

# Görünür Işık Haberleşme Sistemlerinde Renk Kaydırmalı Anahtarlama Modülasyonunun Farklı Renk Uzaylarındaki Başarım Analizleri

## Performance Analysis of Color Shift Keying Modulation in Different Color Spaces in Visible Light Communication Systems

Emin Tuğcu 

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü  
Karedeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye  
[emintugcu@ktu.edu.tr](mailto:emintugcu@ktu.edu.tr), ORCID: 0000-0001-5308-3071

### Öz

Görünür ışık haberleşme (VLC) sistemleri, görünür ışık bandında aydınlatma amaçlı olarak kullanılan ışığı eş zamanlı olarak haberleşme amaçlı olarak da kullanırlar. Yayılan ışığın insan gözünün sağlığı açısından aydınlatma şartlarını sağlaması gerekmektedir. Renk kaydırmalı anahtarlama (CSK) modülasyonu VLC sistemlerinde aydınlatma şartlarının sağlanabilmesi için IEEE 802.15.7 standardında tanımlanmıştır. Bu makalede, CSK modülasyonunun CIE 1931, CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarındaki başarım analizleri gerçekleştirilmiştir. Başarım analizleri için AWGN kanallarda birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçlarına ait bit hata oranı grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar renk uzaylarının renk kaydırmalı anahtarlama modülasyonunun başarımını etkilediğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: görünür ışık haberleşmesi, renk uzayı, renk kaydırmalı anahtarlama, birleşim üst sınırı

### Abstract

Visible light communication (VLC) systems use the light used for illumination purposes in the visible light band for communication purposes simultaneously. The emitted light should meet the lighting conditions in terms of the human eye's health. In order to meet the lighting conditions in VLC systems, Color shift keying (CSK) modulation is defined, outlined in IEEE 802.15.7. In this study, performance analyses of CSK modulation are performed in CIE 1931, CIE 1960, and CIE 1976 color spaces. The bit-error-rate graphics, comparing union bound and simulation outputs, are presented for the performance evaluation in the AWGN channel. Obtained results show that the color space has a significant effect on the performance of CSK modulation.

Keywords: visible light communication, color space, color shift keying, union bound

### 1. Giriş

Yüksek hızlı kablosuz haberleşme sistemleri, iletişim teknolojilerinde yaşanan gelişmeler sonucunda hayatımızın

temel ihtiyaçlarından birisi durumuna gelmiştir. Kablosuz haberleşme sistemlerindeki veri hızının üst sınırı iletişim bant genişliğine bağlıdır [1]. Yüksek veri hızlarına ve bant genişliğine ihtiyaç duyan uygulamalara olan talebin sürekli artması sınırlı spektruma sahip olan Radyo frekans (RF) sistemleri için önemli bir problemdir. RF sistemlerinde spektral verimlilik kazançlarında üst sınırlara ulaşıldığından veri trafiğinde yaşanan artış nedeniyle RF bandı talepleri karşılamada yetersiz kalmaktadır. RF bandında oluşan kapasite problemi araştırmacıları yeni nesil haberleşme sistemlerinin geliştirilmesi için arayışlara yöneltmiştir. Mevcut durumda kullanılan haberleşme sistemlerinin yerlerini alacak veya tamamlayıcı olarak kullanılacak haberleşme sistemlerinin geliştirilmesi taleplerin karşılanabilmesi için büyük önem arz etmektedir. RF sistemleri için tamamlayıcı nitelikte olan, görünür ışık bandını kullanan görünür ışık haberleşmesi (VLC) hem enerji verimliliği açısından hem de yüksek hızlarda haberleşmeyi sağladığından bu problemin çözümü için önemli bir aday teknolojidir [2- 4].

VLC sistemleri son yıllarda büyük ilgi görmektedir [5]. VLC teknolojisinde ortam aydınlatması ile eş zamanlı olarak bilginin iletimi de gerçekleştirilmektedir. Günlük yaşantımızın vazgeçilmez bir parçası olan ışığın, bilgi taşımak amacıyla kullanılması yenilikçi ve enerji tüketimi açısından etkin bir haberleşme teknolojisinin ortaya çıkması anlamına gelmektedir. VLC sistemlerinin RF sistemleri kadar karmaşık yapıda olmaması ve lisanslanmamış geniş bir banda sahip olmaları bu sistemlere olan ilginin hem akademi hem de endüstride her geçen gün artmasına neden olmaktadır.

Geliştirilecek yeni nesil haberleşme sistemlerinin enerji tüketimi açısından da verimli olması bir diğer önemli husustur. Günümüzde aydınlatma alanında enerji tüketiminin azaltılması konusunda önemli adımlar atılmaktadır. Örneğin, güç tüketimi yüksek olan akkor ve floresan lambaların yerini güç tüketimi düşük olan LED'ler almaya başlamıştır. Avrupa ve ABD başta olmak üzere akkor ve floresan lambalarının yasal düzenlemelerle yasaklanması sonucunda LED'lerin yakın gelecekte standart ışık kaynağı haline geleceği öngörülmektedir. VLC sistemlerinde de verici kısımda temel fonksiyonu aydınlatma olan LED'ler kullanılmaktadır [6]. LED'lerin enerji verimliliklerinin yüksek olması hem ev ve ofis aydınlatması gibi iç mekanlarda hem de sokak lambaları,

trafik lambaları ve araç ön/arka farları gibi dış mekanlarda aydınlatma alanında kullanımlarını yaygınlaştırmıştır.

VLC sistemleri yoğunluk modülasyonuna ve doğrudan algılamaya (IM/DD) dayalı sistemlerdir. İnsan gözü LED'lerin anahtarlanmasıyla oluşan ışık şiddetindeki titreşimi en az 50 Hz'e kadar algılayamamaktadır [7]. Bundan dolayı LED'ler tarafından yayılan ışığın şiddeti veya rengi insan gözünün algılayamayacağı hızda değiştirilerek aydınlatma ile eş zamanlı olarak bilgi iletimi de sağlanmaktadır. Bu durum VLC sistemlerinde iletimde kullanılan optik sinyallerin RF sistemlerinden farklı olarak pozitif ve gerçel olma zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Bundan dolayı RF sistemlerinde kullanılan tekniklerin VLC sistemlerinde değişiklikler yapılmadan kullanılması olanaksızdır.

RF bandı ile karşılaştırıldığında VLC sistemleri çok yüksek spektruma sahiptirler. VLC sistemlerinde yüksek veri hızlarına LED teknolojisindeki gelişmelerin sonucunda ulaşılmıştır. LED'lerin yüksek hızlarda anahtarlanmasıyla yüksek veri hızlarına ulaşılması ve eş zamanlı olarak sağlanması gereken aydınlatma ihtiyacı LED'ler tarafından yayılan ışığın beyaz ışık olma zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Beyaz ışığın LED'ler kullanılarak üretilmesinde temelde iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin ilkinde mavi LED'lerin yüzeyinin fosfor kaplanmasıyla beyaz ışık üretilir. Bu yöntem basit ve düşük maliyetli olmasına rağmen haberleşme açısından değerlendirildiğinde modülasyon hızı fosfor etkisinden dolayı düşüktür [8]. İkinci yöntemde ise kırmızı/mavi/yeşil (RGB) ışık yayan kromatik LED'lerin kullanılmasıyla beyaz ışık üretilmektedir. RGB LED'lerin kullanılmasıyla görünür ışık spektrumu yüksek modülasyon hızlarına sahip üç ayrı banda bölünmektedir. Her bir bandın bağımsız olarak modüle edilmesiyse yüksek veri hızlarına ulaşılmaktadır [9]. Her bir bandın bağımsız olarak modüle edilmesi ise beyaz ışığın üretilmesinde problem oluşturmaktadır [10]. Bu problemin çözümü için IEEE 802.15.7 standardında [11] VLC için tanımlanmış renk kaydırmalı anahtarlama (CSK) modülasyonu geliştirilmiştir. IEEE 802.15.7 standardı PHY I, PHY II ve PHY III olmak üzere üç fiziksel katman türünü desteklemektedir [11]. PHY I ve PHY II katmanları veri hızının düşük ve orta olduğu dış mekan uygulamaları için tasarlanmıştır. Bu katmanlar açma-kapama anahtarlama (OOK) ve değişken darbe konum modülasyonlarını (VPPM) desteklemektedirler. PHY III ise yüksek veri hızları için CSK modülasyonunu kullanmaktadır [11].

CSK modülasyonu CIE 1931 renk uzayında tanımlanmıştır. CIE 1931 renk uzayı Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) tarafından insanın renk algısının incelenmesi sonucunda 1931 yılında CIE XYZ olarak tanımlanmış ve standart haline getirilmiştir. Bu standartta, tristimulus değerleri olarak tanımlanan üç değer bir rengi tanımladığı 3 boyutlu bir renk uzayı tanımlanmıştır. Renk uzayları bütün renkleri tanımlamak için kullanılan matematiksel modellerdir ve bütün renkleri temsil edecek şekilde oluşturulurlar [12].

VLC sistemlerinde de yüksek veri hızlarına ulaşabilmek için mavi LED'lere göre 3 boyutlu renk uzayında RGB LED'lerin kullanımı daha etkin bir çözümdür [13]. RGB LED'leri kullanan CSK modülasyonu hem istenen aydınlatma şartlarının sağlanması hem de yüksek veri hızlarına ulaşmak için 3 boyutlu RGB işaret uzayında tanımlanmıştır. 3 boyutlu RGB uzayında semboller arasındaki karar bölgelerinin tam

olarak belirlenmesi karmaşık olduğundan CSK modülasyonu için bit hata oranı (BER) ifadelerini analitik olarak geliştirmek zor bir problemdir. [10] çalışmasında 3 boyutlu RGB uzayının 2 boyutlu uzaya dönüştürülmesiyle semboller arasındaki karar bölgeleri daha yüksek doğrulukla belirlenerek sembol hata oranı (SER) ve BER analizleri yapılmıştır. [14] çalışmasında 3 boyutlu RGB sembol uzayında en yakın komşu semboller arasındaki hata olasılığının hesaplanmasıyla SER analizi yapılmıştır. BER analizi ise SER ifadesinin her bir sembolün taşıdığı bit sayısına oranlanmasıyla yaklaşık olarak elde edilmiştir. [15] çalışmasında RGB uzayındaki tüm semboller arasındaki hata olasılıklarının hesaplanmasıyla birleşim üst sınırı için SER analizi yapılmıştır. [16] çalışmasında 3 boyutlu RGB sembol uzayında ağırlığı yüksek olan semboller arasındaki ikili geçiş olasılıklarının hesaplanmasıyla SER analizi yapılmıştır. [14, 17]'de CSK modülasyonun toplanır beyaz Gaussian gürültülü (AWGN) kanallarındaki BER başarımlarını analizleri gerçekleştirilmiştir.

IEEE 802.15.7 standardında CSK modülasyonu için CIE 1931 renk uzayında 9 farklı renk bandı tanımlanmıştır [11]. CSK modülasyonunun renk bantlarındaki başarımlarını analizleri [17] çalışmasında incelenmiştir. [17] çalışmasında 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK modülasyonları için benzetim çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlardan renk bantlarının CSK modülasyonunun başarımlarını etkilediği görülmektedir. Bu çalışmalarda CSK modülasyonu CIE 1931 renklilik diyagramında gerçekleştirilmiştir [18]. CIE tarafından 1960 ve 1976 yıllarında CIE 1960 ve CIE 1976 olmak üzere iki ayrı renklilik diyagramı daha yayımlanmıştır. CIE 1931 renklilik diyagramı gün ışığına yakın ortamdaki renkler için daha iyi sonuçlar verirken CIE 1960 ise karanlık ortam görüşüne daha uygundur [19]. CIE 1960 diyagramı sarı, kahverengi, turuncu ve kırmızı renkleri temsil etmek için yetersiz kaldığından CIE, 1976 yılında 1960 diyagramının koordinat formüllerini geliştirerek yeni bir diyagram daha yayımlanmıştır [20].

Literatür incelendiğinde CSK modülasyonunun bu renk uzaylarındaki başarımlarını analizlerinin gerçekleştirilmediği görülmektedir. Bu çalışmada CSK modülasyonunun CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarındaki bit hata oranı (BER) başarımlarını elde edilmiş ve renk uzaylarının CSK modülasyonunun başarımlarına etkileri incelenmiştir.

Makalenin bundan sonraki kısımlarında 2. bölümde CSK modülasyonu ve demodülasyonu genel hatlarıyla açıklanmıştır. 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK modülasyonları için SER ve BER analizleri yapılmıştır. 3. bölümde CSK modülasyon türlerine ait AWGN kanallarda elde edilen birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları irdelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. CSK Modülasyonu ve Demodülasyonu

CSK modülasyonu IEEE 802.15.7 standardında VLC sistemleri için geliştirilen bir modülasyon türüdür. Çok renkli kromatik LED'ler kullanılarak gerçekleştirilir. Aydınlatma şartlarının sağlanabilmesi ve göz sağlığı açısından renk bantlarından yayılan toplam ışık yoğunluğunun sabit olması gerekmektedir.

VLC sistemlerinde iletilen işaretle kısıtlamalar mevcuttur. İşaretin iletimi için LED'lerden yayılan ışığın şiddeti ve rengi değiştirildiği için iletilen işaret vektörü pozitif

değerli olmak zorundadır.  $A = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$  olmak üzere  $M$  sembolük CSK sisteminde veri ilk olarak renk kodlaması sonucunda  $s_i$  sembolleri ile eşleştirilir.  $s_i = [p_r, p_g, p_b]^T$  iletilen işaret vektörünün pozitif olma zorunluluğundan dolayı (1) denklemi ile verilen şartları sağlanmalıdır.

$$p_r \geq 0, p_g \geq 0, p_b \geq 0 \quad (1)$$

Burada  $p_r, p_g$  ve  $p_b$  sırasıyla kırmızı, yeşil ve mavi iletim renk bantlardaki ışık yoğunluğunu göstermektedir. Kırpışma etkisinin önlenmesi için LED'lerden yayılan işaretin optik gücü (2) denkleminde verildiği gibi bir sembol süresince sabit kalmalıdır.

$$p_r + p_g + p_b = P_T \quad (2)$$

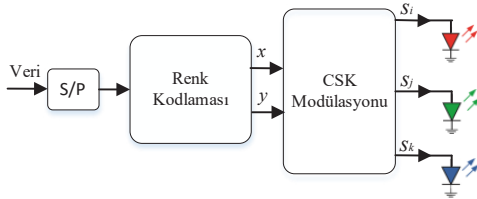
Burada  $P_T$  dimming şartlarına göre değişmektedir. CSK modülasyonu CIE 1931 renk uzayında [18] uluslararası aydınlatma komisyonu tarafından tanımlanan x-y renk koordinatları kullanılarak gerçekleştirilir. CIE 1931 renklilik diyagramı x-y düzleminde farklı dalga boylarındaki renklerin dağılımını gösterir. Tanımlanan renk uzayında tüm renkler kromatik değerlerine karşılık gelen x-y koordinatları ile temsil edilirler. CIE 1960 renklilik diyagramı u-v düzleminde tanımlanmıştır. CIE 1931 diyagramındaki bir noktanın CIE 1960 diyagramı üzerindeki karşılığı (3) denklemi ile verilmiştir [19].

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3}, v = \frac{6y}{-2x+12y+3} \quad (3)$$

CIE 1976 renksellik diyagramı ise  $u' - v'$  düzleminde tanımlanmıştır [20]. CIE 1931 diyagramındaki bir noktanın CIE 1976 diyagramı üzerindeki karşılığı (4) denklemi ile verilmiştir [20].

$$u' = \frac{4x}{-2x+12y+3}, v' = \frac{9y}{-2x+12y+3} \quad (4)$$

Şekil 1' de CSK sistemine ait verici blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 1: CSK verici blok diyagramı

Örnek olarak CIE 1931 renk uzayı için verici tarafta ilk olarak ikili veri, renk kodlaması sonucunda x-y kromatik değerleri ile tanımlanan  $M$  seviyeli sembollere dönüştürülür. Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3' te CIE 1931, CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarında 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK modülasyonları için kromatik değerler verilmiştir.

Tablo 1: 4-CSK modülasyonu kromatik değerleri

| Bant Merkezi  | Sembollerin kromatik değerleri |                  |                  |
|---------------|--------------------------------|------------------|------------------|
|               | 4-CSK (CIE 1931)               | 4-CSK (CIE 1960) | 4-CSK (CIE 1976) |
| (0.734 0.265) | (0.402 0.597)                  | (0.172 0.383)    | (0.172 0.574)    |
| (0.402 0.597) | (0.435 0.290)                  | (0.310 0.310)    | (0.310 0.465)    |
| (0.169 0.007) | (0.169 0.007)                  | (0.246 0.015)    | (0.246 0.023)    |
|               | (0.734 0.265)                  | (0.623 0.337)    | (0.623 0.506)    |

Tablo 2: 8-CSK modülasyonu kromatik değerleri

| Bant Merkezi  | Sembollerin koordinat değerleri |                  |                  |
|---------------|---------------------------------|------------------|------------------|
|               | 8-CSK (CIE 1931)                | 8-CSK (CIE 1960) | 8-CSK (CIE 1976) |
| (0.734 0.265) | (0.324 0.400)                   | (0.181 0.336)    | (0.181 0.503)    |
|               | (0.297 0.200)                   | (0.247 0.250)    | (0.247 0.375)    |
|               | (0.579 0.329)                   | (0.400 0.341)    | (0.400 0.511)    |
|               | (0.402 0.597)                   | (0.452 0.136)    | (0.485 0.328)    |
|               | (0.169 0.007)                   | (0.402 0.597)    | (0.172 0.574)    |
|               |                                 | (0.169 0.007)    | (0.246 0.015)    |
|               |                                 | (0.513 0.486)    | (0.263 0.374)    |
|               |                                 | (0.734 0.265)    | (0.623 0.337)    |

Tablo 3: 16-CSK modülasyonu kromatik değerleri

| Bant Merkezi  | Sembollerin koordinat değerleri |                   |                   |
|---------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
|               | 16-CSK (CIE 1931)               | 16-CSK (CIE 1960) | 16-CSK (CIE 1976) |
| (0.734 0.265) | (0.402 0.597)                   | (0.172 0.383)     | (0.172 0.574)     |
|               | (0.413 0.495)                   | (0.204 0.366)     | (0.204 0.549)     |
|               | (0.335 0.298)                   | (0.227 0.303)     | (0.227 0.454)     |
|               | (0.324 0.400)                   | (0.181 0.336)     | (0.181 0.503)     |
|               | (0.623 0.376)                   | (0.398 0.360)     | (0.398 0.540)     |
|               | (0.513 0.486)                   | (0.263 0.374)     | (0.263 0.560)     |
|               | (0.435 0.290)                   | (0.310 0.310)     | (0.310 0.465)     |
|               | (0.402 0.597)                   | (0.524 0.384)     | (0.320 0.527)     |
|               | (0.169 0.007)                   | (0.734 0.265)     | (0.623 0.506)     |
|               |                                 | (0.169 0.007)     | (0.246 0.015)     |
|               |                                 | (0.247 0.204)     | (0.199 0.247)     |
|               |                                 | (0.258 0.101)     | (0.279 0.164)     |
|               |                                 | (0.546 0.179)     | (0.538 0.265)     |
|               |                                 | (0.634 0.273)     | (0.506 0.327)     |
|               |                                 | (0.446 0.187)     | (0.410 0.258)     |
|               |                                 | (0.357 0.093)     | (0.420 0.164)     |

Sembollere ait x-y kromatik değerleri elde edildikten sonra R, G, B kanallarına ait optik güç yoğunlukları (5-7) denklemleri ile elde edilirler [21].

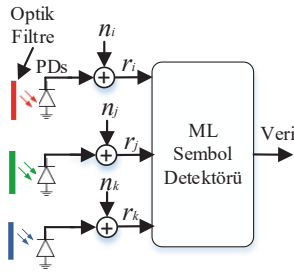
$$x = p_r x_i + p_g x_j + p_b x_k \quad (5)$$

$$y = p_r y_i + p_g y_j + p_b y_k \quad (6)$$

$$p_r + p_g + p_b = P_T \quad (7)$$

Denklem sisteminde yer alan  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$  ve  $(x_k, y_k)$  CSK sisteminde kullanılan ışık kaynaklarının merkez dalga boylarının kromatik değerlerine karşılık gelir. Her bir sembole ait hesaplanan  $[p_r, p_g, p_b]$  yoğunluk bilgileri işaret uzayında  $s_i = [p_r, p_g, p_b]^T$  ( $0 \leq i \leq M - 1$ ) olmak üzere 3-boyutlu RGB işaret uzayında sembolleri oluştururlar. CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzayları için de R, G, B kanallarına ait optik güç yoğunlukları benzer şekilde elde edilirler.

Şekil 2' de CSK sistemine ait alıcı blok diyagramı görülmektedir. VLC sistemlerinde alıcı tarafta foto-detektörler (PDs) kullanılır. Foto-detektörler tarafından alınan optik işaret elektriksel işarete dönüştürülür. Haberleşme kanalı AWGN kanal olarak modellendiğinde alıcı tarafta alınan işaret (8) ile verilmiştir.



Şekil 2: CSK alıcısı yapısı

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{s}_i + \boldsymbol{\eta}_i \quad (8)$$

Burada  $\boldsymbol{\eta}_i = [\eta_r, \eta_g, \eta_b]^T$  olmak üzere her bir bileşenin varyansı  $\sigma^2$  olan beyaz gürültüdür. Alınan işaret  $\mathbf{r}_i = [\hat{p}_r, \hat{p}_g, \hat{p}_b]^T$ , den 3-boyutlu işaret uzayında iletilen sembolere (9)'da verildiği gibi en büyük olabilirlik (ML) sezici ile en küçük öklid mesafesine göre karar verilir.

$$\bar{s} = \arg \min_{s_i \in A} \|\mathbf{r}_i - \mathbf{s}_i\|_2 \quad (9)$$

Burada A 3-boyutlu uzayda M seviyeli CSK sembollerinden oluşan kümeye karşılık gelir. Son olarak karar verilen semboller  $\bar{s}$  ikili veriye dönüştürülür.

### 2.1.1. BER ve SER Analizi

Bu kısımda CSK modülasyonunun AWGN kanallarında SER ve BER analizi yapılmıştır. M seviyeli bir işaret uzayında SER ifadesi (10) ile verilir.

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{j \neq i}^M Q \left( \sqrt{\frac{D(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j)^2}{2N_0}} \right) \quad (10)$$

Burada  $D(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j)$  terimi  $\mathbf{s}_i$  sembolü ile  $\mathbf{s}_j$  sembolü arasındaki öklid mesafesine karşılık gelir ve (11) ile hesaplanır.

$$D = \|\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j\|_2 \quad (11)$$

Denklem (10)'da  $N_0$  ise AWGN gürültünün tek yanlı güç spektral yoğunluğuna karşılık gelir. 4-CSK modülasyonu için CIE 1931, CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarındaki elde edilen SER ifadeleri sırasıyla (12), (13) ve (14) ile verilmiştir.

$$P_s = 0.5Q \left( \frac{0.8157}{\sqrt{2N_0}} \right) + Q \left( \frac{0.817}{\sqrt{2N_0}} \right) + 1.5Q \left( \frac{1.4142}{\sqrt{2N_0}} \right) \quad (12)$$

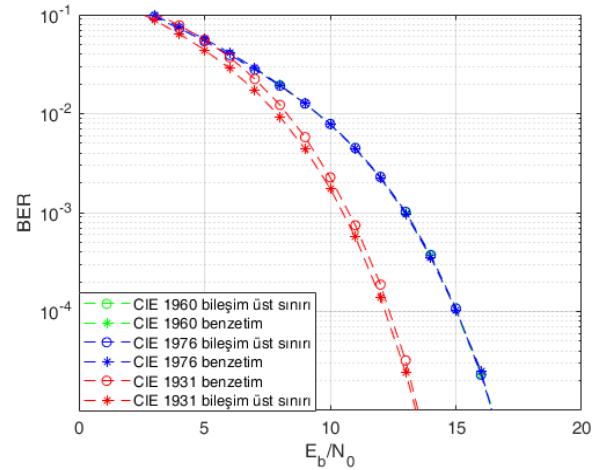
$$P_s = 0.5Q \left( \frac{0.547}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{0.924}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.045}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.412}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.413}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.414}{\sqrt{2N_0}} \right) \quad (13)$$

$$P_s = 0.5Q \left( \frac{0.548}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{0.924}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.044}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.412}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.413}{\sqrt{2N_0}} \right) + 0.5Q \left( \frac{1.414}{\sqrt{2N_0}} \right) \quad (14)$$

8-CSK ve 16-CSK modülasyonları için de SER ifadeleri (10) kullanılarak benzer şekilde hesaplanabilir. (13) ve (14)' den 4-CSK modülasyonu için CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarındaki başarımın yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. BER analizi ise (10) ile verilen sembol hata olasılığının her sembolün taşıdığı bit sayısına oranıyla elde edilmiş ve (15) ile verilmiştir [14].

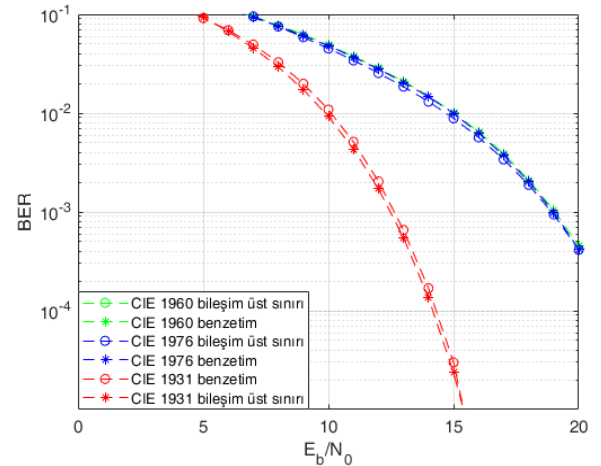
$$P_b = \frac{P_s}{\log_2 M} \quad (15)$$

Şekil 3' de 4-CSK modülasyonuna ait birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları verilmiştir. Verilen sonuçlardan birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Başarım sonuçları incelendiğinde renk uzaylarının CSK modülasyonun başarımına etkisi olduğu görülmektedir. CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzayında 4-CSK modülasyonun başarımının (13) ve (14) ile uyumlu olarak yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. CIE 1931 ile CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzayları arasında ise önemli bir başarım farkı görülmektedir. CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarında semboller arasındaki öklid mesafelerinin azalması başarımı düşürmektedir.  $1e-3$  hata seviyesinde BER başarımında yaklaşık olarak 2.5 dB fark oluşmaktadır.



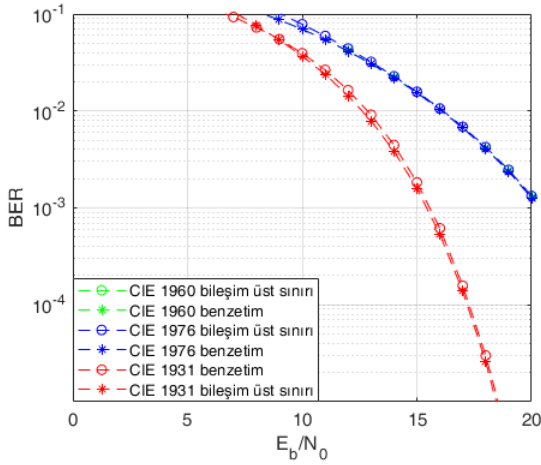
Şekil 3: 4-CSK modülasyonu için BER değişimleri

Şekil 4' te 8-CSK modülasyonuna ait birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları görülmektedir. Verilen sonuçlardan birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. 4-CSK modülasyonunda olduğu gibi 8-CSK modülasyonun da CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarında başarımının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. CIE 1931 ile CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzayları arasında  $1e-3$  hata seviyesinde yaklaşık olarak başarımında 6 dB fark oluşmaktadır.



Şekil 4: 8-CSK modülasyonu için BER değişimleri

Şekil 5' te ise 16-CSK modülasyonuna ait birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları görülmektedir. Verilen sonuçlardan birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. 4-CSK ve 8-CSK modülasyonunda olduğu gibi CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarında başarımların yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Modülasyon derecesi yükseldikçe aynı işaret gürültü oranı seviyesinde işaret uzayında semboller arasındaki öklid mesafelerin azalması beklendiği gibi başarımın azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 5: 16-CSK modülasyonu için BER değişimleri

### 3. Sonuçlar

Bu çalışmada VLC sistemleri için 802.15.7 standardında tanımlanan CSK modülasyonun farklı renk uzaylarındaki başarımların analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda CIE 1931, CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarında 4-CSK, 8-CSK ve 16-CSK modülasyonları için AWGN kanallarda birleşim üst sınırı ve benzetim sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan renk uzaylarının CSK modülasyonunun başarımı üzerinde etkisi olduğu görülmektedir. CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarında benzetim ve birleşim üst sınırı sonuçlarından CSK modülasyonun başarımının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. 4-CSK modülasyonu için CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzayları arasında  $1e-3$  hata seviyesinde BER başarımında yaklaşık olarak 2.5 dB fark oluşmaktadır. Aynı hata seviyesinde 8-CSK modülasyonunda ise başarımında yaklaşık olarak 6 dB fark oluşmaktadır. CIE 1931 renk uzayından CIE 1960 ve CIE 1976 renk uzaylarına dönüşüm işlemi bu renk uzaylarında CSK modülasyon türlerinde semboller arasındaki öklid mesafelerinin azalmasına neden olduğundan başarımı düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

### 4. Kaynaklar

[1] C. E. Shannon, "Communication in the Presence of Noise", Proceedings of the IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10 - 21, 1949.  
[2] Z. Ghassemlooy, L. N. Alvez, S. Zvanovec, M.A. Khalighi, Visible Light Communications: Theory and Applications, CRC Press, 2017.  
[3] T. Komine, M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights",

IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 100 - 107, 2004.  
[4] A. Yeşilkaya, F. Miramirkhani, H. F. Alsan, E. Başar, "Görünür Işık Kanallarının Modellenmesi ve Optik OFDM için Başarım Analizi", EMO Bilimsel Dergi, vol. 5, no. 9, pp.18-29, 2015.  
[5] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, P. Mohapatra, "Visible light communication and sensing: survey, potential and challenges" IEEE Communication Survey & Tutorials, vol. 17, no. 4, pp. 2047 - 2076, 2015.  
[6] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, "Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art", IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 9, pp. 56 - 63, 2011.  
[7] D. Han, K. Lee, K. Lee, "Transmitting scalable video coding using VLC with color and dimming control to assure QoS", Information Systems, vol. 48, pp. 267 - 273, 2015.  
[8] C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. F. Liu, Y. Liu, "Improved modulation speed of LED visible light communication system integrated to main electricity network", Electronics Letters, vol. 47, no. 15, pp. 867 - 868, 2011.  
[9] G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, E. Ciaramella, "3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED", Optics Express, vol. 20, no. 26, pp. B501 - B506, 2012.  
[10] L. Jia, J. Y. Wang, W. Zhang, M. Chen, J. B. Wang, "Symbol error rate analysis for colour-shift keying modulation in visible light communication system with RGB light-emitting diodes", IET Optoelectronics, vol. 9, no. 5, pp. 199 - 206, 2015.  
[11] "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, 2011.  
[12] İ. Yılmaz, M. Güllü, T. Baybura, A. O. Erdoğan, "Renk Uzayları ve Renk Dönüşüm Programı (RDP)", Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Dergisi, vol. 2, no. 2, pp. 19-35, 2002.  
[13] Y. Wang, X. Huang, L. Tao, J. Shi, N. Chi, "4.5-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization", Optics Express, vol. 23, no. 10, pp.13626 - 13633, 2015.  
[14] R. Singh, T. O'Farrell, J. P. R. David, "An Enhanced Color Shift Keying Modulation Scheme for High-Speed Wireless Visible Light Communications", Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 14, pp.2582 - 2592, 2014.  
[15] R. Singh, T. O'Farrell, J. P. R. David, "Analysis of forward error correction schemes for colour shift keying modulation", 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 575-579, 2015.  
[16] E. Tuğcu, C. Albayrak, A. Yazgan, K. Turk, "Renk Kaydırmalı Anahtarlama Modülasyonu için Bit Hata Oranı Analizi", 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 1-4, 2018.

- [17] R. Singh, T. O'Farrell and J. P. R. David, "Performance evaluation of IEEE 802.15.7 CSK physical layer", IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), pp. 1064 - 1069, 2013.
- [18] CIE, "Commission Internationale de l'Eclairage Proc." 1931.
- [19] D. B. Judd, G. T. Yonemura, "CIE 1960 UCS Diagram and the Müller Theory of Color Vision", Journal of Research of the National Bureau of Standards: Physics and Chemistry, vol. 74A, no. 1, pp. 23 - 30, 1969.
- [20] J. Schanda, M. Danyi, "Correlated Color-Temperature Calculations in the CIE 1976 Chromaticity Diagram ", Color Research and Application, vol. 2, no. 4, pp. 161 - 163, 1977.
- [21] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu and P. Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, pp. 2047 - 2077, 2015.

### Özgeçmiş



**Emin Tuğcu**, lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Aynı üniversitede Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Haberleşme sistemlerinin analizleri ve işaret işleme alanlarında eğitim-öğretim ve araştırma faaliyetlerinde bulunmaya devam etmektedir.