

## Performance Analysis of Error Correction Codes for Digital Interval Pulse Modulation Technique

 Kenan AYTEN\*  Mehmet SÖNMEZ 

Osmaniye Korkut Ata University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 80010, Merkez/Osmaniye

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 13/04/2020

Revision: 12/08/2020

Accepted: 13/08/2020

#### Highlights

- Communication.
- Modulation Techniques.
- Error Correction.

#### Keywords

 VLC  
 DPIM  
 SER  
 Demodulator

In this study, an error correction structure is analyzed for the DPIM technique. Performance analysis of the error correction method has been successfully carried out. Analyzes were obtained for two cases: First, signal to noise ratio is used to observe the SER performance of system. Second, the comparison of SER performance is obtained with respect to distance between the receiver and transmitter. According to simulation results, it was seen that the error correction method give better results than that of traditional method in terms of error performance.

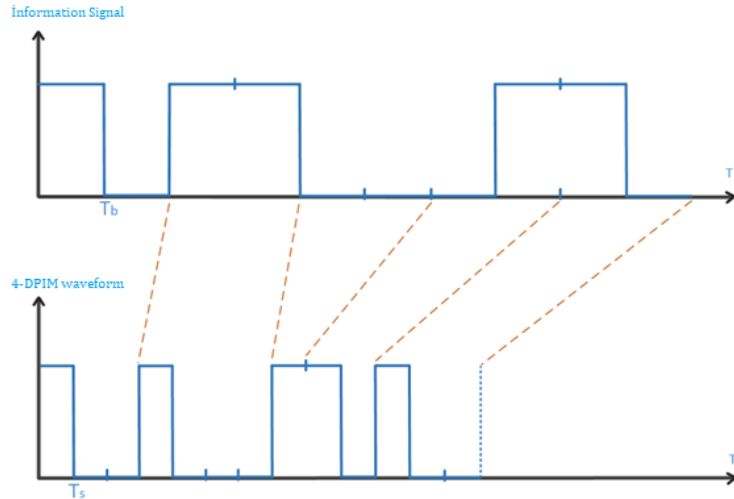


Figure A. 4-DPIM waveform according to information signal

**Purpose:** The main purpose is to analysis the error performance rate of the DPIM technique.

**Theory and Methods:** An error correction algorithm has been implemented on DPIM technique by using symbol structure of modulation method. Firstly, a theoretical framework is presented for error correction algorithm. Afterwards, the BER performances of systems are compared with each other.

**Results:** It has been observed that the error correction structure gives a better result than the traditional method between 16-27 SNRs. Moreover, it is seen that the error correction structure provide longer distance between the receiver and transmitter when compared to traditional system.

**Conclusion:** DPIM technique is a very good modulation technique in terms of bandwidth and power efficiency. However, it needs to be developed in terms of error performance and frame synchronization, because it is an asynchronous modulation technique. Therefore, improving the DPIM technique in terms of error performance will make it more attractive.



# Dijital Aralıklı Darbe Modülasyonu Tekniği için Hata Düzeltme Kodlarının Performans Analizi

Kenan AYTEN\* Mehmet SÖNMEZ

*Osmaniye Korkut Ata University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 80010, Merkez/Osmaniye*

## Öz

Günümüzde gelişen teknolojiler ve hızlı bilgi aktarımı nedeniyle kablosuz haberleşmede Radyo Frekansı (RF: Radio Frequency) bantları hızla dolmakta ve frekans bandının üst sınırlarına doğru ulaşmaktadır. Bu durum yeni alternatif iletişim teknolojilerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu nedenle kısa mesafelerde RF üzerindeki veri trafiğini hafifletmek için Görünür Işık Haberleşmesi (VLC: Visible Light Communication) devreye girmektedir. VLC sistemlerinde modülatör ve demodülatör tasarımı hata performansı, bantgenişliği verimliliği, güç verimliliği gibi özellikleri etkilediğinden dolayı çok önemli konulardan birisidir. Bu nedenle yapılan çalışmada VLC sistemleri için kullanılan DPIM (Digital Pulse Interval Modulation: Dijital Aralıklı Darbe Modülasyonu) tekniğinin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada DPIM tekniğine hata düzeltme kodları entegre edilmiştir. Entegre edilen hata düzeltme kodlarının matematiksel alt yapısı oluşturularak, benzetim ortamında geleneksel sistem ile SER (Slot Error Ratio: Sembol Hata Oranı) ve PER (Packet Error Ratio: Paket Hata Oranı) karşılaştırılması yapılmıştır. Hata düzeltme kodları eklenmiş olan alıcı yapısının geleneksel DPIM alıcı yapısına göre daha iyi bir hata performansı sergilediği görülmüştür. Bu nedenle benzetim sonuçlarından hata düzeltme kodlarının geleneksel yapıya göre daha yüksek alıcı-verici arasındaki mesafeler için veri iletimini sağlanabildiği görülmektedir. Özellikle sabit eşik değeri uygulamasında hata düzeltme yapısının hata performansını oldukça yüksek bir şekilde geliştirdiği görülmektedir.

## Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 13/04/2020*  
*Düzeltilme: 12/08/2020*  
*Kabul: 13/08/2020*

## Anahtar Kelimeler

VLC  
 DPIM  
 SER  
 Demodülatör

## Keywords

VLC  
 DPIM  
 SER  
 Demodulator

## Performance Analysis of Error Correction Codes for Digital Interval Pulse Modulation Technique

## Abstract

Nowadays, Radio Frequency (RF) bands in wireless communication have been rapidly filled and reached the upper limits of the frequency band due to the high data rate and developing technologies. This situation increases the interest on new alternative communication technologies. Hence, the VLC (Visible Light Communication) comes into play to mitigate data traffic over RF for short distances. The design of modulator and demodulator design in VLC is one of the most important issues because it affects features such as error performance, bandwidth efficiency, power efficiency. Therefore, the performance analysis of DPIM (Digital Pulse Interval Modulation) technique used for VLC systems was performed in this paper. The analyzes were carried out in MATLAB environment. In the study, error correction codes are integrated into DPIM technique. By achieving the mathematical infrastructure of the integrated error correction codes, a comparison of the conventional system with SER (Slot Error Ratio) and PER (Packet Error Ratio) was obtained in the simulation. The proposed receiver structure has been shown to perform better than traditional DPIM receiver structure. Therefore, it can be seen from the simulation results that the error correction codes can be transmitted to the traditional structure for higher transmission distance. Especially, it is seen that the error correction structure considerably improves the error performance for constant threshold value application.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

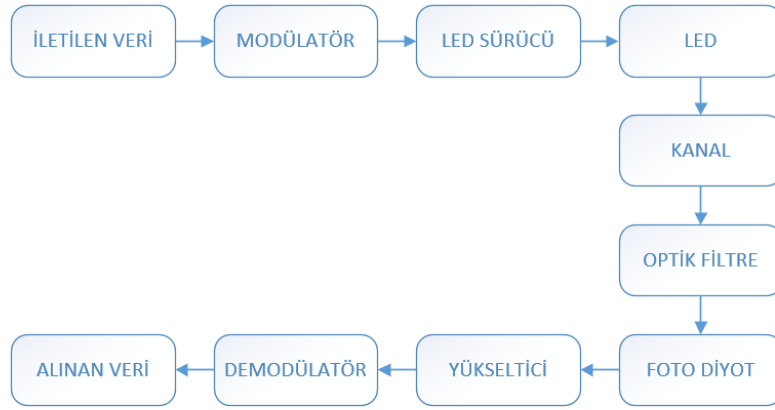
Sınırlı radyo frekansı (RF: Radio Frequency) spektrumu, son zamanlarda mobil veri trafiğindeki olağanüstü artış ile her yerde bağlantı ve yüksek kapasite için artan talebi karşılamakta zorlanmaktadır. Nesnelerin İnternetinde bulunan çok sayıda cihazın da artan mobil veri trafiğine katılmasıyla kablosuz ağlar üzerinde RF spektrumu yetersiz kalmakta ve gecikme süresi nedeniyle hizmetin güvenilirliğini azaltmaktadır[1]. Bu durum yeni alternatif iletişim teknolojilerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu amaçla kısa mesafelerde RF üzerindeki veri trafiğini hafifletmek için VLC devreye girmektedir. VLC sistemlerinde bilgi görünür ışık aracılığıyla iletilmektedir. Görünür ışık 430 THz ile 790 THz arasında değişen bir frekansa sahiptir. Görünür ışık haberleşmesinde verici olarak LED (light emitting diode) gibi ışık yayan, enerji tasarruflu, düşük maliyetli ve sürdürülebilir opto-elektronik cihazlar kullanılır[2]. Alıcı kısmında ise foto diyot gibi ışığa duyarlı cihazlar kullanılır. VLC sistemlerinde iletilmek istenen bilgi sinyali modülasyon işleminden sonra verici tarafta bulunan LED'den yayılan ışık ile taşınır ve alıcı taraftaki foto diyot tarafından bilgi sinyali alınır. Alınan sinyal demodülasyon işlemine tabi tutulur ve veri gönderme işlemi tamamlanmış olur. VLC'nin en önemli özelliği veri aktarımı için aydınlatma amacıyla kullanılan görünür ışığı kullanmasıdır. VLC'nin en büyük dezavantajı alıcının, vericiden gönderilen ışığın görüş açısı içerisinde olması gerekliliğidir. Bu dezavantajla birlikte VLC'nin RF'den en büyük farkı, alıcı-verici arasındaki mesafenin kısa olmasıdır.

Literatürde VLC sistemlerinin araç-araç haberleşmesi, sualtı haberleşmesi, kapalı ortam haberleşmesi gibi birçok haberleşme alanında kullanılmasına yönelik akademik çalışmalar bulunmaktadır [3]. VLC sistemleri için literatürde önerilen modülasyon teknikleri ile güç verimliliği, bant genişliği verimliliği, hata oranı performansı gibi özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ağırlıklı olarak kullanılan Açma Kapama Anahtarlama (OOK: On-Off Keying), Darbe Konum Modülasyonu (PPM: Pulse Position Modulation), Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM: Pulse Width Modulation) düşük veya orta veri hızları istendiğinde çok uygundur[3]. PPM tekniğinin VPPM (Variable PPM: Değişken PPM), DPPM (Differential PPM: Kademeli PPM), OPPM (Over lapping PPM: Çakışan PPM), MPPM (Multipulse PPM: Çoklu PPM) gibi birçok alt versiyonu bulunmaktadır[4]. Bunların haricinde literatürde Renk Kaydırmalı Anahtarlama (CSK: Color Shift Keying), Optik Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama (OOFDM: Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing), Sayısal Darbe Aralığı Modülasyonu (DPIM: Digital Pulse Interval Modulation) gibi birçok modülasyon tekniği daha bulunmaktadır[5]. Modülasyon teknikleri üzerine yapılan akademik çalışmalarla birlikte modülasyon teknikleri her geçen gün gelişmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde DPIM (Digital Pulse Interval Modulation: Dijital Aralıklı Darbe Modülasyonu) tekniği birçok modülasyon tekniğine kıyasla bant genişliği verimliliği ve güç verimliliği bakımından oldukça verimli bir modülasyon tekniğidir[6]. Ancak DPIM tekniği asenkron bir modülasyon tekniği olduğu için bit hata oranı tespit etmesi oldukça zordur [6]. Bu nedenle yapılan bu çalışmada DPIM tekniğinin hata oranı performansı Sembol Hata Oranı (SER: Slot Error Ratio)'na ve Paket Hata Oranı (PER: Packet Error Ratio)'na bakılarak belirlenmiştir. Geleneksel yöntemde DPIM sinyallerinin tespiti sabit bir eşik değeri ile karşılaştırılarak yapılır [6]. Ancak sistemin bulunduğu ortamdaki gürültü oranına, alıcı-verici arasında mesafeye göre eşik değeri değişeceği için sabit eşik değeri bulunan sistemlerde hatalı algılanan semboller olacaktır, hatalı algılanan semboller hata performansını olumsuz etkilediği için istenmeyen bir durumdur. Birçok yönden verimli bir modülasyon tekniği olan DPIM tekniğinin hata performansı yönünden de verimli hale getirilmesi bu modülasyon tekniğinin kullanılmasını daha cazip hale getirmektedir[7]. Bu nedenle DPIM tekniğinde hata performansı geliştirmek üzere yapılan çalışmalar daha çok önem arz etmektedir[8]. Bu çalışmada, sabit eşik değerli DPIM sisteminin bu değişimlerden daha az etkilenmesini sağlamak için kullanılan bir sayısal hata düzeltme kodu mimarisinin tasarımı yapılmıştır ve bu tasarımın başarımlı analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarımın oluşturulmasında DPIM tekniğinin doğasında bulunan bazı özelliklerden yararlanılmıştır. DPPM (Farksal Darbe Konum Modülasyonu) yöntemi için önerilen hata düzeltme kodunun bir benzeri olan yöntemin; DPIM sistemleri üzerindeki bit hata oranı performansı bu çalışmada incelenecek olup, matematiksel analizi gerçekleştirilmiştir[9]. Kullanılan hata düzeltme kodu dört sembol içerisinden oluşabilecek bir sembollük hatayı düzeltmektedir. Benzetim çıktılarından hata düzeltme kodunun hata oranı performansının geleneksel sisteme göre daha iyi olduğu görülmektedir.

## 2. VLC SİSTEM MODELİ (VLC SYSTEM MODEL)

Şekil-1'de ifade edildiği gibi, tipik bir VLC sistemi, verici tarafında LED ve alıcı uçta algılama amacıyla bir foto diyot kullanılarak gerçekleştirilebilir. Işık, kablosuz optik haberleşmede veri iletimi için bir araç olarak kullanıldığından, veriler LED'in ışık yoğunluğunu değiştirerek kodlanmaktadır. Genel olarak, LED'i sürmek için bir sürücü devresi kullanılır. Ayrıca, sürücü devresinin temel ön koşulu, LED'den geçen akım miktarını kontrol etmektir, farklı bir ifade ile LED'in parlaklık seviyesini ayarlamaktan sorumludur. Enerji tasarrufu açısından bu çok önemlidir. LED tarafından iletilen optik sinyal, kablosuz kanaldan yayıldıktan sonra, engellerin varlığı nedeniyle birkaç yansımadan geçtikten sonra, hem görüş hattı (LOS: Line Of Sight) hem de görüş hattı olmayan (NLOS: Non-Line Of Sight) bileşenler ile foto diyot tarafından alınır[10]. Bu nedenle optik filtre istenen bilgi sinyalini seçmek için önemli bir rol oynar ve güneş ışığı gibi ortam ışık kaynaklarının ve yapay ışık kaynaklarının etkisini büyük ölçüde azaltabilir[3].



**Şekil 1.** VLC Sisteminin Temel Blok Diyagramı

Foto diyot ışık yoğunluğunu elektrik sinyaline dönüştürür. Elektriksel sinyal bir akım-gerilim dönüştürücü yükselteç devresi ile yükseltilir ve eşik değeri ile karşılaştırılarak semboller tespit edilir. Tespit edilen semboller demodülatör mimarisi ile tahmin edilerek nihai çıktı olan veri elde edilir.

## 3. DİJİTAL ARALIKLI DARBE MODÜLASYONU (DIGITAL PULSE INTERVAL MODULATION)

DPIM tekniğinde bilgi bitlerine göre sembol uzunluğu değiştiği için DPIM tekniği asenkron bir dijital zaman darbeleri modülasyonu tekniğidir[11]. M-DPIM tekniğinde koruma sembolü kullanılmaz ise sıralı olarak en fazla M-1 tane '0' sembolü gelebilmektedir. Burada  $M = 2^n$  olarak ifade edilmekte olup, n değeri bir sembol içerisinde bulunan bit sayısını göstermektedir. Koruma sembolünün kullanılmasının amacı, semboller arasındaki girişimi azaltmaktır[12]-[13]. Bu nedenle, 1 koruma sembolü kullanılması durumunda sıralı olarak en fazla M adet '0' sembolü gelmektedir. Tablo-1 ve Tablo-2'de bu durum görülmektedir.

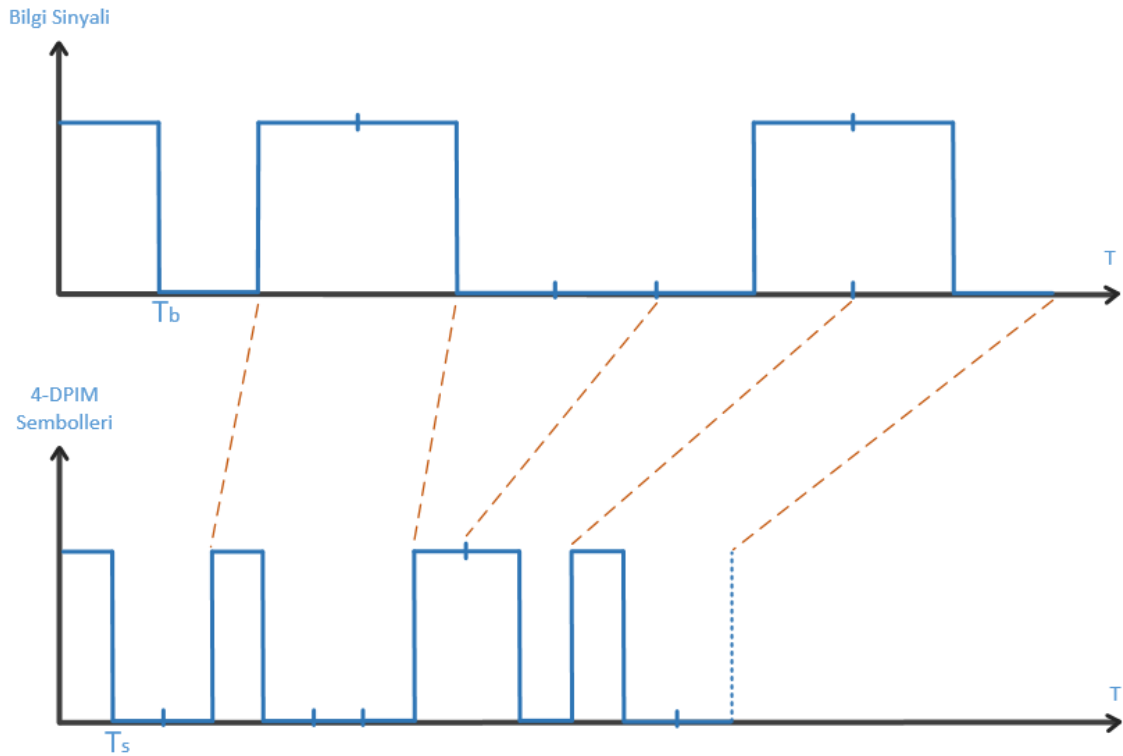
**Tablo 1.** 4-DPIM İçin Kod Dizini

Bilgi Bitleri	4-DPIM Sembolleri (Koruma Sembolü Olmadan)	4-DPIM Sembolleri (1 Koruma Sembolüyle)
00	1	10
01	10	100
10	100	1000
11	1000	10000

**Tablo 2.** 8-DPIM İçin Kod Dizini

Bilgi Bitleri	8-DPIM Sembolleri (Koruma Sembölü Olmadan)	8-DPIM Sembolleri (1 Koruma Sembölüyle)
000	1	10
001	10	100
010	100	1000
011	1000	10000
100	10000	100000
101	100000	1000000
110	1000000	10000000
111	10000000	100000000

Tablo-1 ve Tablo-2 farklı uzunluklardaki bilgi bitlerini kodlayan DPIM yöntemlerini göstermektedir. Ayrıca tablolarda bir (1) koruma sembölü DPIM sinyalleri gösterilmektedir. DPIM sinyalleri görüldüğü gibi her sembol başlangıcını mantıksal '1' seviyesi ile başlatarak diğer semboller için gelecek mantıksal '0' değerlerini de bilgi bitlerinin durumuna göre belirlemektedir. İletilecek olan mantıksal '0' sembolleri, Tablolarda verilen bilgi bitlerinin onluk sistemdeki değerine göre oluşturulmaktadır. Tablo-2'de n=2 için; '00' bilgi bitleri onluk sistemde sıfır (0) sayısına denk geldiğinden DPIM sembolü olarak sadece bir sembol yani mantıksal '1' sembolü iletilmektedir. Ancak '11' bilgi bitlerinin onluk sistemdeki değeri üç (3) olduğundan mantıksal '1' başlangıç sembolünden sonra 3 adet mantıksal '0' gönderileceğinden DPIM kod dizini '1000' olarak ifade edilmektedir. Koruma sembolünün eklenmesi durumunda, koruma sembolü sayısı kadar kodlanmış DPIM sinyale mantıksal '0' eklenmektedir.

**Şekil 2.** Bilgi Sinyaline göre DPIM Dalga Formu

Şekil 2'de bilgi sinyaline göre üretilen 4-DPIM dalga formu gösterilmiştir. Burada  $T_b$  bit gönderim süresini,  $T_s$  sembol gönderim süresini ifade etmektedir.

DPIM tekniğinde ortalama sembol uzunluğu koruma sembolünün olmadığı durumlar için eşitlik (1) ile 1 koruma sembolünün olduğu durumlar için (2) ile hesaplanabilmektedir[11].

$$\bar{L}_{DPIM} = \frac{2^M + 1}{2}$$

$$\bar{L}_{DPIM} = \frac{2^M + 3}{2} \quad 2$$

Matematiksel olarak M bit DPIM sinyali Eşitlik (3)'te görüldüğü gibi temsil edilebilir [14]. Burada a, DPIM sinyalinin iletimi için LED'çerisinden akan akımın genliğini, g(t) darbe şeklini temsil eder. T<sub>s</sub> ise bir sembolün iletimi için geçen süre olarak ifade edilmektedir.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a \cdot g \left[ t - T_s \left( 2k + \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \right) \right] \quad 3$$

VLC sistemlerde iletilen ortalama optik güç (4)'deki ifade ile hesaplanırken alınan ortalama optik güç (5)'deki ifade ile bulunur[9]. Eşitlikte H(0) DC kanal kazancıdır. Eşitlik (6)'da ifade edilen h(t), kanal dürtü yanıtını göstermektedir.

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad 4$$

$$P_r = H(0) * P_t \quad 5$$

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad 6$$

Bu çalışmada hata performansı analizi SER ve PER'e bakılarak yapılmıştır. SER hatalı algılanan sembol sayısı ile gönderilen sembol sayısının oranı ile bulunurken, DPIM tekniği için PER'i hesaplamak biraz daha zordur. Çünkü DPIM tekniği asenkron bir modülasyon tekniğidir.

$$P_{pe} = 1 - (1 - P_{sle})^{N_{pkt} \bar{L}_{DPIM}/M} \quad 7$$

Fakat eşitlik (7) ile SER'den PER elde edilebilmektedir[11]. Burada P<sub>pe</sub> paket hata oranını, P<sub>sle</sub> sembol hata oranını, N<sub>pkt</sub> ortalama paket uzunluğunu  $\bar{L}_{DPIM}$  ise ortalama sembol uzunluğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada PER eşitlik (7) deki formül ile hesaplanmıştır.

#### 4. DPIM ALICI ŞEMASI (DPIM RECEIVER SCHEMA)

Geleneksel DPIM alıcı yapısında sembolleri tahmin etmek için alınan sinyalin integrali alındıktan sonra eşik değeri ile karşılaştırılarak eşik değerden büyük olan değerlere 1 küçük olan değerlere 0 sembolü atanır. VLC'de alınan sinyal, eşitlik (8)'deki gibi açıklanabilir [15].

$$s(t) = R(x(t) * h(t)) + n(t) \quad 8$$

Burada x(t) gönderilen sinyal, n(t) beyaz gauss gürültüsü ve R algılayıcı duyarlılığıdır. Eşitlik (9)'de gösterildiği gibi her sembol için alınan sinyalin integrali alınır. Burada n gönderilen toplam sembol sayısını, k ise sembolün numarasını ifade etmektedir.

$$a_k = \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} s(t) dt \quad \{k \in Z, k > 0, k \leq n\} \quad 9$$

$$a(t) = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_{n-2} \ a_{n-1} \ a_n] \quad 10$$

İntegral sonucunda elde edilen sinyal karar aşamasında bir eşik değeri (th: threshold value) ile karşılaştırılır ve buna göre semboller tahmin edilir. Tahmin edilen semboller b(t) ile ifade edilmektedir ve yapılan matematiksel işlem eşitlik (11)'de görülmektedir.

$$b(t) = \begin{cases} 0, & a(t) < th \\ 1, & a(t) \geq th \end{cases} \quad 11$$

Tahmin edilen sembollerin tamamının doğru olması sonucunda DPIM kod dizisinden bilgi bitlerinin doğru bir şekilde algılanması, bir kod çözücü mimarisi ile sağlanabilmektedir. Sembollerin tespitinde kullanılan  $t_h$  değerinin belirlenmesi için, ideal ortamda (gürültünün olmadığı ortam) ve sabit koşullarda (sabit alıcı-verici arası mesafe ve sabit ortam ışığı)  $I$  bilgi biti gönderilir ve alıcının algıladığı değer yarısı bu koşullar için eşik değeri kabul edilir[16].

### 5. DPIM ALICI ŞEMASININ İÇİN HATA DÜZELTME KODUNUN UYGULANMASI (IMPLEMENTATION OF ERROR CORRECTION CODE FOR DPIM RECEIVER SCHEMA)

Bu bölümde kullanılan hata düzeltme kodlarının matematiksel ifadesi verilmiş olup sistemin akış diyagramı açıklanmıştır. Düzeltme kodları Eşitlik (12)-(13) kullanılarak ifade edilebilir.

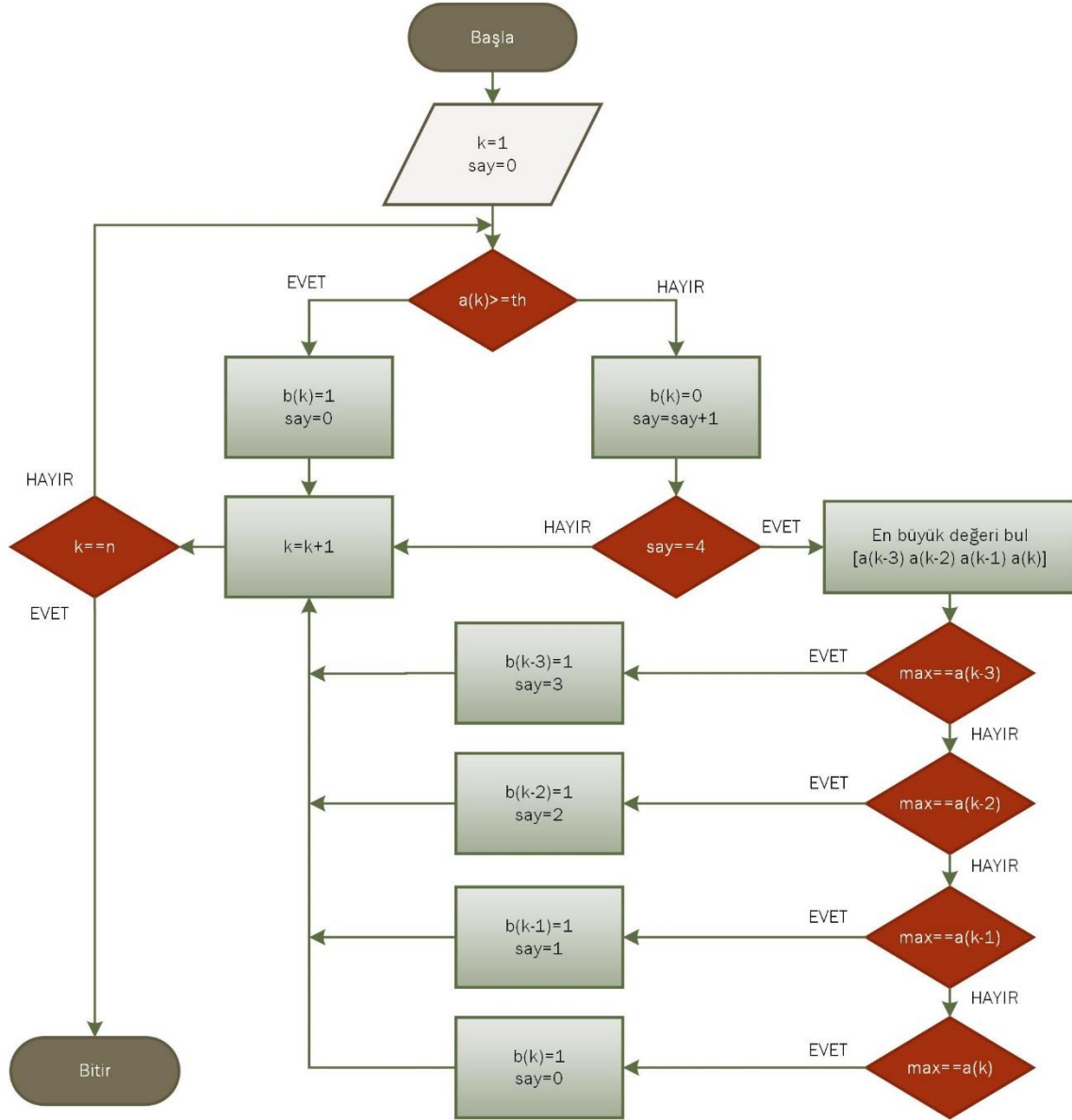
$$y = \sum_{i=1}^{i+2^M} b[i] \quad \{i \in \mathbb{Z}, i > 1, i \leq n - 2\} \quad (12)$$

Eşitlik (12) uygulanan hata düzeltme kodunun ifadesini vermektedir. Tamamen hatasız iletilen semboller için alınan DPIM sinyali için  $y$ 'nin minimum değeri 1 (bir) olmalıdır. Eğer  $y$  değeri 0 (sıfır) olursa, Tablo-1 ve Tablo-2'den art arda gelen  $2^M$  sembolden az birisinin hatalı olduğu bilinmektedir. Bu düzeltme kodu ile sadece 1 (bir) sembol düzeltimi yapılmaktadır. Düzeltme işlemi Eşitlik (13)'de verildiği gibi gerçekleştirilmektedir.

$$a_m = \max\{a_{i-1} \dots a_{i+2^M}\} \quad (13)$$

(13)'de verilen eşitlikte küme içerisinde  $2^M$  adet integral sonucu kullanılmaktadır. Mantıksal 0 olarak algılanan ve en büyük integral değerine sahip olan sembol değeri Mantıksal 1 olarak düzeltilmektedir. Eşitlikte  $m$  alt indisi en büyük değere sahip olan elemanın indisini göstermektedir. Bu nedenle düzeltme  $b_m=1$  işlemi ile gerçekleştirilir.

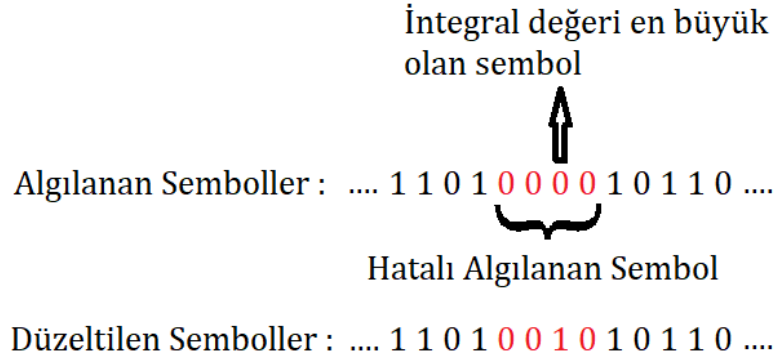
Hata düzeltme kodlu alıcı şemasında DPIM sembollerinin tespiti yine geleneksel yöntemde olduğu gibi yapılmaktadır. Geleneksel yöntemde ek olarak tahmin edilen sembollerin hatalarını tespit etmek için hata düzeltme algoritması geliştirilmiş ve hata oranı performansının iyileştirilmesi sağlanmıştır. DPIM tekniğinin doğası gereği artarda gelebilecek maksimum 0 sembol sayısı bellidir. 4-DPIM için artarda en fazla 3 tane 0 sembolü gelmektedir. Hata düzeltme algoritması DPIM tekniğinin bu özelliğinden yararlanarak geliştirilmiştir. Geliştirilen hata düzeltme algoritmasının akış diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** 4-DPIM için Hata Düzeltme Algoritması Akış Diyagramı

Akış diyagramında  $a(k)$  integrali alınan DPIM sinyalini,  $b(k)$  tespit edilen DPIM sembollerini ifade etmektedir. Gönderilen toplam sembol sayısı  $n$ , sembol sırası  $k$  ile ifade edilmiştir. Akış diyagramında görüldüğü üzere sembollerin tespiti geleneksel yöntemde olduğu gibi yapılmaktadır. İntegrali alınan sinyal eşik değeri ( $th$ ) ile karşılaştırıldıktan sonra ve eşik değerden büyük olanlara 1 sembolü küçük olanlara 0 sembolü atanır. Aynı zamanda her sembolün integral değeri hafızada tutulur. Sonrasında artarda 4 tane 0 sembolünün gelip gelmediğinin kontrolü yapılır. Artarda 4 sembolün 0 geldiği tespit edildiği zaman bu 4 sembol içerisinde integral değeri en büyük olana 1 sembolü atanır. En büyük değerden sonra kaç 0 olduğu bilgisi  $say$  ile hafızaya alınır ve bir sonraki döngüde ihtiyaç olması durumunda kullanılır. Akış diyagramının çalışma yapısının daha iyi anlaşılması için hata düzeltme algoritmasının çalışmasına dair bir örnek durum Şekil 4’de verilmiştir.





*Şekil 4. 4-DPIM için Örnek Hata Düzeltme*

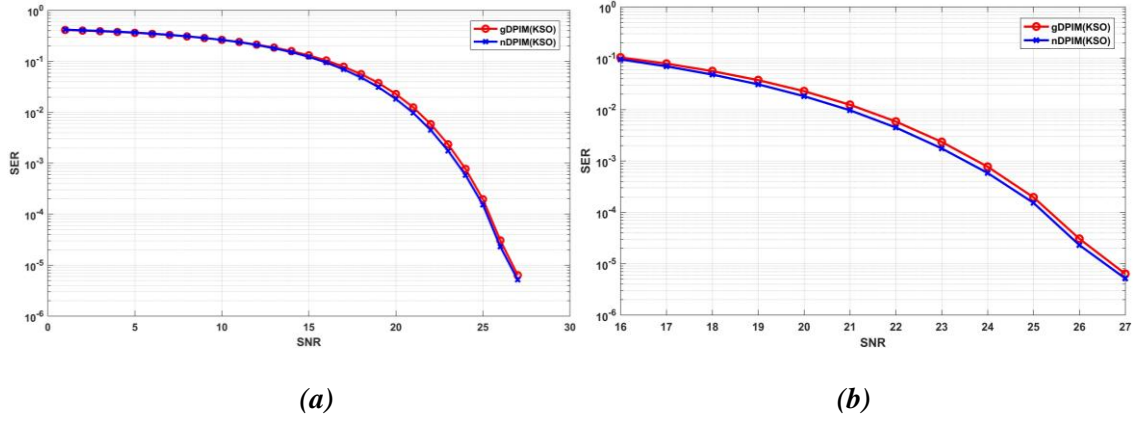
Şekil 4’de görüldüğü üzere art arda 4 tane 0 sembolünün gelmesi durumunda bu 4 sembol içerisinde integral değeri en büyük olan sembol 1 sembolüne dönüştürülüyor. Ayrıca akış diyagramındaki say değişkeni ile dönüştürülen 1 sembolünden sonraki 0 sembolünün sayısı hafızaya alınıyor. Böylece 5 veya daha fazla 0 sembolü art arda geldiği zaman düzeltilen sembolden sonra art arda 4 tane 0 sembolünün gelmesi de engelleniyor.

## 6. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULT)

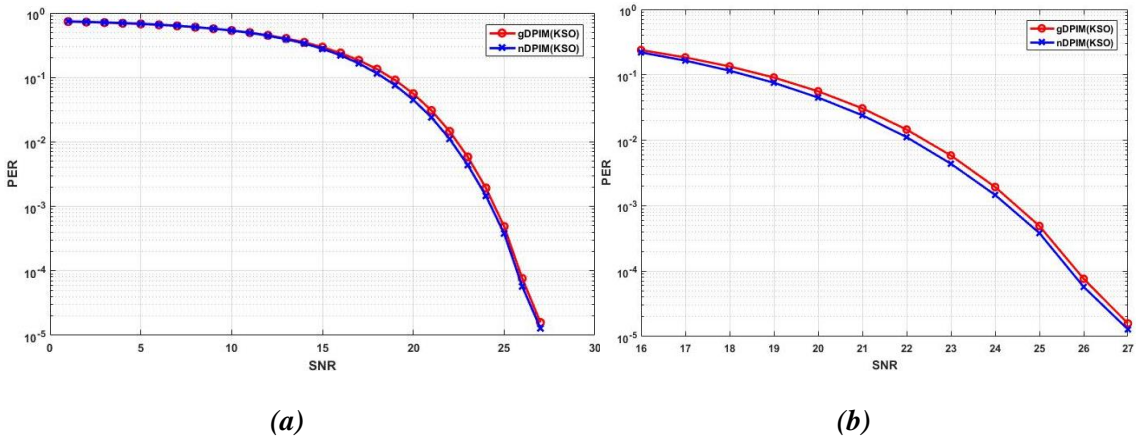
Bu bölümde, DPIM tekniği için hem hata düzeltme kodu kullanılarak hem de geleneksel yöntem kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları incelenmiştir. Benzetim sonuçları, 4-DPIM (KSO: Koruma Sembolü Olmadan) ve 4-DPIM (1KS: 1 Koruma Sembolüyle) teknikleri kullanılarak gürültünün ve mesafenin değiştiği sistemler için elde edilmiştir. Benzetim sonuçlarında geleneksel DPIM alıcısı (gDPIM) ile kullanılan hata düzeltme algoritması eklenmiş olan DPIM alıcısı (nDPIM)’nin hata oranları karşılaştırılarak performans analizi yapılmıştır. Hata performans analizleri SER ve PER’e bakılarak yapılmıştır. Simülasyonlar çalışmaları 20000 defa gerçekleştirilmiş ve toplamda 8.000.000 bit veri gönderilmiştir. Hata performans analizleri, 20000 simülasyon çalışmasının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Şekil (5) ve (6)’te sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio: SNR) değiştirilerek hata performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları 0-40 arası SNR için yapılmıştır fakat 27 SNR’den sonra SER ve PER 0’a düştüğü için 27 SNR’den sonrası simülasyon sonuçlarında gözükmemektedir.

Şekil 5 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için gürültü gücünün değişimine göre gDPIM ve nDPIM SER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 5 (b)’de 16-27 SNR arası SER verilerek Şekil 5 (a)’daki SER değişiminin daha belirgin bir şekilde görülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca Şekil 6 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için gürültü gücü değişimine göre gDPIM ve nDPIM PER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 6 (b)’de 16-27 SNR arası PER verilerek Şekil 6 (a)’daki PER değişiminin daha belirgin bir şekilde görülmesi amaçlanmıştır.

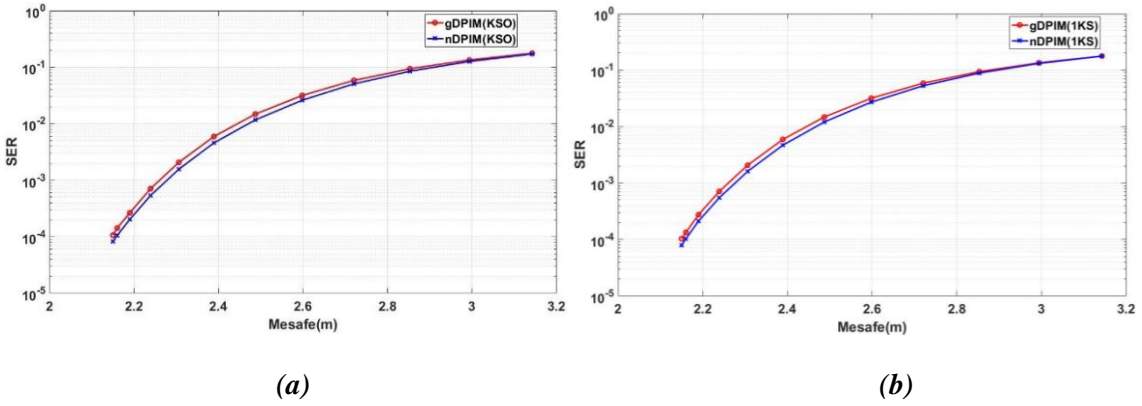
Şekil (7) ve (8)’de mesafeye göre hata performans analizleri gösterilmiştir. Şekil 7 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için mesafeye göre gDPIM ve nDPIM SER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 7 (b)’de 1 koruma sembolünün olduğu 4-DPIM tekniği için gDPIM ve nDPIM SER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 8 (a)’da koruma sembolünün olmadığı 4-DPIM tekniği için mesafeye göre gDPIM ve nDPIM PER performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 8 (b)’de 1 koruma sembolünün olduğu 4-DPIM tekniği için gDPIM ve nDPIM PER performansları karşılaştırılmıştır.



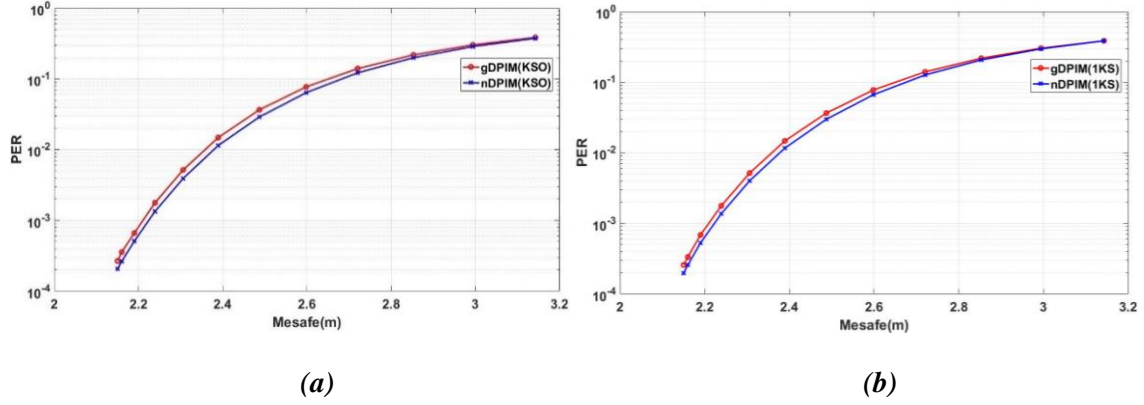
Şekil 5. Gürültü gücü değişimine göre SER grafiği (a) 0-30 arası SNR için (b) 16-27 arası SNR için



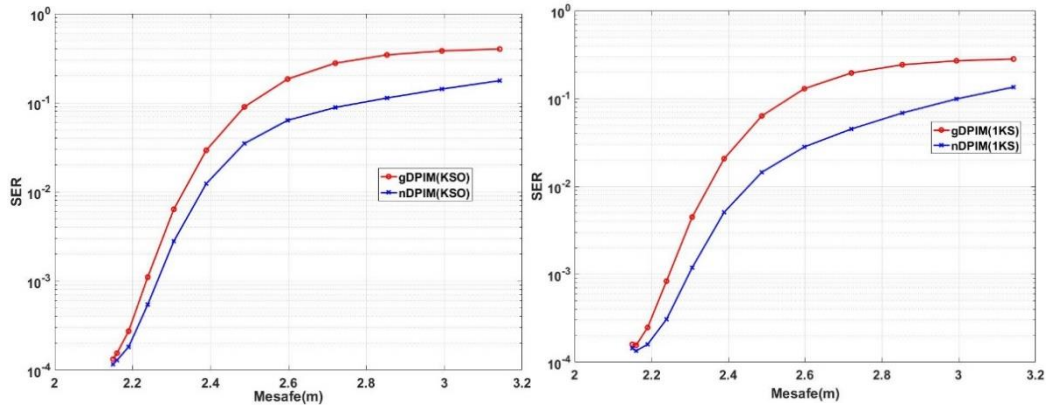
Şekil 6. Gürültü gücü değişimine göre PER grafiği (a) 0-30 arası SNR için (b) 16-27 arası SNR için



Şekil 7. Mesafeye göre SER grafiği (a) Koruma Sembolünün olmadığı durum (b) 1 Koruma Sembolü için

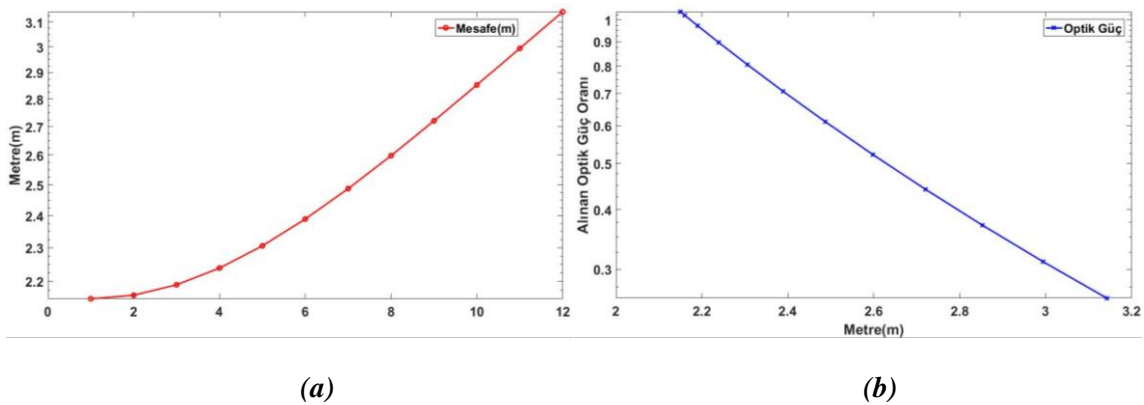


**Şekil 8.** Mesafeye göre PER grafiği (a) Koruma Sembolünün olmadığı durum (b) 1 Koruma Sembolü için



**Şekil 9.** Sabit eşik değeri için SER analizi (a) Koruma Sembolünün olmadığı durum (b) 1 Koruma Sembolü için

Şekil 9’de eşik değeri mesafe 2.17m için kullanılan eşik değeri olarak seçilmiş olup, alıcının eşik değerini doğru olarak tahmin edememesi durumu için analizler gerçekleştirilmiştir. Yani 3.2m ile 2.17m arasındaki tüm durumlar için eşik değeri 2.17m için kullanılan eşik değeri olarak seçilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi sabit eşik değeri durumu için geleneksel yöntemi kullanan sistem ile hata düzeltme kodu uygulanmış yöntemi kullanan sistem arasındaki performans farkı artmıştır.



**Şekil 10.** (a) Mesafenin değişimi (b) Mesafeye göre alınan optik güç oranı

Şekil 5, 6, 7, 8 ve 9’den görüldüğü gibi hata düzeltme kodları belirgin bir şekilde hata oranlarını düşürmektedir. Benzetim sonuçlarından elde edilen en önemli çıkarımlardan birisi hata düzeltme kodları kullanılarak, geleneksel sisteme göre daha uzak mesafelere aynı hata olasılığında veri iletiminin gerçekleştirilmesinin mümkün olmasıdır. Ayrıca benzetim sonuçlarından PER değerlerinin SER

değerlerine göre aynı SNR veya aynı mesafede daha yüksek değerlere sahip olmasıdır. Koruma sembolünün kullanılması ve kullanılmaması durumlarının PER ve SER üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı görülmüştür. Şekil 10 (a)'da mesafenin değişimi, Şekil 10 (b)'de mesafeye göre alınan optik güç oranı (normalize edilmiş güç değeri) gösterilmiştir. Benzetim için kullanılan alıcı-verici arasındaki mesafe arttıkça alınan optik güçte düşüş olduğu izlenmiştir.

## 7. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada VLC sistemleri için DPIM tekniğinde hata düzeltme algoritması kullanılan bir alıcı şeması ile geleneksel alıcı şeması arasındaki performans karşılaştırmaları verilmiştir. Yapılan çalışmada hem SNR hem de alıcı-verici arasındaki mesafeye göre hata oranı analizleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçlarından, kullanılan hata düzeltme kodlu sistemin geleneksel sisteme göre daha düşük sembol hata oranına ve paket hata oranına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca PER ve SER arasındaki bağıntı kullanılarak elde edilen benzetim sonuçlarına göre DPIM için aynı mesafe ve SNR değerinde PER değerinin SER değerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı hata olasılığı için, hata düzeltme kodları kullanılarak geleneksel DPIM yöntemine göre daha yüksek alıcı-verici mesafesinde veri iletiminin gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," *Phys. Commun.*, vol. 12, pp. 16–32, 2014.
- [2] J. G. Webster, A. R. Ndjiongue, H. C. Ferreira, and T. M. N. Ngatched, "Visible Light Communications (VLC) Technology," *Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng.*, no. October 2017, pp. 1–15, 2015.
- [3] S. Vappangi and V. V Mani, "Concurrent illumination and communication : A survey on Visible Light Communication," *Phys. Commun.*, vol. 33, pp. 90–114, 2019.
- [4] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, 2012.
- [5] L. U. Khan, "Visible light communication : applications , architecture , standardization and," *Digit. Commun. Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, 2017.
- [6] Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, N. L. Seed, and E. D. Kaluarachchi, "Digital pulse interval modulation for optical communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 12, pp. 95–99, 1998.
- [7] W. Chen, L. Wang, and C. Han, "Correcting Insertions / Deletions in DPPM Using Hidden Markov Model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 46417–46426, 2020.
- [8] S. Guo, K. Park, and M. Alouini, "Ordered Sequence Detection and Barrier Signal Design for Digital Pulse Interval Modulation in Optical Wireless Communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018.
- [9] U. Sethakaset and T. A. Gulliver, "Marker codes to correct insertion/deletion errors in differential pulse-position modulation for wireless infrared communications," *IEEE Pacific RIM Conf. Commun. Comput. Signal Process. - Proc.*, vol. 2005, pp. 181–184, 2005.
- [10] M. Bilim, "Karma Weibull/Log-Normal Sönümlenmeli Kanallın Hata Olasılığı Analizi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 7, no. 1, pp. 204–213, 2019.
- [11] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications*, no. c. CRC Press, 2013.
- [12] A. R. H. and B. W. Z. Ghassemlooy, "Reducing the effects of intersymbol interference in diffuse DPIM optical wireless communications," *IEE Proc.-Optoelectron.*, vol. 150, no. 5, pp. 445–452, 2003.

- [13] J. Ma, Y. Jiang, S. Yu, L. Tan, and W. Du, "Packet error rate analysis of OOK, DPIM and PPM modulation schemes for ground-to-satellite optical communications," *Opt. Commun.*, vol. 283, no. 2, pp. 237–242, 2010.
- [14] Z. Ghassemlooy, "Digital Pulse Interval Modulation : Spectral Behaviour," *Digit. Signal Process. Commun. Syst.*, no. January 1997, 1997.
- [15] U. Sethakaset and T. A. Gulliver, "Differential amplitude pulse-position modulation for indoor wireless optical channels," *GLOBECOM - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, vol. 3, pp. 1867–1871, 2004.
- [16] C. Science, M. Baltimore, and C. Baltimore, "An Adaptive DPPM for Efficient and Robust Visible Light Communication Across the Air-Water Interface," in *Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, 2020, vol. 29.