



Bardak, F. K., Namdar, M., Basgumus, A. and Mohjazi, L. (2023) A, sagı Yönlü NOMA Sistemlerinin Üstel Da ğılımlı Ğ Kanallar üzerindeki PEP Analizi = PEP Analysis of Downlink NOMA Systems over the Exponentially Distributed Channels. In: 31st IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications (SIU 2023), Istanbul, Turkey, 5-8 July 2023, ISBN 9798350343557 (doi: [10.1109/SIU59756.2023.10223743](https://doi.org/10.1109/SIU59756.2023.10223743))

There may be differences between this version and the published version. You are advised to consult the published version if you wish to cite from it.

<http://eprints.gla.ac.uk/302022/>

Deposited on 4 July 2023

Enlighten – Research publications by members of the University of Glasgow  
<http://eprints.gla.ac.uk>

# Aşağı Yönlü NOMA Sistemlerinin Üstel Dağılımlı Kanallar üzerindeki PEP Analizi

## PEP Analysis of Downlink NOMA Systems over the Exponentially Distributed Channels

Fatma Kebire Bardak<sup>1</sup>, Mustafa Namdar<sup>2</sup>, Arif Basgumus<sup>3</sup>, Lina Mohjazi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye  
e-mail: kbardak@bandirma.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye  
e-mail: mustafa.namdar@dpu.edu.tr

<sup>3</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye  
e-mail: basgumus@uludag.edu.tr

<sup>4</sup>James Watt School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom  
e-mail: Lina.Mohjazi@glasgow.ac.uk

**Özetçe** —Bu çalışmada, aşağı yönlü dikgen olmayan çoklu erişim sistemlerinin (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) performansı analiz edilmektedir. Önerilen sistem modelinde yakın ve uzak kullanıcılar için ikili hata olasılığına ait kapalı form matematiksel denklemler üstel dağılımlı kanal dikkate alınarak elde edilmektedir. Yakın ve uzak kullanıcıların ikili hata olasılığı başarımları, güç paylaşım katsayısı, düğümler arası mesafe, yol kaybı katsayısı parametreleri kullanılarak Monte Carlo benzetimleri ile incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler**—ikili hata olasılığı, NOMA, uzak kullanıcı, yakın kullanıcı.

**Abstract**—This study analyzes the performance of downlink non-orthogonal multiple access systems (NOMA). The closed-form mathematical equations of pairwise error probability (PEP) for the near and far users are obtained by considering the exponentially distributed channels in the proposed system model. The PEP performances of near and far users are analyzed with Monte Carlo simulations using the power allocation coefficient, the distance between the nodes, and path loss coefficient parameters.

**Keywords**—pairwise error probability, NOMA, far user, near user.

### I. GİRİŞ

Dikgen olmayan çoklu erişim (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), beşinci nesil (5G) kablosuz ağlarda spektrum kaynaklarının etkin kullanımını sağlamak için önerilen çoklu erişim yöntemlerinden biridir [1]. Zaman, frekans ve uzay düzlemlerinde çoğullama yöntemlerini kullanan tipik ortogonal çoklu erişim (OMA) yaklaşımlarının aksine, güç düzleminde çoğullama yaklaşımını kullanarak, kullanıcılar arasında spektrum paylaşımını kolaylaştırır. NOMA, farklı iletim güçleri yoluyla, farklı kullanıcıları ayırarak ve kullanıcıların aynı zaman-frekans kaynağını kullanmalarına imkan sunarak, daha

yüksek veri hızı ve daha düşük sistem kesinti performansı sağlar. Bunun gerçekleşmesi için de verici tarafta, birden fazla kullanıcıya değişen güç seviyelerine sahip ve üst üste bindirilmiş sinyal gönderilir. Alıcı tarafta ise üst üste binen bu sinyalleri ayırmak ve kullanıcılar arası girişimi azaltmak için ardışık girişim iptali (successive interference cancellation, SIC) kullanılır. Dolayısıyla NOMA, OMA sistemlerine kıyasla yüksek spektral verimliliği, düşük gecikmeyi ve yüksek hızlı veri iletimini amaçlayan bir teknik olarak ortaya çıkmaktadır [2]- [4].

NOMA sistem performansı, kesinti olasılığı, bit hata olasılığı ve ergodik kapasite analizi de dahil olmak üzere farklı araştırma alanlarında, literatürde çalışılan bir konu başlığı olarak yer almaktadır [5]- [7]. Öte yandan, belirli bir kullanıcı sinyalinin, diğer kullanıcıların sinyallerinden kaynaklanan girişim nedeniyle hatalı çözülme olasılığı olarak ifade edilen ikili hata olasılığı (pairwise error probability, PEP), NOMA'nın sistem performansını değerlendirmede kullanılan önemli parametrelerden biridir. İlave olarak, PEP analizi, bir kullanıcının iletilen sinyalinin hatalı bir şekilde farklı bir kullanıcının sinyali olarak algılanma olasılığının hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, hatalı kod çözme ve düşük sistem performansını değerlendirmek için gerçekleştirilen PEP analizi, aynı zaman-frekans kaynağını paylaşan kullanıcılar arasındaki girişim potansiyeli nedeniyle NOMA sistemleri için önemli başarımlar çıktılarında biri olarak ifade edilmektedir. Diğer yandan, kullanıcılar arası girişim, SIC tekniği kullanılarak azaltılabilirken, bu tekniğin etkinliği, güç tahsisine ve kod çözme sırasına bağlıdır. Bu nedenle, NOMA sistemlerinde PEP analizi ile hata olasılığının en aza indirilmesi ve sistem performansının en üst düzeye çıkarılması ile, en uygun güç tahsisi ve kod çözme sırası belirlenebilmektedir [8], [9].

NOMA sistem performansı, farklı parametreler ve çeşitli senaryolar üzerinden, literatürde çok sayıda araştırma kapsamında incelenmiştir. Örneğin, NOMA temelli bilişsel radyo ağlarda kısmi röle seçimi yardımı ile hata oranı performansı

girişim gücü kısıtlaması altında [10]'da çalışılmıştır. Burada, elde edilen matematiksel PEP ifadelerinden bit hata oranı için sınır değerlerinin tayin edildiği ve çeşitlilik derecesi için çıkarımlarda bulunulduğu görülmektedir. [11]'de yazarlar faz bozulmaları etkisi altındaki bir NOMA sisteminde PEP analizini, mükemmel olmayan SIC koşulu altında Rayleigh sönümlemeli kanallar için çalışmışlardır. Diğer bir çalışma olan [5]'te, NOMA sisteminin mükemmel olmayan SIC koşulu altında, Nakagami- $m$  sönümleme kanalları üzerindeki PEP performansı analiz edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, BER kısıtlamaları altında NOMA sistemindeki kullanıcılar için, güç tahsis problemi ele alınmıştır. Öte yandan, eş zamanlı kablosuz bilgi ve güç aktarımı (simultaneous wireless information power transfer, SWIPT) kullanan röle destekli NOMA sisteminin hata performansı [12]'de aktarılmıştır. Burada, sistemdeki tüm kullanıcılar için kapalı formda matematiksel PEP analizi çıkarımları türetilmiş ve aynı zamanda farklı enerji toplama senaryoları altında hata oranı performansı benzetim sonuçları ile sunulmuştur. Son olarak [13]'te yazarlar, donanım bozukluklarının röle yardımcı NOMA sistemi üzerindeki performans etkisini incelemiştir. Rayleigh sönümleme kanalı altındaki bir sistem için doğru PEP yaklaşımının elde edildiği bu çalışmada, çeşitlilik kazancı araştırılmıştır. Sonuçlar, donanım bozuklukları varlığının yüksek işaret-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) değerlerinde bir hata tabanına yol açtığını göstermektedir.

Bu bildiriye aşağı yönlü NOMA sistemlerinin üstel dağılımlı kanallar üzerindeki PEP Analizi çalışılmıştır: NOMA sistemindeki uzak ve yakın kullanıcılar için PEP ifadeleri, kapalı formdaki matematiksel denklemlerle sunulmaktadır. Üstel dağılımlı kanal üzerinden türetilen tam PEP ifadeleri mükemmel SIC koşulu altında analiz edilmektedir. Elde edilen ifadelerin doğrulanması ve her kullanıcının hata performansının gösterilmesi Monte Carlo benzetimleri ile incelenmektedir.

Çalışmanın II. bölümünde sistem modeline yer verilmektedir. Yakın ve uzak kullanıcılar için ikili hata olasılığına ilişkin performans analizleri III. bölümde aktarılmaktadır. Nümerik sonuçlar IV. bölümde sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlarının yorumlanmasına son bölümde değinilmiştir.

## II. SİSTEM MODELİ

Bu çalışmada, ikili hata olasılığı performans analizi gerçekleştirilerek, kaynak ( $S$ ) ve iki adet kullanıcıdan ( $CU_1$ ,  $CU_2$ ) oluşan aşağı yönlü NOMA sistem modeli değerlendirilmektedir. Kaynak ile kullanıcılar arasındaki erişimin NOMA tekniği ile gerçekleştiği kabul edilmektedir. Bilgi iletiminin üstel dağılımlı kanal üzerinden olduğu,  $CU_1$ 'in yakın kullanıcı,  $CU_2$ 'nin ise uzak kullanıcı olduğu varsayılmaktadır.  $S$ ,  $CU_1$  ve  $CU_2$  tek antenden oluşmaktadır. Bu durumda  $S$ 'den kullanıcılara gönderilen toplam bilgi işareti

$$s = \sqrt{P_s a_1} x_1 + \sqrt{P_s a_2} x_2, \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada,  $x_1$  ve  $x_2$  sırasıyla  $CU_1$  ve  $CU_2$  kullanıcıları için iletilen bilgi işaretini,  $P_s$ ,  $S$  tarafından iletilen toplam gücü belirtmektedir. Güç paylaşım katsayıları ise,  $CU_1$  ve  $CU_2$  kullanıcıları için sırasıyla  $a_1$  ve  $a_2$  olarak verilmekte,  $a_1 + a_2 = 1$  ve  $a_1 < a_2$  olarak alınmaktadır.

Bu durumda  $CU_1$  ve  $CU_2$  kullanıcılarında alınan toplam bilgi işareti ise

$$y_l = h_l s + n_l \quad (2)$$

olarak ifade edilmektedir.  $h_l$ ,  $S - CU_l$  arasındaki kanal katsayısını göstermekte ve  $l = \{1, 2\}$  olarak tanımlanmaktadır. Burada,  $n_l \sim CN(0, \sigma_{n_l}^2)$   $l$ . kullanıcının toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü (additive white Gaussian noise, AWGN) göstermektedir.

## III. PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde aşağı yönlü NOMA sistem modelinde yakın ve uzak kullanıcılar için ikili hata olasılığına (PEP) ait kapalı form matematiksel denklemler üstel dağılımlı kanal modeli dikkate alınarak elde edilmekte ve PEP başarımı sunulmaktadır.

### A. Yakın Kullanıcı ( $CU_1$ ) için PEP Analizi

İkili hata olasılığı, iletilen  $x_l$  işaretinin alıcı tarafta hatalı şekilde kestirilmesi oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümde, yakın kullanıcı  $CU_1$  için PEP analizi incelenmektedir. Yakın kullanıcı kendi bilgi işaretini çözmeden önce, ardışık girişim iptali (successive interference cancellation, SIC) yöntemini kullanarak uzak kullanıcının  $CU_2$  bilgisini toplam bilgi işaretinden çıkartmalıdır. Bu durumda, yakın kullanıcıda alınan toplam bilgi işareti

$$y_1 = \sqrt{P_s a_1} h_1 x_1 + \sqrt{P_s a_2} h_1 x_2 + n_1 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. SIC işleminden sonra elde edilen toplam bilgi işareti ise

$$y_1 = \sqrt{P_s a_1} h_1 x_1 + \sqrt{P_s a_2} h_1 \hat{\Delta}_2 + n_1 \quad (4)$$

olarak yazılmaktadır. Burada  $\hat{\Delta}_2 = x_2 - \hat{x}_2$  olarak tanımlanmaktadır. İletilen bilgi sembolü  $x$  ile ve hatalı sezilen bilgi işareti ise  $\check{x}$  ile gösterilmektedir.  $\check{x} \neq x$  olarak alınmaktadır. Yakın kullanıcı için koşullu PEP ifadesi

$$Pr(x_1 \rightarrow \check{x}_1 | h_1) = \Pr(|y_1 - \sqrt{P_s a_1} h_1 \check{x}_1|^2 \leq |y_1 - \sqrt{P_s a_1} h_1 x_1|^2) \quad (5)$$

şeklinde (5) numaralı denklem üzerinde gerekli matematiksel işlemler ve düzenlemeler yapıldığında koşullu PEP ifadesi

$$Pr(x_1 \rightarrow \check{x}_1 | h_1) = Pr\left(2|h_1 \check{\Delta}_1 n_1^*| \leq -|h_1|^2 \left(\sqrt{P_s a_1} \check{\Delta}_1\right)^2 + 2|\sqrt{P_s a_2} \check{\Delta}_1 \hat{\Delta}_2^*|\right) \quad (6)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada,  $\check{\Delta}_1 = (x_1 - \check{x}_1)$  ve  $g_1 = |h_1|$  olarak tanımlanmaktadır.  $n_1$  Gauss gürültüsünün reel kısmı, normal dağılımlı, 0 ortalamalı ve  $(\sigma^2/2)$  varyanslı olarak alınmaktadır ve  $2Re\{g_1 \check{\Delta}_1 n_1^*\} \sim N(0, 2\sigma_n^2 |g_1|^2 |\check{\Delta}_1|^2)$  şeklinde tanımlanmaktadır. Dolayısıyla koşullu PEP ifadesi,  $\Lambda \sim$

$N(\mu, \sigma^2)$  şeklinde yazıldığında ve  $Pr(\Lambda \leq \delta) = \vartheta\left(\frac{\delta - \mu}{\sigma}\right)$  yaklaşımı kullanıldığına

$$Pr(x_1 \rightarrow \check{x}_1 | g_1) = \vartheta\left(\frac{g_1 \beta_1}{v_1}\right) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{g_1 \beta_1}{\sqrt{2} v_1}\right)\right) \quad (7)$$

elde edilmektedir. Burada,  $\vartheta(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  Gauss-Q fonksiyonudur.

$\beta_1 = \left(\sqrt{P_s a_1} |\check{\Delta}_1|^2 + 2\sqrt{P_s a_2} \operatorname{Re}\left\{\check{\Delta}_1 \check{\Delta}_2^*\right\}\right)$ ,  $v_1 = \sqrt{2} \sigma_n |\check{\Delta}_1|$  şeklinde tanımlanmaktadır. Burada,  $g_1$  üstel dağılıma sahiptir. Birinci kullanıcının en zayıf kanala sahip olduğu varsayıldığında, geriye kalan kullanıcılar için kanal kazancı, artan sıraya göre sıralanmaktadır.  $k$ . kullanıcının kanal kazancının sıralı olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ifadesi, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$f_k(w_k) = A_k f(w_k) [F(w_k)]^{k-1} [1 - F(w_k)]^{K-k}. \quad (8)$$

Burada,  $A_k = \frac{K!}{(k-1)!(K-k)!}$  olarak tanımlanmaktadır ve  $K$ , toplam kullanıcı sayısını ifade etmektedir. İki kullanıcıli sistemlerde (8),  $k = 2$  için yani yakın kullanıcının sıralı kanalına sahiptir. Dolayısıyla,  $CU_1$  yakın kullanıcısı için PEP ifadesi  $g_1$ 'in sıralı PDF ifadesi ile (8)'de gösterildiği üzere hesaplanmaktadır

$$Pr(x_1 \rightarrow \check{x}_1 | g_1) = \int_0^\infty f_1(g_1) \vartheta\left(\frac{g_1 \beta_1}{v_1}\right) dg_1. \quad (9)$$

Bu durumda  $CU_1$  kullanıcısı için PEP ifadesi Mathematica programı yardımı ile

$$Pr(x_1 \rightarrow \check{x}_1) \cong \frac{1}{2} \left(1 - 2e^{-\frac{\lambda^2 v_1^2}{2\beta_1^2}} \operatorname{erfc}\left[\frac{\lambda v_1}{\sqrt{2}\beta_1}\right] + e^{-\frac{2\lambda^2 v_1^2}{\beta_1^2}} \operatorname{erfc}\left[\frac{\sqrt{2}\lambda v_1}{\beta_1}\right]\right) \quad (10)$$

şeklinde elde edilmektedir.

### B. Uzak Kullanıcı ( $CU_2$ ) için PEP Analizi

Bu bölümde, uzak kullanıcı  $CU_2$  için PEP analizi incelenmektedir.  $CU_2$  kullanıcısı, aldığı toplam işaretten yakın kullanıcı olan  $CU_1$  kullanıcısının bilgisini gürültü olarak değerlendirir ve kendi bilgi işaretini çözümler. Bu durumda,  $CU_2$  kullanıcısının aldığı toplam işaret

$$y_2 = \sqrt{P_s a_1} h_2 x_1 + \sqrt{P_s a_2} h_2 x_2 + n_2, \quad (11)$$

ile ifade edilmektedir.  $CU_2$  uzak kullanıcısı için şartlı PEP aşağıdaki denklem ile hesap edilmektedir

$$Pr(x_2 \rightarrow \check{x}_2 | h_2) = \left(|y_2 - \sqrt{P_s a_2} h_2 \check{x}_2|^2 \leq |y_2 - \sqrt{P_s a_1} h_2 x_2|^2\right). \quad (12)$$

(12)'de gerekli matematiksel işlemler yapıldığında, şartlı PEP ifadesi (13) ile gösterilmektedir

$$Pr(x_2 \rightarrow \check{x}_2 | h_2) = \left(2|h_2 \check{\Delta}_2 n_2^*| \leq -|h_2|^2 \left(\sqrt{P_s a_2} |\check{\Delta}_2|^2 + 2|\sqrt{P_s a_1} |\check{\Delta}_2 \check{x}_1^*|\right)\right). \quad (13)$$

Burada  $\check{\Delta}_2 = (x_2 - \check{x}_2)$  ve  $g_2 = |h_2|$  olarak verilmektedir. (13)'teki  $n_2$  Gauss gürültüsünün reel kısmı, normal dağılımlı, 0 ortalamalı ve  $\sigma_n^2/2$  varyanslı olarak alınmaktadır. Karar değişkeninin reel kısmı aşağıda (14) ile ifade edilmektedir

$$2\operatorname{Re}\{h_2 \check{\Delta}_2 n_2^*\} \sim N\left(0, 2\sigma_n^2 |h_2|^2 |\check{\Delta}_2|^2\right). \quad (14)$$

(13), (14)'e göre yazıldığında ve  $\vartheta(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$  ifadesi yardımıyla şartlı PEP ifadesi

$$Pr(x_2 \rightarrow \check{x}_2 | g_2) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{g_2 \beta_2}{\sqrt{2} v_2}\right]. \quad (15)$$

olarak elde edilmektedir,  $\beta_2 = \left(\sqrt{P_s a_2} |\check{\Delta}_2|^2 + 2\sqrt{P_s a_1} \operatorname{Re}\left\{\check{\Delta}_2 \check{x}_1^*\right\}\right)$  ve  $v_2 = \sqrt{2} \sigma_n |\check{\Delta}_2|$  şeklinde tanımlanmaktadır. Burada,  $g_2$  üstel dağılımına sahiptir. Rastgele değişken şartı altında PEP ifadesi  $g_2$ 'nin sıralı PDF ifadesi ile aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir

$$Pr(x_2 \rightarrow \check{x}_2) = \int_0^\infty f_2(g_2) \vartheta\left(\frac{g_2 \beta_2}{v_2}\right) dg_2. \quad (16)$$

$f_2(g_2)$  ordered PDF ifadesi  $f_2(g_2) = 2\lambda(e^{-2\lambda g_2})$  ile hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, uzak kullanıcı  $CU_2$  için koşulsuz PEP ifadesi Mathematica programı yardımı ile

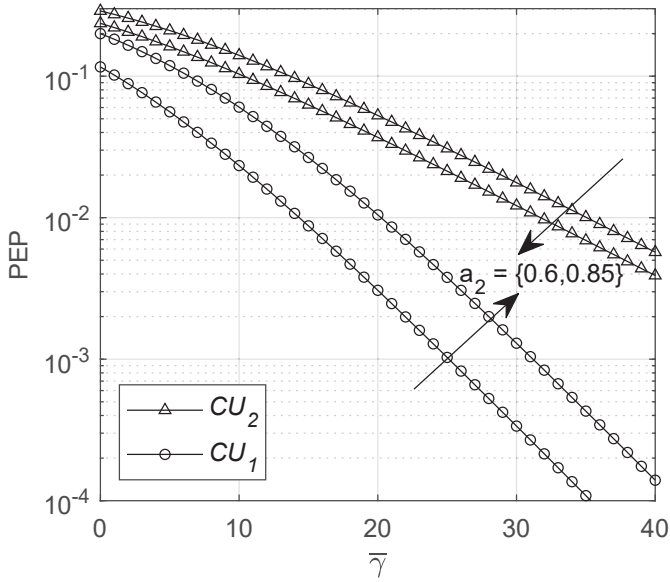
$$Pr(\check{x}_2 \rightarrow \check{x}_2) = \frac{1}{2} \left(1 - e^{-\frac{\lambda^2 v_2^2}{2\beta_2^2}} \operatorname{erfc}\left[\frac{\lambda v_2}{\sqrt{2}\beta_2}\right]\right) \quad (17)$$

şeklinde elde edilmektedir.

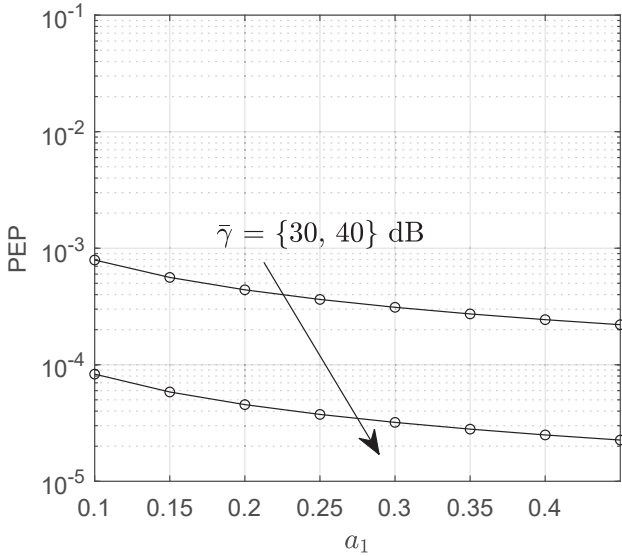
## IV. NÜMERİK SONUÇLAR

Şekil 1'de uzak ve yakın kullanıcılar için ikili hata olasılığı performansının ortalama işaret gürültü oranı (İGO) ile değişimi sunulmaktadır. Burada, uzak kullanıcının güç paylaşım katsayısı  $a_2$ 'nin 0.6 ve 0.85 değerlerini alması durumunda sistem performansına etkisi gösterilmektedir. Uzak kullanıcıya yüksek güç tahsis edilmesi durumunda, ikili bit hata olasılığı uzak kullanıcı için azalırken, yakın kullanıcı için bu değer artmaktadır. Yakın kullanıcı için sistem performansı kötüleşirken, uzak kullanıcı başarımı iyileşmektedir.

Şekil 2'de PEP değerinin, yakın kullanıcının güç paylaşım katsayısı olan  $a_1$  ile değişimi sunulmaktadır. Burada, ortalama İGO değerlerinin sırasıyla 30 ve 40 dB kullanılması durumunda sistem başarımı incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, İGO değeri arttığında, ikili bir hata olasılığının azaldığı, dolayısıyla sistem performansının iyileştiği görülmektedir.



Şekil 1: İkili hata olasılığının ortalama İGO ile değişimi.



Şekil 2: Yakın kullanıcı için ikili hata olasılığının  $a_1$  ile değişimi.

## V. SONUÇ VE YORUMLAR

Bu çalışmada, ikili hata olasılığı analizi açısından NOMA'da uzak ve yakın kullanıcı için sistem performansı incelemektedir. Uzak ve yakın kullanıcılara ait ikili hata olasılığının üstel dağılımlı kanal altında kapalı form matematiksel

ifadeleri türetilmiştir. Sistem başarımı yakın kullanıcıda SIC uygulandığı durumda, güç paylaşım katsayısı, düğümler arası mesafe, yol kaybı katsayısı parametreleri ve ortalama işaret gü-rültü oranı dikkate alınarak, Monte Carlo benzetimiyle analiz edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] L. Lv, J. Chen, Q. Ni, Z. Ding, and H. Jiang, "Cognitive non-orthogonal multiple access with cooperative relaying: A new wireless frontier for 5G spectrum sharing," *IEEE Comm. Magazine*, vol. 56, no. 4, pp. 188-195, 2018.
- [2] F. Bardak, M. Namdar, A. Başgümüş, "Röle Yardımlı Aşağı yönlü NOMA Sistemlerinin Bilişsel Radyo Ağlardaki Ergodik Kapasite Analizi," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 9, no. 3, pp. 992-1002, 2021.
- [3] I. Umakoglu, M. Namdar, A. Başgumus, F. Kara, H. Kaya and H. Yanikomeroglu, "BER Performance Comparison of AF and DF Assisted Relay Selection Schemes in Cooperative NOMA Systems," 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Bucharest, Romania, 2021, pp. 1-6, 2021.
- [4] F. Kara and H. Kaya, "Error Probability Analysis of NOMA-Based Diamond Relaying Network," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 2280-2285, Feb. 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2956199.
- [5] L. Bariah, S. Muhaidat and A. Al-Dweik, "Error Probability Analysis of Non-Orthogonal Multiple Access Over Nakagami-  $m$  Fading Channels," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 2, pp. 1586-1599, Feb. 2019.
- [6] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor "Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple-access downlink transmissions," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 8, pp. 6010-6023, 2015.
- [7] Y. Liu, Z. Ding, M. Elkashlan, and J. Yuan "Nonorthogonal multiple access in large-scale underlay cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 12, pp. 10152-10157, 2016.
- [8] M. Li, S. Huang, L. Tian, O. Alhusssein, and S. Muhaidat, "Error rate performance of NOMA system with full-duplex cooperative relaying," *Physical Communication*, vol. 49, 2021.
- [9] M. Uysal, "Diversity analysis of space-time coding in cascaded Rayleigh fading channels," in *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 165-167, March 2006
- [10] L. Bariah, S. Muhaidat and A. Al-Dweik, "Error performance of NOMA-based cognitive radio networks with partial relay selection and interference power constraints," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 2, pp. 765-777, 2019.
- [11] L. Bariah, B. Selim, L. Mohjazi, S. Muhaidat, P. C. Sofotasios and W. Hamouda, "Pairwise Error Probability of Non-Orthogonal Multiple Access with I/Q Imbalance," 2019 UK/ China Emerging Technologies (UCET), Glasgow, UK, pp. 1-4, 2019.
- [12] L. Bariah, S. Muhaidat and A. Al-Dweik, "Error Probability Analysis of NOMA-Based Relay Networks With SWIPT," in *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 7, pp. 1223-1226, July 2019.
- [13] L. Mohjazi, L. Bariah, S. Muhaidat, P. C. Sofotasios, O. Onireti and M. A. Imran, "Error Probability Analysis of Non-Orthogonal Multiple Access for Relaying Networks with Residual Hardware Impairments," 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1-6, 2019.