

# Kapalı Mekan Görünür Işık Haberleşmesi için CSK Modülasyonunun Çokyollu Kanal Şartlarında İncelenmesi

Mehmet Ali Küçük<sup>\*◇</sup>, Kadir Türk\*, Cenk Albayrak\*

<sup>\*</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, <sup>◇</sup>Gümüşhane Üniversitesi

{mehmetalikucuk, kadir, albayrak.cenk}@ktu.edu.tr

## ÖZET

Görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC), görünür banttaki ışığı aydınlatmanın yanında haberleşme için de kullanan bir teknolojidir. VLC'nin kırmızı-yeşil-mavi ışık yayan diyotlar (RGB LED'ler) üzerinden kapalı mekanlarda kullanılması durumunda aydınlatma şartlarının sağlanabilmesi için IEEE 802.15.7 standardı renk kaydırmalı anahtarlama (Color Shift Keying, CSK) modülasyonunu tanımlamıştır. CSK modülasyonunun kapalı mekanlarda yüksek anahtarlama hızlarında uygulanması, simgeler arası girişimin (ISI) baskın hale gelmesine neden olmaktadır. Diğer taraftan kapalı mekanın içerisinde beyazdan farklı renkte nesnelerin bulunması durumu, alıcı tarafta renk dengesizliklerini meydana getirmektedir. Bu çalışmada, aydınlatma şartlarının sağlandığı kapalı mekan VLC-CSK sistemlerinde, sistem başarımını olumsuz yönde etkileyen ISI ve renk dengesizliği problemleri incelenmiş olup, sistem başarımını iyileştirmek amacıyla yeni bir kanal denkleştirici yapısı önerilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, önerilen denkleştirici yapısının ISI ve renk dengesizliği problemlerine etkili bir çözüm sunduğunu göstermiştir.

## 1 GİRİŞ

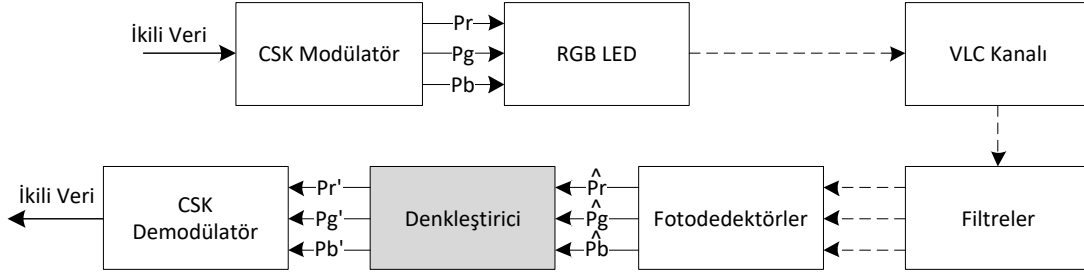
Görünür ışık haberleşmesi (Visible Light Communication, VLC), yaklaşık olarak 400 THz'lik oldukça geniş lisanssız bir bandı kullanabilen, elektromanyetik girişime neden olmayan, düşük maliyetli, az enerji tüketen ve yüksek veri güvenliğine sahip haberleşme sistemlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan bir teknolojidir. Bu özelliklerinden dolayı VLC, mevcut sistemler için iyi bir alternatif olabilecek ya da tamamlayıcı rol üstlenebilecek bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [1, 2, 3].

VLC sistemleri, verici olarak LED'lerin, alıcı olarak ise foto-dedektörlerin kullanıldığı ve LED'lerin çok hızlı anahtarlama sonucunda hem aydınlatmanın hem de haberleşmenin gerçekleştirilebildiği sistemlerdir. Özellikle oda içi haberleşme uygulamalarında, IEEE 802.15.7 standardına [4] göre VLC sistemlerinin, haberleşme ile birlikte aydınlatma şartlarını da (sabit renk ve sabit şiddet) sağlaması gerekmektedir. Aydınlatma için genellikle tercih edilen beyaz

renkli ışık LED'ler kullanılarak iki farklı yöntem ile üretilmektedir. Birinci yöntemde mavi LED'lerin üzeri fosfor ile kaplanarak beyaz ışık elde edilmektedir. Fakat bu yöntemde fosfor etkisinden dolayı anahtarlama hızı birkaç MHz ile sınırlıdır [2]. İkinci yöntemde ise kırmızı, yeşil ve mavi ışık yayan RGB LED'lerin birlikte kullanılması ile beyaz ışık elde edilir. RGB LED'ler kullanılarak aydınlatma şartlarının sağlanabilmesi amacıyla IEEE 802.15.7 standardında renk kaydırmalı anahtarlama (Color Shift Keying, CSK) modülasyonu tanımlanmıştır [4]. Bu modülasyonda RGB LED'ler ile üç banda ayrılan ışık spektrumu, bu bantların birbirine bağımlı bir şekilde modüle edilmesi ile birlikte haberleşme sonucundaki görünür ışığın sabit şiddetli ve istenilen sıcaklıkta beyaz renkli olması sağlanmaktadır.

Verici olarak kullanılan LED'lerin Elektrik-Optik (E-O) bant genişlikleri haberleşme hızı açısından büyük önem taşımakta olup, E-O bant genişliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır [5, 6, 7]. Bant genişliğindeki bu artış haberleşme hızını olumlu yönde etkilese de yüksek hızlara çıkıldıkça çok yolluluğun, yani semboller arası girişimin (Intersymbol Interference, ISI) etkisi artmaktadır [8]. Buna ek olarak, CSK modülasyonu gibi haberleşmenin farklı kanallardan paralel olarak gerçekleştirildiği bir sistemde, kanallar arasında oluşabilecek dengesizlikler haberleşme performansını olumsuz açıdan etkileyecektir [9]. Kapalı mekan VLC-CSK sistemlerinde odanın duvar rengi, R, G ve B kanallarını farklı şekillerde etkileyecek olup, bunun sonucunda ise kanal dengesizliği ortaya çıkabilecektir. Dolayısıyla, CSK modülasyonu kullanılarak yüksek haberleşme hızlarına çıkılabilmesi ve pratik uygulamalarının gerçekleştirilmesi için ISI ve çoklu renk dengesizliği problemlerinin çözülmesi gerekmektedir.

ISI etkisini ortadan kaldırabilmek için radyo frekansı haberleşme sistemlerinde kullanılan dikgen frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) ve denkleştirici (equalizer) yöntemlerinin, VLC sistemlerine uygulanabilir hale getirilmesi gerekmektedir. OFDM tekniğinin VLC sistemlerinde kullanılabilmesi için optik dikgen frekans bölmeli çoğullama (Optical OFDM, O-OFDM) yöntemi [10] geliştirilmiştir. Fakat, bu yöntemin CSK modülasyonuna uygulanmasında temel bir problem bulunmaktadır. OFDM tekniğinde kullanılan ters hızlı fourier dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) işlemi sonucunda oluşan rastgele semboller nedeniyle, VLC-CSK sistemleri için gerekli



Şekil 1: CSK-Denkleştirici sistemi blok diyagramı

olan aydınlatma şartları sağlanamamaktadır. O-OFDM yönteminin CSK ile kullanımına yönelik yapılan [11] numaralı çalışmada aydınlatma şartları sembol sayısı çok olan CSK modülasyonlarında sağlanmasına rağmen 4-CSK ve 8-CSK'da sağlanamadığı rapor edilmiştir. Denkleştirici kullanımında ise kanalın bozucu etkileri alıcı tarafta doğrusal (Linear) veya karar geri beslemeli (Disicion Feedback, DFE) gibi farklı yapılar ve bu yapılar ile kullanılan farklı algoritmalar yardımıyla giderilmeye çalışılmaktadır [12]. Bu yöntemde işlemler alıcı tarafta gerçekleştirildiğinden dolayı hem CSK modülasyonunu sağlamış olduğu aydınlatma şartları korunmakta hem de kanalın bozucu etkileri düzeltilenmektedir. Yapılan literatür araştırmalarında CSK modülasyonu için denkleştirici kullanımının ve çoklu renk dengesizliği etkilerinin incelenmediği görülmüştür.

Bu çalışmada, kapalı mekan VLC-CSK sistemlerinde ISI ve çoklu renk dengesizliği etkileri incelenmiş olup, söz konusu bozucu etkileri ortadan kaldırabilmek için CSK'ya uygun olarak LMS ve RLS algoritmalarını kullanan karar geri beslemeli bir denkleştirici yapısı önerilmiştir. Anahtarlama hızları ISI'ya neden olacak kadar yüksek seçilerek, duvarları farklı renklerde olan kapalı mekanlar için benzetim çalışmaları yapılmış ve önerilen denkleştirici yapısının başarımları elde edilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde sırasıyla önerilen sistem modeli, yapılan benzetim çalışmaları ve elde edilen sonuçlar verilmiş olup, son bölümde ise sonuçlar irdelenmiştir.

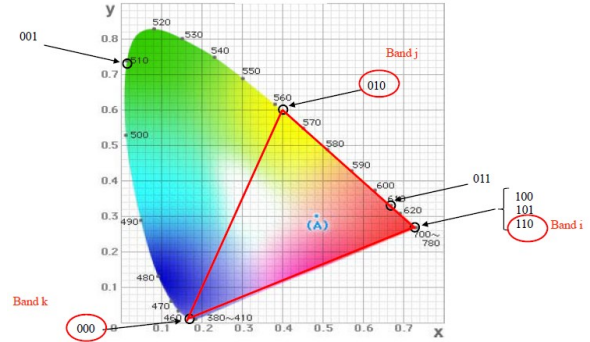
## 2 SİSTEM MODELİ

Bu bölümde ilk olarak CSK modülasyonu genel hatlarıyla anlatılmış, daha sonra oluşturulan kanal modeli açıklanmış ve son olarak önerilen denkleştirici yapısı anlatılmıştır. CSK modülasyonu ile birlikte kullanılması önerilen denkleştiricili sistemin blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.

### 2.1 CSK MODÜLASYONU

IEEE standardına göre [4] görünür ışık spektrumu 7 farklı banda bölünmüştür. CSK modülasyonunda aydınlatma şartlarının sağlanabilmesi için bu badların

9 farklı kombinasyonu kullanılabilir. Kullanılan kombinasyona göre farklı sıcaklıkta beyaz renkler oluşur. Şekil 2'de standartta belirtilen örnek bir bant kombinasyonu verilmiştir.



Şekil 2: IEEE standardında CSK için belirtilen (110, 010, 000) bant kombinasyonu [4]

CSK sembolleri seçilen kombinasyona göre oluşan üçgenin içerisine semboller arasındaki minimum öklid mesafesi maksimum olacak şekilde yerleştirilir. CIE 1931 renk uzayında M seviyeli sembol noktaları belirlendikten sonra (1), (2) ve (3) kullanılarak R, G ve B kanallarına ait optik güç yoğunluğu bilgisi elde edilir.

$$x = P_r x_r + P_g x_g + P_b x_b \quad (1)$$

$$y = P_r y_r + P_g y_g + P_b y_b \quad (2)$$

$$1 = P_r + P_g + P_b \quad (3)$$

Optik güç yoğunluğu bilgisi elde edildikten sonra gönderilecek semboller  $s_l = [P_r, P_g, P_b]^T$ , ( $0 \leq l \leq M$ ) şeklinde gösterilebilir. 8-CSK modülasyonunda örnek bir bant kombinasyonu için oluşan sembollerin optik güç yoğunluğu bilgileri Tablo 1'de görülmektedir. Bu sembolere göre oluşan veri RGB LED'ler aracılığıyla VLC kanal üzerinden alıcı sisteme gönderilirler.

Tablo 2. Simülasyon çalışmalarında kullanılan parametreler

Veri	(x; y)	$P_r$	$P_g$	$P_b$
000	0,324; 0,400	0	0,666	0,334
001	0,297; 0,200	0,111	0,279	0,610
010	0,579; 0,329	0,610	0,279	0,111
011	0,452; 0,136	0,5	0	0,5
100	0,402; 0,597	0	1	0
101	0,169; 0,007	0	0	1
110	0,513; 0,486	0,334	0,666	0
111	0,734; 0,265	1	0	0

Gerçekleştirilen simülasyonlarda ikili veri doğrudan optik güç yoğunluğuna dönüştürülerek modülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

## 2.2 VLC KANAL MODELİ

VLC kanal modeli John R. Barry modeline göre oluşturulmuştur [13]. Bu modele göre oluşturulacak kanalın birim vuruş tepkesi (4)'de verildiği gibidir.

$$h(t) = \sum_{n=1}^{N_{LED}} \sum_{k=1}^{\infty} h^{(k)}(t, \Phi_n) \quad (4)$$

Burada  $N_{LED}$  toplam LED sayısını,  $h^{(k)}$  ise n. LED'in k. yansımalarının tepkesini vermektedir.  $h^{(k)}$  denklem (5) yardımıyla hesaplanır [13].

$$h^{(k)}(t, \Phi_n) = \int_S \left[ L_1 L_2 \dots L_{k+1} \Gamma_n^{(k)} \times \right. \quad (5)$$

$$\left. \text{rect} \left( \frac{\theta_{k+1}}{FOV} \right) \delta \left( t - \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_{k+1}}{c} \right) \right] dA_{ref}, k \geq 1$$

Denklemden yer alan  $L_k$  yol kayıplarını,  $\Gamma_n^{(k)}$  yansımaya kayıplarını,  $\theta_{k+1}$  yansıyan gelen ışının fotodetektöre geliş açısını,  $FOV$  fotodetektörün görüş açısını,  $d_k$  ise yansımaya noktaları arasındaki mesafeyi temsil etmektedir.

Haberleşmenin yapılacağı odanın duvarlarının fiziksel özellikleri yansımaya kayıplarını etkilemektedir. Bu kayıplar (6) numaralı denklemden verildiği gibi hesaplanır [13].

$$\Gamma_n^{(k)} = \int_{\lambda} \Phi_n(\lambda) \rho_1(\lambda) \rho_2(\lambda) \dots \rho_k(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Burada  $\Phi_n(\lambda)$  LED'in dalga boyuna göre yaydığı güç miktarı,  $\rho_k(\lambda)$  ise yansıtıcı cisimlerin dalga boyuna göre yansıtma miktarıdır.

Kanal modelleri Tablo 2'de yer alan parametrelere göre oluşturulmuştur.

Tablo 2. Simülasyon çalışmalarında kullanılan parametreler

Parametreler	Beyaz Oda	Sarı Oda	Yeşil Oda
Oda Boyutları	8x6x3m		
Alçı Yüksekliği	0,8m		
LED Sayısı	6 adet 3x3 LED armatür		
LED	XLamb XM-L Color [14]		
Filtreler	BrightLine bandpass filtre [15, 16, 17]		
Yansımaya Sayısı	2		
Duvar Rengi	Beyaz Alçı	Sarı [18]	Yeşil [19]

Tabloda görüldüğü gibi oda modelleri sadece duvar rengi açısından farklıdır ve bu durum John R. Barry modeline göre sadece yansımaya kayıpları açısından farklılık oluşturur. Bu nedenle hesaplamaları kolaylaştırmak için CSK modülasyonunda kullanılacak beyaz, sarı ve yeşil oda modellerinin kırmızı, yeşil ve mavi kanal tepkeleri, Barry modeline göre beyaz LED ve beyaz renkli duvar kullanılarak oluşturulan kanal tepkesi [3] üzerinden (7), (8), (9) ve (10) bağıntıları yardımıyla elde edilmiştir.

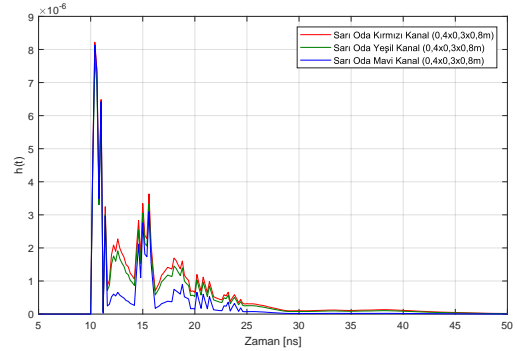
$$h_c^{(0)} = h_w^{(0)} \int_{\lambda} \frac{\Phi_{rgb} \rho_c \rho_f}{\Phi_w} d\lambda \quad (7)$$

$$h_c^{(1)} = h_w^{(1)} \int_{\lambda} \frac{\Phi_{rgb} \rho_c \rho_f}{\Phi_w \rho_w} d\lambda \quad (8)$$

$$h_c^{(2)} = h_w^{(2)} \int_{\lambda} \frac{\Phi_{rgb} \rho_{cort} \rho_f}{\Phi_w \rho_{wort}} d\lambda \quad (9)$$

$$h_c(t) = h_w^{(0)} + h_w^{(1)} + h_w^{(2)} \quad (10)$$

Burada  $h_w^{(n)}$  Barry modeline göre hesaplanmış kanal için,  $h_c^{(n)}$  hesaplanacak kanallar için n. yansımaya durumundaki kanal tepkesini;  $\rho_f$  kullanılan filtrenin geçirgenliğini;  $\rho_w$  hesaplanmış modeldeki duvarın,  $\rho_c$  hesaplanacak modeldeki duvarın yansımaya katsayısını;  $\rho_{wort}$  hesaplanmış modeldeki,  $\rho_{cort}$  ise hesaplanacak modeldeki iki yansımaya durum için ışınların izledikleri yolların yansımaya kayıplarının ağırlıklı ortalamasını temsil etmektedir. Buna göre oluşturulan sarı oda modelinin örnek bir kanal tepkesi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3: RGB kanal tepkeleri (0,4x0,3x0,8 konumunda)

Görüldüğü gibi duvarların sarı renkli olması mavi kanalın daha çok zayıflamasına ve bunun sonucunda kanallar arası dengesizliğin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca örnek olarak verilen kanal tepkesinde kanalın gönderilen işareti yaklaşık olarak 35ns yaydığı görülmektedir. Bu durumda 28,5MHz anahtarlama hızının üzerine çıktığında ISI etkisi görülmeye başlayacaktır.

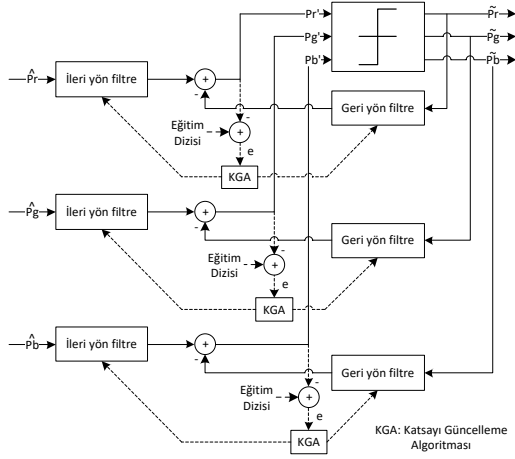
Bu durumda oluşturulan modeldeki örnek noktada 28,5MHz anahtarlama hızının altındaki haberleşmede VLC kanalı AWGN kanal gibi davranır. AWGN kanal etkisi olduğu durumda alınan işaret (11)'de verildiği gibidir.

$$\hat{s} = \begin{bmatrix} \hat{P}_r \\ \hat{P}_g \\ \hat{P}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_r \\ P_g \\ P_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_r \\ \eta_g \\ \eta_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

Burada  $\hat{s}$  alınan işaret,  $\eta_r$ ,  $\eta_g$  ve  $\eta_b$  ise her birinin varyansı  $\sigma^2$  olan beyaz gürültüdür. Anahtarlama hızı 28,5MHz'in üzerine çıktığında ise ISI etkisinden dolayı alınan işaret (12)'de verildiği gibi hesaplanmalıdır [12].

$$\hat{s}_i = \begin{bmatrix} \hat{P}_r \\ \hat{P}_g \\ \hat{P}_b \end{bmatrix} = \sum_{k=0}^{n-1} h_k s_{i-k} + \begin{bmatrix} \eta_r \\ \eta_g \\ \eta_b \end{bmatrix} \quad (12)$$

Burada  $\hat{s}_i$  alınan i. sembol,  $h_k$  ise kanal katsayılarıdır.



Şekil 4: CSK Denkleştirici yapısı

### 2.3 DENKLEŞTİRİCİ YAPISI

Denkleştiriciler kanalın oluşturduğu bozucu etkilerin giderilmesi için oluşturulmuştur. CSK modülasyonu için önerilen denkleştirici yapısı Şekil 4’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan karar geri beslemeli denkleştiricinin çıkışındaki işaret (13) numaralı denklemde vermiştir [12].

$$s_i' = \begin{bmatrix} P_r' \\ P_g' \\ P_b' \end{bmatrix} = \sum_{k=0}^{N_1} c_k \hat{s}_{i-k} + \sum_{k=-N_2}^{-1} c_k \tilde{s}_{i-k} \quad (13)$$

Burada  $N_1 + 1$  ve  $N_2$  sırasıyla denkleştiricinin ileri yön ve geri yön filtrelerinin dal sayısı,  $c_k$  denkleştirici katsayıları,  $\tilde{s}_i$  ise denkleştirici çıkışındaki  $i$ . sembolün kestirilmiş halidir. Burada denkleştirici katsayılarının kanala göre uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için öğrenme dizileri ve öğrenme algoritmaları kullanılır. Ortalama karesel hataya göre katsayı güncelleme yapan LMS algoritmasının katsayıları güncelleme bağıntısı (14)’de verildiği gibidir [12].

$$c_k(n) = c_k(n-1) + \mu e^*(n) v_k(n) \quad (14)$$

Burada  $\mu$  katsayıların güncellenme hızı ve kararlılığını belirleyen adım büyüklüğü,  $e$  denkleştirici çıkışındaki kestirim hatası,  $v_k$  ise denkleştiricinin  $k$ . dalının girişindeki işaretidir.

LMS algoritmasının işlem yükü az olmasına rağmen öğrenme hızı oldukça düşüktür. Öğrenme hızını arttırmak için karmaşıklığı daha yüksek algoritmalar geliştirilmiştir. Bunlardan biri de öz yinelemeli en küçük kareler (recursive least square, RLS) algoritmasıdır. Bu algoritma için katsayı güncelleme bağıntısı (15) numaralı denklemde verilmiştir [12].

$$c_k(n) = c_k(n) + k_k(n) e^*(n) \quad (15)$$

Burada  $k_k(n)$  kalman katsayısı olarak adlandırılır ve (16), (17) denklemleri yardımıyla hesaplanır [12].

$$k_k(n) = \frac{R^{-1}(n-1)v_k(n)}{\omega + v_k^T(n)R^{-1}(n-1)v_k(n)} \quad (16)$$

$$R^{-1}(n) = \frac{R^{-1}(n-1) - k_k(n)v_k^T(n)R^{-1}(n-1)}{\omega} \quad (17)$$

Denklemlerde  $R^{-1}(n)$  NxN boyutunda bir matris,  $\omega$  ise algoritmanın kanal takip yeteneğini ve kararlılığını etkileyen unutm faktörüdür.

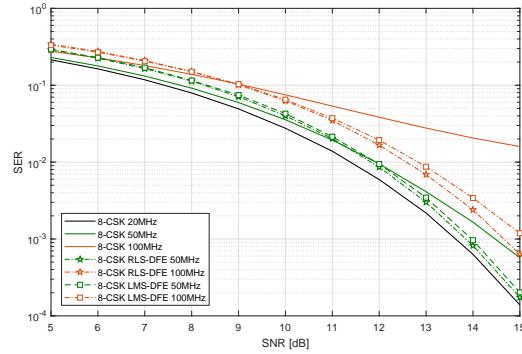
Bu çalışmada kullanılan denkleştiricilerin ileri yönde 6 adet, geri yönde ise 3 adet dal sayısı vardır. Eğitim seviyesinin en yüksek düzeyde olması için LMS algoritmasında 1000 sembollük eğitim dizisi için 0,04 adım büyüklüğü, RLS algoritması için ise 300 sembollük eğitim dizisi için 0,999 unutm faktörü seçimleri yapılmıştır.

Denkleştirici yardımıyla kanalın bozucu etkileri giderildikten sonra oluşan işaret CSK demodülatörü ile ikili veriye dönüştürülerek haberleşme tamamlanır.

### 3 SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde denkleştiricilerin CSK modülasyonundaki performansının incelenmesi için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları anlatılmış ve sayısal sonuçlar verilmiştir. Yapılan çalışmada öncelikle ISI ve çoklu renk dengesizliği etkilerinin ayrı ayrı, daha sonra ise birlikte incelenmiştir.

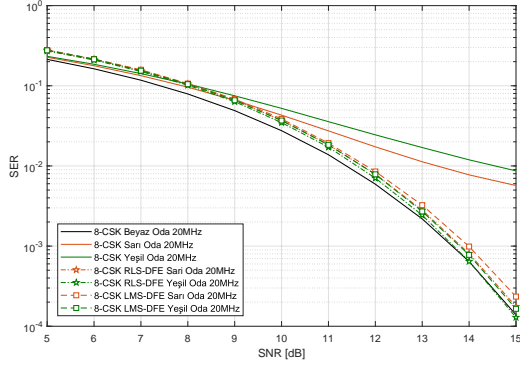
ISI etkileri anahtarlama hızına göre ortaya çıktığından dolayı 20, 50 ve 100MHz anahtarlama hızlarındaki haberleşme beyaz oda modelinde gerçekleştirilmiştir. Bu etkilerin görüldüğü 50 ve 100MHz anahtarlama hızlarında denkleştirici kullanılarak oluşan performans artışı incelenmiştir. Şekil 5’de ISI etkisinin incelenmesi için gerçekleştirilen simülasyonun sonuçları görülmektedir.



Şekil 5: Farklı anahtarlama hızlarındaki CSK performansı

Görüldüğü gibi anahtarlama hızı arttığında sembol hata oranı ciddi oranda artmaktadır. Denkleştirici kullanımı 15dB SNR değerinde sembol hata oranını 50MHz anahtarlama hızında LMS ve RLS algoritmaları yaklaşık 5dB, 100MHz anahtarlama hızında ise sırasıyla 11,28dB ve 13,99dB kazanç sağlamıştır.

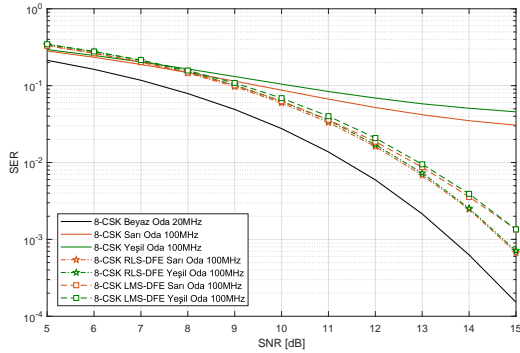
Çoklu renk dengesizliği etkileri ise farklı renklerdeki duvarlar nedeniyle olduğundan dolayı haberleşme beyaz, sarı ve yeşil oda modellerinde ISI etkisinin minimum olduğu 20MHz anahtarlama hızında gerçekleştirilmiştir. Bu etkilerin incelenmesi için gerçekleştirilen simülasyonun sonuçları Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6: Duvarları farklı renkli odalarda CSK performansı

Buna göre sarı ve yeşil renkli odalarda sembol hata oranının beyaz renkli odaya göre oldukça düştüğü görülmektedir. Denkleştirici kullanımında 15dB SNR değerinde LMS ve RLS algoritmaları sarı odada sırasıyla olarak 13,86 ve 15,1dB, yeşil odada ise yaklaşık olarak 18dB kazanç sağlanarak beyaz odada gerçekleştirilen sembol hata oranına ulaşılmıştır.

Son olarak ISI ve çoklu renk dengesizliği bozucu etkileri birlikte incelenmiştir. Bu durumda oluşan sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7: ISI ve çoklu renk dengesizliği etkileri altında CSK performansı

Denkleştirici kullanımının bozucu etkileri giderme miktarına bakıldığında 15dB SNR değerinde LMS algoritmaları yaklaşık olarak 14dB, RLS algoritmaları ise yaklaşık olarak 17dB kazanç sağladığı görülmektedir.

#### 4 SONUÇLAR

Bu çalışmada CSK modülasyonunda LED anahtarlama hızından kaynaklı ISI etkileri ve haberleşmenin gerçekleştirileceği odanın duvar renginden kaynaklı dengesiz kanal etkileri incelenmiş ve denkleştirici kullanımının bu etkileri giderme miktarları incelenmiştir. Örnek olarak seçilen sarı ve yeşil renkli odalarda haberleşme performansının beyaz odaya göre düştüğü görülmüştür. Kanalın oluşturduğu ve günlük hayatta yapılacak uygulamaların önünde engel oluşturan bu bozucu etkilerin önerilen denkleştirici yapısı kullanılarak giderilebileceği görülmüştür. Son-

raki çalışmalarda farklı yapılarıdaki denkleştiriciler incelenerek performans karşılaştırmaları gerçekleştirilebilir.

#### KAYNAKÇA

- [1] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [2] C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. F. Liu and Y. Liu, "Improved modulation speed of LED visible light communication system integrated to main electricity network," in Electronics Letters, vol. 47, no. 15, pp. 867 -868, 21 July 2011.
- [3] C. Albayrak and K. Turk, "Rate adaptive system for visible light communications," 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Barcelona, 2017, pp. 200-203.
- [4] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications," in IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011) , vol., no., pp.1-407, 23 April 2019
- [5] J. -. Shi, J. -. Sheu, C. -. Chen, G. -. Lin and W. -. Lai, "High-Speed GaN-Based Green Light-Emitting Diodes With Partially n-Doped Active Layers and Current-Confined Apertures," in IEEE Electron Device Letters, vol. 29, no. 2, pp. 158-160, Feb. 2008.
- [6] C. Liao, C. Ho, Y. Chang, C. Wu and M. Wu, "High-Speed Light-Emitting Diodes Emitting at 500 nm With 463-MHz Modulation Bandwidth," in IEEE Electron Device Letters, vol. 35, no. 5, pp. 563-565, May 2014.
- [7] J. Shi, K. Chi, J. Wun, J. E. Bowers, Y. Shih and J. Sheu, "III-Nitride-Based Cyan Light-Emitting Diodes With GHz Bandwidth for High-Speed Visible Light Communication," in IEEE Electron Device Letters, vol. 37, no. 7, pp. 894-897, July 2016.
- [8] Andreas F. Molisch, "Technical Challenges of Wireless Communications," in Wireless Communications , , IEEE, 2011, pp.
- [9] P. Chambers, C. Downing and H. Baher, "Comparison of MIMO communications systems based on experimentally observed unbalanced and balanced transmission line channels," 2008 Loughborough Antennas and Propagation Conference, Loughborough, 2008, pp. 165-168.
- [10] J. Armstrong, "OFDM for Optical Communications," in Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 3, pp. 189-204, Feb.1, 2009.
- [11] Z. Lin, M. Jiang and H. Tan, "Constellation Design for Complex Colour Shift Keying Aided Optical OFDM Systems," 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Chicago, IL, USA, 2018, pp. 1-5.
- [12] Andreas F. Molisch, "Equalizers," in Wireless Communications , , IEEE, 2011, pp.343-361
- [13] K. Lee, H. Park and J. R. Barry, "Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications," in IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 2, pp. 217-219, February 2011.
- [14] <https://www.cree.com/led-components/products/xlamp-leds-arrays/xlamp-xm-l-color>, XLamp XM-L Color, 02 October 2019.
- [15] <https://www.semrock.com/FilterDetails.aspx?id=FF01-629/56-25>, 629/56 nm BrightLine® single-band bandpass filter, 02 October 2019.
- [16] <https://www.semrock.com/FilterDetails.aspx?id=FF01-540/80-25>, 540/80 nm BrightLine® single-band bandpass filter, 02 October 2019.

- [17] <https://www.semrock.com/FilterDetails.aspx?id=FF02-447/60-25>, 447/60 nm BrightLine® single-band bandpass filter, 02 October 2019.
- [18] <https://www.shepherdcolor.com/products/technical-data/YL0030C119/>, Technical Data information for YL0030C119, 02 Ekim 2019.
- [19] <https://www.shepherdcolor.com/products/technical-data/GR0223/>, Technical Data information for GR0223, 02 Ekim 2019.