quad (14)$$

$$P_s = 3 \times Q \left(\frac{1}{\sqrt{4N_0}} \right) \quad (15)$$

$$P_s = \frac{1}{2} \times Q \left(\frac{0.47}{\sqrt{2N_0}} \right) + \frac{1}{16} \times Q \left(\frac{0.46}{\sqrt{2N_0}} \right) + \frac{3}{16} \times Q \left(\frac{0.45}{\sqrt{2N_0}} \right) + \frac{1}{8} \times Q \left(\frac{0.44}{\sqrt{2N_0}} \right) + \frac{1}{8} \times Q \left(\frac{0.43}{\sqrt{2N_0}} \right) + \frac{1}{8} \times Q \left(\frac{0.42}{\sqrt{2N_0}} \right) + \frac{1}{8} \times Q \left(\frac{0.41}{\sqrt{2N_0}} \right) \quad (16)$$

Modülasyon derecesi arttıkça semboller arasındaki öklid uzaklıkları azalacağından denklem (13) kullanılarak elde edilen sonuçlardaki hata artacaktır. Örneğin 8-CSK ve 16-CSK modülasyonlarına ait semboller arasındaki öklid uzaklıkları aşağıda Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. 8-CSK için sembollere ait güç yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen öklid mesafeleri.

	\mathbf{s}_0	\mathbf{s}_1	\mathbf{s}_2	\mathbf{s}_3	\mathbf{s}_4	\mathbf{s}_5	\mathbf{s}_6	\mathbf{s}_7
\mathbf{s}_0	0	0.71	1.22	1.41	0.71	1.41	1.41	1.22
\mathbf{s}_1	0.71	0	0.71	0.71	0.71	1.22	1.22	1.0
\mathbf{s}_2	1.22	0.71	0	0.71	1.0	1.22	0.71	0.71
\mathbf{s}_3	1.41	0.71	0.71	0	1.22	1.41	1.41	1.22
\mathbf{s}_4	0.71	0.71	1.0	1.22	0	0.71	1.22	0.71
\mathbf{s}_5	1.41	1.22	1.22	1.41	0.71	0	1.41	0.71
\mathbf{s}_6	1.41	1.22	0.71	1.41	1.22	1.41	0	0.71
\mathbf{s}_7	1.22	1.0	0.71	1.22	0.71	0.71	0.71	0

Tablo 3. 16-CSK için sembollere ait güç yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen öklid mesafeleri.

	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{15}
s_0	0	0.47	1.41	0.94	0.47	0.76	1.25	0.84	1.41	1.25	1.41	1.25	0.94	0.87	1.25	1.16
s_1	0.47	0	0.94	0.47	0.47	0.41	0.82	0.52	1.25	1.05	1.25	1.05	0.82	0.71	0.94	0.80
s_2	1.41	0.94	0	0.47	1.25	0.83	0.47	0.87	1.41	1.25	1.41	1.25	1.25	1.16	0.94	0.74
s_3	0.94	0.47	0.47	0	0.82	0.45	0.47	0.54	1.25	1.05	1.25	1.05	0.94	0.83	0.82	0.61
s_4	0.47	0.47	1.25	0.82	0	0.44	1.05	0.68	0.94	0.82	1.25	0.94	0.47	0.51	1.05	0.82
s_5	0.76	0.41	0.83	0.45	0.44	0	0.68	0.49	0.86	0.70	1.16	0.83	0.49	0.48	0.82	0.47
s_6	1.25	0.82	0.47	0.47	1.05	0.68	0	0.50	1.25	0.94	0.94	0.82	1.05	0.81	0.47	0.45
s_7	0.84	0.52	0.87	0.54	0.68	0.49	0.50	0	1.16	0.80	0.75	0.61	0.82	0.47	0.43	0.50
s_8	1.41	1.25	1.41	1.25	0.94	0.86	1.25	1.16	0	0.47	1.41	0.94	0.47	0.78	1.25	0.80
s_9	1.25	1.05	1.25	1.05	0.81	0.70	0.94	0.80	0.47	0	0.94	0.47	0.47	0.42	0.82	0.51
s_{10}	1.41	1.25	1.41	1.25	1.25	1.16	0.94	0.75	1.41	0.94	0	0.47	1.25	0.81	0.47	0.91
s_{11}	1.25	1.05	1.25	1.05	0.94	0.83	0.82	0.61	0.94	0.47	0.47	0	0.82	0.44	0.47	0.57
s_{12}	0.94	0.82	1.25	0.94	0.47	0.49	1.05	0.82	0.47	0.47	1.25	0.82	0	0.46	1.05	0.66
s_{13}	0.87	0.71	1.16	0.83	0.51	0.48	0.81	0.47	0.78	0.42	0.81	0.44	0.46	0	0.66	0.50
s_{14}	1.25	0.94	0.94	0.82	1.05	0.82	0.47	0.43	1.25	0.82	0.47	0.47	1.05	0.66	0	0.54
s_{15}	1.16	0.80	0.74	0.61	0.82	0.47	0.45	0.50	0.80	0.51	0.91	0.57	0.66	0.50	0.54	0

Tablo 3' de verilen semboller arasındaki öklid uzaklıkları incelendiğinde örneğin s_{13} sembolüne en yakın uzaklıkta olan sembolün s_9 sembolü olduğu görülmektedir ve semboller arasındaki öklid mesafesi 0.42'dir. s_{13} sembolünün s_{11} sembolü ile arasındaki öklid mesafesi ise 0.44 olduğu görülmektedir. Bu mesafelerin yaklaşık aynı olduğu kabul edilebilir. En küçük öklid mesafesine göre değerlendirme yapıldığında s_{11} sembolünün hata üzerindeki etkisi ihmal edilecektir. Daha açıklayıcı olması açısından $E_b/N_0 = 10dB$ değeri için bu ikili semboller arasındaki hata olasılıkları sırasıyla $5e - 04$ ve $4e - 04$ olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle SER analizi semboller arasındaki en küçük öklid uzaklığına göre yapıldığında birbirlerine yakın mesafedeki sembollerden kaynaklanan hatalar ihmal edileceğinden analitik modelin doğruluğu azalacaktır. Bu değerlendirmeler doğrultusunda QLED-CSK yapısı için 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK için sembol hata olasılıkları tekrar hesaplandığında türetilen analitik modeller sırasıyla denklem (17), (18) ve (19) ile verilmiştir.

$$P_s = 3 \times Q\left(\frac{1}{\sqrt{N_0}}\right) \quad (17)$$

$$P_s = 3 \times Q\left(\frac{1}{\sqrt{4N_0}}\right) + 0.5 \times Q\left(\frac{1}{\sqrt{2N_0}}\right) + 2 \times Q\left(\frac{1.2}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (18)$$

$$P_s = \frac{3}{8} \times Q\left(\frac{0.5}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{4} \times Q\left(\frac{0.49}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{8} \times Q\left(\frac{0.48}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{9}{4} \times Q\left(\frac{0.47}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{8} \times Q\left(\frac{0.46}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{4} \times Q\left(\frac{0.45}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{4} \times Q\left(\frac{0.44}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{8} \times Q\left(\frac{0.43}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{8} \times Q\left(\frac{0.42}{\sqrt{2N_0}}\right) + \frac{1}{8} \times Q\left(\frac{0.41}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (19)$$

Türetilen analitik modellerin ve en küçük öklid mesafesine göre elde edilen analitik modellerin işlem karmaşıklığı açısından değerlendirildiğinde türetilen analitik modellerdeki işlem karmaşasının

modülasyon derecesi ile arttığı görülmektedir. Elde edilen modeller incelendiğinde Q-fonksiyonun hesaplanması gerektiği görülmektedir. Bunun için (Chiani ve ark., 2003) çalışmasındaki Q-fonksiyonunun (20) ile verilen yaklaşımı kullanılmıştır.

$$Q(\sqrt{x}) = \frac{1}{12} \exp^{-\frac{x}{2}} + \frac{1}{4} \exp^{-\frac{2}{3}x} \quad (20)$$

(20) ifadesi incelendiğinde yapısında üstel fonksiyonu içerdiği görülmektedir. Üstel fonksiyonlar, modern iletişim ve sinyal işlemede çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, yüksek hassasiyetli kayan noktalı üstel fonksiyonların donanım algoritması gerçekleştirilmektedir (Zou ve ark., 2019). Bundan dolayı yaklaşık modeldeki üstel fonksiyon bir işlem olarak değerlendirilmiştir. Aşağıda sırasıyla Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK modülasyonuna ait elde edilen işlem karmaşıklıkları verilmiştir.

Tablo 4. 4-CSK modülasyonuna ait işlem karmaşıklığı

İşlem türü	En küçük öklid mesafesine göre	Önerilen yaklaşım
Toplama	1	1
Çarpma	5	5
exp (.)	2	2

Tablo 5. 8-CSK modülasyonuna ait işlem karmaşıklığı

İşlem türü	En küçük öklid mesafesine göre	Önerilen yaklaşım
Toplama	1	3
Çarpma	6	18
exp (.)	2	6

Tablo 6. 16-CSK modülasyonuna ait işlem karmaşıklığı

İşlem türü	En küçük öklid mesafesine göre	Önerilen yaklaşım
Toplama	7	10
Çarpma	42	60
exp (.)	14	20

BER sonuçları ise modülasyon türleri için elde edilen sembol hata olasılıklarının denklem (21) ile verildiği gibi her bir sembolün taşıdığı bit sayısına oranı ile hesaplanmıştır (Singh ve ark., 2014).

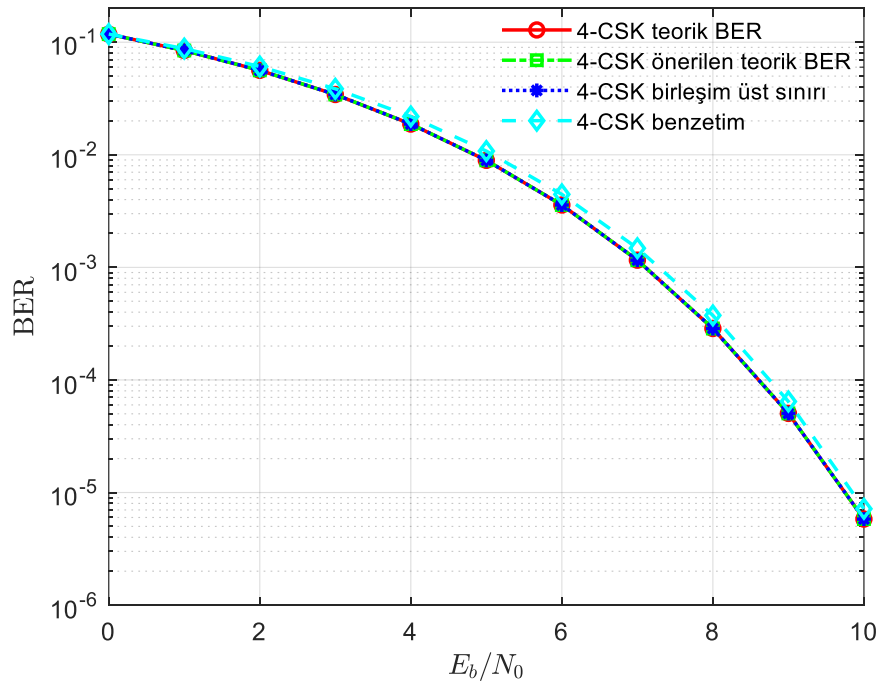
$$P_b = \frac{P_s}{\log_2 M} \quad (21)$$

4. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde QLED-CSK kullanılan VLC sistemlerinde 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK modülasyonları için elde edilen teorik ve benzetim sonuçları verilmiştir. Benzetim sonuçları AWGN kanallar için, 3000 Monte Carlo döngüsü üzerinden iletilen her bir pakette 2000 sembol kullanılarak elde edilmiştir. Sonuç olarak her bir SNR seviyesindeki BER değerini elde etmek için toplam 6×10^6 sembol kullanılmıştır. Verilen sonuçlar incelendiğinde modülasyon derecesi arttıkça yani sembol uzayında semboller arasındaki öklid mesafeleri azaldıkça en küçük öklid uzaklığına göre hata analizi yapmanın doğruluğu azalttığı görülmektedir. Çünkü en küçük öklid mesafesine yakın noktadaki sembollerden kaynaklanan hatalar ihmal edilmektedir. Şekil 2’de 4-CSK modülasyonuna ait sonuçlar görülmektedir. Beklendiği gibi teorik sonuçlardaki başarımın aynı olduğu görülmektedir. Çünkü Tablo 7 ‘de verildiği gibi 4-CSK modülasyonunda sembol uzayında tüm semboller arasındaki öklid mesafeleri aynıdır. Aynı zamanda benzetim sonuçları ile teorik sonuçların da uyumlu olduğu görülmektedir.

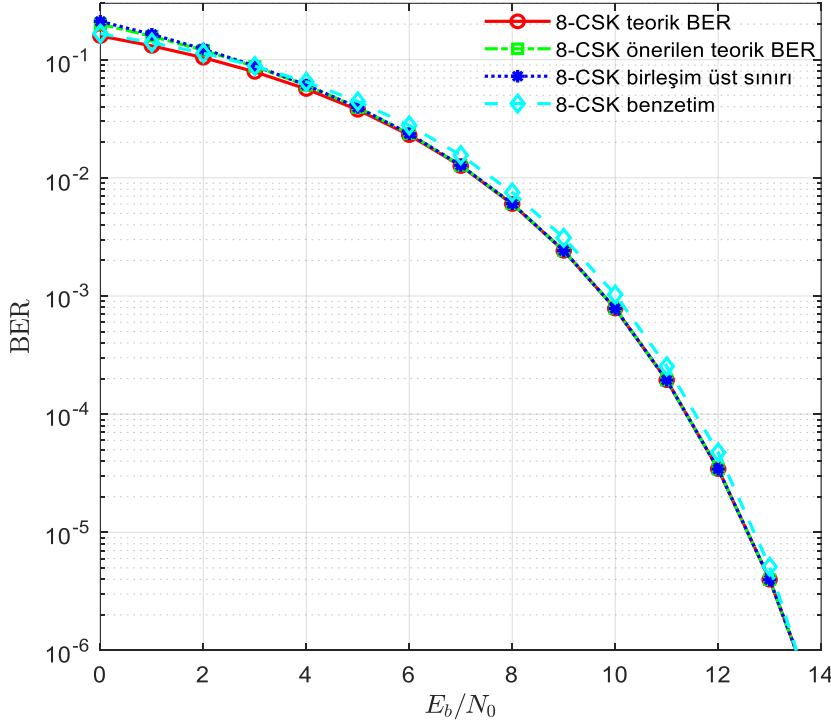
Tablo 7. 4-CSK için sembollere ait güç yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen öklid mesafeleri.

	s_0	s_1	s_2	s_3
s_0	0	1.4142	1.4142	1.4142
s_1	1.4142	0	1.4142	1.4142
s_2	1.4142	1.4142	0	1.4142
s_3	1.4142	1.4142	1.4142	0



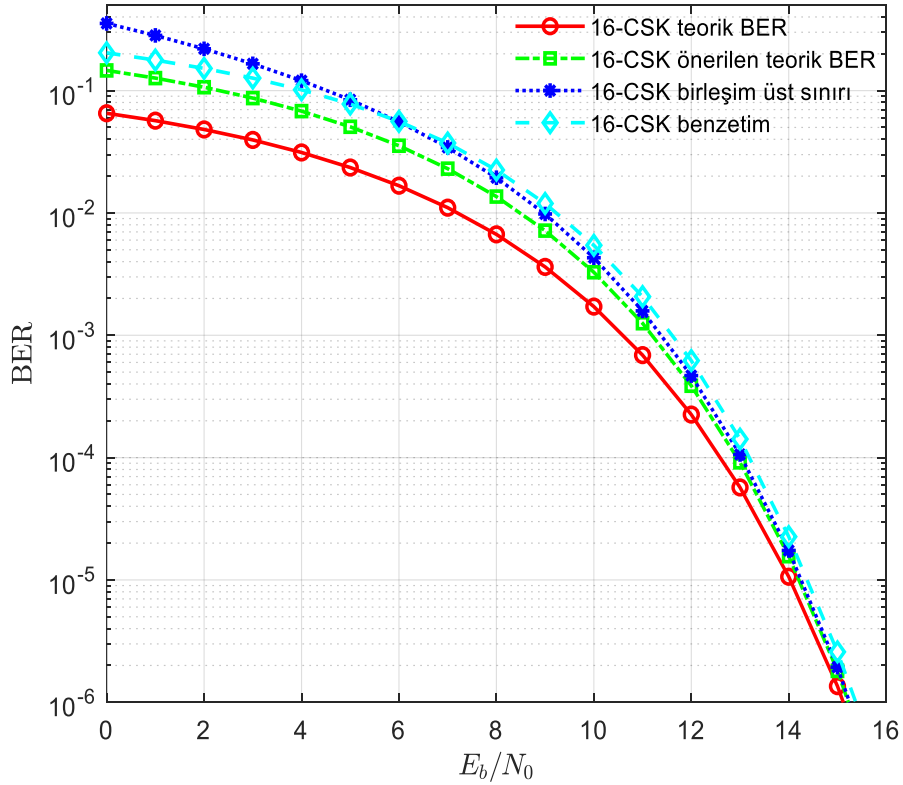
Şekil 2. 4-CSK modülasyonu için BER sonuçları

Şekil 3’de 8-CSK modülasyonuna ait sonuçlar verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi işaret uzayında sembol sayısının artması sonucunda en küçük hata mesafesine göre hata analizi yapıldığında yapılan hatanın arttığı görülmektedir. Önerilen teorik modelin sonuçlarının birleşim üst sınırı sonuçları ile uyumlu olduğu ve doğruluğun daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzetim sonuçlarının da teorik sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 8-CSK modülasyonu için BER sonuçları

Şekil 4’de ise 16-CSK modülasyonuna ait sonuçlar verilmiştir. 8-CSK modülasyonunda olduğu gibi sembol uzayındaki sembol sayısının artmasından dolayı en küçük öklid mesafesine göre hata analizi yapıldığında hatanın arttığı görülmektedir. Önerilen teorik yaklaşımda öklid mesafesi yakınındaki sembollerin de hata üzerinde etkisi dikkate alındığından doğruluğun daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin $1e - 4$ BER seviyesinde en küçük öklid mesafesine göre yapılan analizin ve önerilen analitik modelin birleşim üst sınırı ile arasında yaklaşık olarak sırasıyla 0.43 dB ve 0.07 dB’lik bir hata oluşmaktadır. Bu sonuçlar da önerilen modelin doğruluğunu göstermektedir. 4-CSK ve 8-CSK modülasyonlarında olduğu gibi önerilen yaklaşım ve benzetim sonuçlarının birleşim üst sınırı sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Verilen sonuçlardan yüksek SNR değerlerinde benzetim ve teorik sonuçların tamamen uyumlu olduğu görülmektedir. Düşük SNR değerlerinde ise her bir veri paketinde iletilen sembol sayısı ve Monte Carlo döngü sayısı artırılarak benzetim ve teorik sonuçlar arasındaki uyum artırılabilir.



Şekil 4. 16-CSK modülasyonu için BER sonuçları

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada QLED-CSK sistemi için 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK modülasyonları için analitik olarak SER analizleri yapılmış ve modeller türetilmiştir. Türetilen analitik modeller birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları ile uyum göstermiştir. Önerilen yaklaşımda sembol uzayında birbirlerine çok yakın olan sembollerin hata üzerindeki etkisi dahil edildiğinden türetilen modellerin doğruluğu en küçük öklid mesafesine göre yapılan analizlere göre daha yüksektir. Örneğin 16-CSK modülasyonu için 10^{-4} BER seviyesinde en küçük öklid mesafesine göre değerlendirilmenin ve önerilen analitik modelin birleşim üst sınırı ile arasında yaklaşık olarak sırasıyla 0.43 dB ve 0.07 dB'lik bir hata oluşmaktadır. Sonuç olarak, analitik modellerin birleşim üst sınırına uzaklıkları bir başarımlı ölçütü olarak kabul edildiğinde en küçük öklid mesafesine göre değerlendirme yapıldığında birleşim üst sınırına olan uzaklık 0.43 dB'dir. Önerilen modelin ise birleşim üst sınırına olan uzaklığı 0.047 dB'dir. Bu sonuçlardan da önerilen modelin doğruluğunun daha yüksek olduğu görülmektedir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Shannon, C., E. (1949). Communication in the Presence of Noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1), 10 – 21.
- Zukauskas, A., Vaicekuskas, R., Tuzikas, A., Petrulis, A., Stanikūnas, R., Svegzda, A., Eidikas, P. & Vitta, P. (2014). Firelight LED source: Toward a balanced approach to the performance of solid-state lighting for outdoor environments. *IEEE Photonics Journal*, 6(3).
- Han, D., Lee, K. & Lee, K. (2015). Transmitting scalable video coding using VLC with color and dimming control to assure QoS. *Information Systems*, 48, 267-273.
- Chow, C., W., Yeh, C., H., Liu, Y., F. & Liu Y. (2011). Improved modulation speed of led visible light communication system integrated to main electricity network. *Electronics Letters*, 47(15), 867-868.
- Jia, L., Wang, J. Y., Zhang, W., Chen, M. & Wang, J. B. (2015). Symbol error rate analysis for colour-shift keying modulation in visible light communication system with RGB light-emitting diodes. *IET optoelectronics*, 9(5), 199-206.
- IEEE VLC Standard. (2011). IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks–Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. *IEEE Std 802.15.7-2011*, 1-309.
- Butala, P., M., Chau, J., C. & Little, T., D., C. (2012). Metameric modulation for diffuse visible light communications with constant ambient lighting. International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW) (pp. 1-3).
- Singh, R., O’Farrell, T. & David, J. P. R. (2014). An enhanced color shift keying modulation scheme for high-speed wireless visible light communications. *Journal of Lightwave Technology*, 32(14), 2582-2592.
- Ohno, Y. (2005). Spectral design considerations for white led color rendering. *Optical Engineering*, 44(11), 111302-1-111302-9.
- Singh, R., O’Farrell, T. & David, J. P. R. (2015). Analysis of Forward Error Correction Schemes for Colour Shift Keying Modulation. Personal, Indoor, and Mobile Communications (PIMRC).
- Tuğcu, E., Albayrak, C., Yazgan, A, Şimşek, C. & Türk, K. (2018, Mayıs). Bit error rate analysis for color shift keying modulation. *26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2018* (s. 1-4). İzmir, Türkiye.
- Chiani, M., Dardari, D., & Simon, M. K. (2003). New exponential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2, 840-845.
- Zou, X. & Wang, M. (2019). Algorithm Research and Hardware Implementation of High Precision Floating Point Exponential Function. *Journal of Physics: Conference Series*, 1345(4), 042085.