



## The error performance analysis of the decode-forward relay-aided-NOMA systems and a power allocation scheme for user fairness

Ferdi Kara<sup>\*</sup> , Hakan Kaya<sup>\*</sup>

Electrical-Electronics Engineering, Zonguldak Bulent Ecevit University, Zonguldak, 67100, Turkey

### Highlights:

- The integration of the NOMA techniques with a relay using decode-forward (DF) protocol
- Derivation of the theoretical bit error probability expressions for the DF relay-aided-NOMA
- Sub-optimum power allocation algorithm for the DF relay-aided-NOMA by considering user fairness

### Keywords:

- Relay-aided-NOMA
- cooperative
- ABEP
- power allocation
- user fairness

### Article Info:

Research Article  
Received: 07.07.18  
Accepted: 21.12.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.441452

### Acknowledgement:

This work is supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey under 2211-E program.

### Correspondence:

Author: Ferdi KARA  
e-mail: f.kara@beun.edu.tr  
phone: +90 372 291 1910

### Graphical/Tabular Abstract

The system model is shown below.

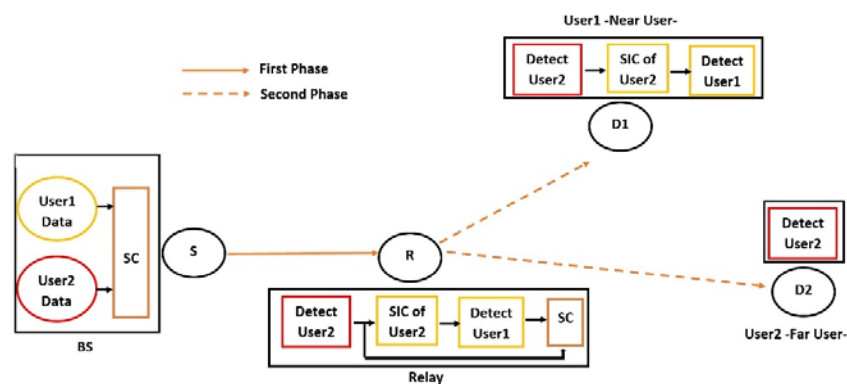


Figure A. The illustration of decode-forward relay-aided-NOMA

**Purpose:** In this paper, by the integration of the NOMA techniques with the cooperative relaying, a new waveform design with high spectral efficiency and coverage is proposed for the future radio access networks. It is aimed to reveal bit error rate performance of the proposed systems. Furthermore, by developing a sub-optimum power allocation algorithm, is purposed to enhance user fairness in terms of the error performance.

### Theory and Methods:

In this paper, we proposed to use a decode-forward (DF) relay for assisting NOMA users when the direct communication is not available no longer from base station (BS) to users. In the system model, it is assumed that all links between the nodes are flat fading and have envelope of the Rayleigh distributed. By considering the signal-to-noise ratio (SNR) of the SC signals, the bit error probability (BEP) expressions are derived for each phase of the communication when the maximum likelihood (ML) detector and SIC are implemented at the receivers. Then, by applying cooperative communication protocols, the end-to-end (E2E) BEP for the DF relay-aided-NOMA is obtained. To maximize the user fairness in terms of the error fairness, the power allocation coefficients at the BS and relay are determined by using tree-based search (TBS) algorithm.

### Results:

The E2E average bit error probability (ABEP) of the relay-aided-NOMA system is derived in a closed-form. The derived expressions are validated through Monte Carlo simulations in different scenarios and match perfectly with simulations. The proposed TBS power allocation algorithm improves the user fairness and achieves proportional fairness index of very close to 1 for almost each scenario.

### Conclusion:

The interplay between NOMA and relaying system is a strong candidate for the future radio access networks to serve with high spectral efficiency and coverage. Since the error performance of the system mostly depends on the link quality of the relay which assists to NOMA users, the relay selection within the multiple users/relays is essential. Hence, the error analysis of relay-aided-NOMA systems should be handled when the relay selection schemes is implemented. Moreover, the proposed TBS power allocation algorithm guarantees improving proportional fairness index of users. The TBS algorithm offers a solution with low complexity than the optimal power allocation algorithm which searches all possible coefficients.



## Çöz-aktar röle-yardımlı-NOMA sistemlerinin hata başarımlarının analizi ve kullanıcılar arası adillik için bir güç paylaşım protokolü

Ferdi Kara\*<sup>1</sup>, Hakan Kaya<sup>2</sup>

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 67100, İncivez, Zonguldak, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çöz-Aktar (DF) Protokolü kullanan bir röle ile NOMA tekniğinin entegrasyonu
- DF röle-yardımlı-NOMA sistemi için bit hata olasılığı ifadelerinin teorik olarak elde edilmesi
- DF röle-yardımlı-NOMA'da kullanıcılar arası adillik için optimumuma yakın güç paylaşım algoritması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 07.07.2018  
Kabul: 21.12.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.441452

### Anahtar Kelimeler:

Röle-Yardımlı-NOMA,  
işbirlikli,  
ABEP,  
güç paylaşımı,  
kullanıcılar arası adillik

### ÖZET

Dikgen-olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access -NOMA) sunduğu yüksek spektral verimlilik ve kitlesel iletişim potansiyeli nedeniyle yeni nesil ağlar için önemli bir aday teknik konumundadır. Ayrıca diğer fiziksel seviye teknikleriyle beraber kolayca uygulanabilmesi de NOMA için önemli bir avantaj getirmektedir. İşbirlikli iletişim ile NOMA'nın beraber kullanıldığı röle-yardımlı NOMA sistemleri yüksek spektral verimlilik ve kitlesel iletişimin yanı sıra geniş kapsama alanı da sunmaktadır. Bu nedenle son yıllarda çok sayıda çalışmaya konu olmuştur. Fakat, yapılan çalışmaların çoğunda önerilen sistemler kesinti olasılığı ve toplam sistem kapasitesi başarımları açısından ele alınmış olup bit hata başarımları göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada, çöz-aktar (decode-forward -DF) protokolü kullanılan röle-yardımlı NOMA sistemi için teorik uçtan uca (end-to-end -E2E) ortalama bit hata olasılığı (average bit error probability -ABEP) ifadeleri kapalı-formda türetilmiştir. Elde edilen ifadeler Monte Carlo benzetimleri ile doğrulanmıştır. Sistemin E2E hata başarımları değişen sistem parametrelerine göre incelenmiştir. Ayrıca hata başarımları açısından kullanıcılar arası adillik/eşitlik gözetilerek optimum güç paylaşım katsayısının ne olması gerektiği tartışılmış ve oransal adillik (proportional fairness -PF) indeksine göre optimumuma yakın bir güç paylaşımı algoritması sunulmuştur.

## The error performance analysis of the decode-forward relay-aided-NOMA systems and a power allocation scheme for user fairness

### H I G H L I G H T S

- The integration of the NOMA techniques with a relay using decode-forward (DF) protocol
- Derivation of the theoretical bit error probability expressions for the DF relay-aided-NOMA
- Sub-optimum power allocation algorithm for the DF relay-aided-NOMA by considering user fairness

### Article Info

Research Article  
Received: 07.07.2018  
Accepted: 21.12.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.441452

### Keywords:

Relay-aided-NOMA,  
cooperative,  
ABEP,  
power allocation,  
user fairness

### ABSTRACT

Non-orthogonal multiple access (NOMA) is a major candidate technology for the future radio networks due to its potential to have high spectral efficiency and to support massive connections. It is also an important advantage for the NOMA to be very compatible with the other physical layer techniques. The relay-aided-NOMA which consists of the interplay between cooperative communication and NOMA, offers very large coverage area besides the high spectral efficiency and the massive connectivity. Hence, the relay-aided-NOMA has great recent attention. Most of these studies are devoted to reveal outage probability and the overall system capacity performances of the systems. However, the bit error performances have been ignored. In this paper, theoretical end-to-end (E2E) average bit error probability (ABEP) expressions are derived for the relay-aided-NOMA using a relay with the decode-forward (DF) protocol. The derived expressions are validated through Monte Carlo simulations. The E2E error performance of the system are examined for different system parameters. Moreover, by considering user fairness in terms of error performance, it is discussed how the optimum power allocation should be done. And finally, a sub-optimum power allocation algorithm is presented according to the proportional fairness index.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: f.kara@beun.edu.tr, hakan.kaya@beun.edu.tr / Tel: +90 372 291 1910

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelecek nesil hücreli ağlar (future radio networks -FRN) için yüksek spektral verimlilik, kitlesel iletişimi destekleyebilme, çok geniş kapsama alanı ve düşük gecikme gibi isterler sağlanması gereken önemli parametreler olacaktır [1]. Tüm bu isterlerin tek bir dalga formu tarafından sağlanması mümkün değildir [2]. Bu nedenle, FRN'lerin birçok fiziksel seviye tekniklerinin beraber kullanıldığı heterojen yapıda olması beklenmektedir [3]. Dikgen-olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access -NOMA) de önerilen bu fiziksel seviye tekniklerden biri konumundadır [4]. NOMA kullanıcılar için yüksek spektral verimlilik sunmakta [5] ve ayrıca kitlesel iletişim (massive type communication) gerektiren uygulamalar için de en önemli bir aday olarak öne çıkmaktadır [6]. NOMA temel olarak vericide süperpozisyon kodlaması (superposition coding -SC) ve alıcılarda ise ardışık girişim giderici (successive interference canceler -SIC) kullanılması prensibine dayanmaktadır [7]. Vericide SC gerçekleştirilerek kullanıcılar yeni bir eksen olarak güç ekseninde bölünür ve böylece kullanıcıların aynı radyo kaynaklarını -frekans, zaman- kullanması mümkün olmaktadır. Alıcılarda gerçekleştirilen SIC işlemleri sayesinde de kullanıcılar arası girişim (inter-user interference -IUI) giderilerek verilerin sezilmesi mümkün olmaktadır [8]. FRN'ler için NOMA kullanımı ilk olarak [9]'da önerilmiş ve NOMA'nın geleneksel Dikgen çoklu erişim (orthogonal multiple access -OMA) tekniklerine göre üstünlük sağladığı, kesinti olasılığı ve toplam sistem kapasitesi başarımları açısından gösterilmiştir. Bu potansiyelinden kaynaklı NOMA akademiden ve endüstriden araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiş ve son yıllarda yayınlanan oldukça fazla çalışma olmuştur. Aşağı yönlü iletişimde (downlink) rastgele durumda bulunan kullanıcılar için kesinti olasılığı ve toplam sistem kapasitesi ifadeleri elde edilerek, bu durumda da NOMA'nın OMA'ya üstünlük sağladığı gösterilmiştir [10]. NOMA tekniğinin bit hata oranı (bit error rate -BER) başarımları toplamsal beyaz Gauss gürültülü (additive white Gaussian noise -AWGN) kanallarda yukarı yönlü iletişim (uplink) için ortaya konmuştur [11]. Hem aşağı yönlü hem de yukarı yönlü iletişim için sönümlemeli kanallarda bit hata olasılığı (bit error probability -BEP) ifadeleri türetilmiştir [12]. NOMA tekniğinde başarımlar açısından kullanıcılar arası adilğin/eşitliğin sağlanması araştırılmıştır [13]. Kesinti olasılığı başarımları açısından kullanıcılar arası adillik, oransal adillik (proportional fairness) indeksine göre sağlanmıştır [14]. Ayrıca NOMA sistem başarımlarının artırılması için kullanıcıların gruplanması gerektiğine dikkat çekilmiş ve farklı sayıdaki kullanıcı grupları için sistem başarımları araştırılmıştır [15]. Kullanıcı gruplama işleminin güç paylaşımı ile birlikte dinamik olarak yapılması da önerilmiştir [16]. NOMA sisteminin klasik OMA'ya göre kesinti olasılığı başarımları açısından üstünlük sağlaması için güç paylaşım kriterlerinin alt ve üst sınırları teorik olarak elde edilmiştir [17]. NOMA'da alıcılarda gerçekleştirilen SIC işlemi sırasında diğer kullanıcılara ait veriler elde edildiğinden NOMA kullanıcıları arasında işbirlikli iletişim

uygulanması önerilmiş ve İşbirlikli-NOMA için kesinti olasılığı ve toplam sistem kapasitesi başarımları ortaya konmuştur [18]. İşbirlikli-NOMA için bit hata başarımları ifadeleri de kapalı formda türetilmiştir [19].

Tüm bunlara ek olarak NOMA tekniğinin diğer fiziksel seviye teknikleriyle beraber kolayca kullanılabilirliği önemli bir avantajdır [20]. Bu nedenle NOMA'nın MIMO [21], işbirlikli iletişim [22], bilişsel radyo [23] vb. diğer tekniklerle beraber kullanılmasını inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Özellikle işbirlikli iletişim ile birlikte kullanımı FRN'ler için geniş kapsama alanını sağlayabilmesi açısından öne çıkmaktadır [24]. NOMA kullanıcıları ile iletişimin kuvvetlendir-aktar (amplify-forward -AF) protokolü kullanan bir röle üzerinden sağlandığı durum için sistemin kesinti olasılığı elde edilmiştir [25]. Yine bir AF röle yardımı ile iletişim kurulan NOMA sistemi için toplam kapasite başarımları elde edilmiştir [26]. Ayrıca çöz-aktar (decode-forward -DF) protokolü kullanan bir röle yardımıyla NOMA kullanıcıları ile iletişimin sağlandığı röle-yardımlı-NOMA sistemi için kesinti olasılığı başarımları da araştırılmıştır [27]. Ortamda bulunan çok sayıda röleden bir tanesinin seçilerek röle-yardımlı-NOMA sisteminin uygulandığı durumlar için de kesinti olasılığı ve toplam sistem kapasitesi başarımları araştırılmıştır [28]. Fakat, bugüne kadar yapılan çalışmalarda röle-yardımlı-NOMA sistemlerinin bit hata başarımlarının ne olacağı göz ardı edilmiştir.

Bu makalede, DF röle-yardımlı-NOMA sistemi için teorik olarak BEP ifadeleri kapalı formda türetilmiştir. Türetilen ifadeler Monte Carlo benzetimleri ile desteklenmiştir. Makalenin bundan sonraki bölümleri şu şekilde oluşmaktadır: Bölüm 2'de sistem modeli gösterildikten sonra, verilen sistem modelinde her bir kullanıcı için her bağlantı arasındaki BEP ifadeleri ayrı ayrı elde edilerek sistemin uçtan uca (end-to-end -E2E) ortalama bit hata olasılığı (average bit error probability -ABEP) ifadeleri Bölüm 3'te türetilmiştir. Bölüm 4'te ABEP başarımları açısından oransal adillik indeksini göz önünde bulunduran optimumuma yakın bir güç paylaşımı algoritması sunulmuştur. Daha sonra, Bölüm 5'te DF röle-yardımlı-NOMA sistemi için farklı senaryolar altında benzetim sonuçları verilerek Bölüm 3'te türetilen ifadeler doğrulanmıştır. Son olarak Bölüm 6'da sonuçlar tartışılarak makale sonlandırılmıştır.

## 2. SİSTEM MODELİ (SYSTEM MODEL)

Bu çalışmada iki kullanıcının bulunduğu bir NOMA sistemi için DF protokolü kullanan bir röle (R) yardımı ile toplam haberleşmenin iki atlamada gerçekleştirildiği sistem incelenmiştir. İlk zaman diliminde baz istasyonu (BS -S), SC kullanarak kullanıcılara ait verileri röleye göndermektedir. İkinci zaman diliminde ise DF rölede çözölen kullanıcı sinyalleri yine SC kullanarak kullanıcılara iletilmektedir. Röle ile arasındaki kanal katsayısı daha iyi olan yakın kullanıcıda (kullanıcı1-D1) SIC işlemi gerçekleştirilmektedir. Daha kötü kanal durumuna sahip olan

uzak kullanıcıda (kullanıcı2-D2) ise yakın kullanıcı verilerine gürültü gibi davranılarak sezme işlemi gerçekleştirilmektedir. BS tek verici anten, R bir verici ve bir alıcı anten, kullanıcılar ise bir alıcı antenle donatılmıştır. BS ile kullanıcılar arasındaki doğrudan bağlantının kuvvetli bir şekilde sönmüldüğü varsayılarak, BS ile kullanıcılar arasındaki bağlantısının sadece röle yardımı ile gerçekleştirildiği düşünülmektedir. Sistem modeli Şekil 1’de gösterilmiştir.

İlk zaman diliminde S-R arasında iletişim sonucunda R’de alınan işaret

$$y_{SR} = h_{SR}x_{SC} + w_{SR} \quad (1)$$

(Eş. 1) şeklindedir. Burada  $h_{SR}$  ve  $w_{SR}$  sırasıyla S-R arasındaki düz sönmülemeli kanal katsayısını ve AWGN’yi göstermektedir.  $x_{SC}$  ise SC uygulanmış toplam işareti ifade eder.  $x_1$  ve  $x_2$  kullanıcılara ait işaretler olmak üzere

$$x_{SC} = \sqrt{\alpha P_s}x_1 + \sqrt{(1-\alpha)P_s}x_2 \quad (2)$$

(Eş. 2) olarak tanımlanır [5, 29]. Burada  $P_s$ , BS verici gücünü  $\alpha$  ise BS güç paylaşım katsayısını göstermektedir. Rölede en büyük olasılıklı (maximum likelihood -ML) sezici ile uzak kullanıcı işareti  $\tilde{x}_2$  sezildikten sonra sezilen  $\tilde{x}_2$  işaretleri toplam alınan  $y_{SR}$  işaretinden çıkarılır -SIC işlemi-. Daha sonra, yine ML kullanılarak  $\tilde{x}_1$  işaretine karar verilir. Kullanıcılara ait modülasyon seviyeleri kullanıcıların kanal durumlarına göre belirlenmiştir. Daha iyi kanal durumuna sahip yakın kullanıcı- kullanıcı1- için dikgen faz kaydırmalı anahtarlama (quadrature phase shift keying -QPSK) kullanılırken, daha kötü kanala sahip uzak kullanıcı - kullanıcı2- ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying -BPSK) kullanıldığı durum ele alınmıştır. Karar verilen yakın kullanıcı ve uzak kullanıcı işaretleri tıpkı BS de olduğu gibi SC kullanarak kullanıcılara iletilir. Bu durumda her bir kullanıcıda alınan işaret

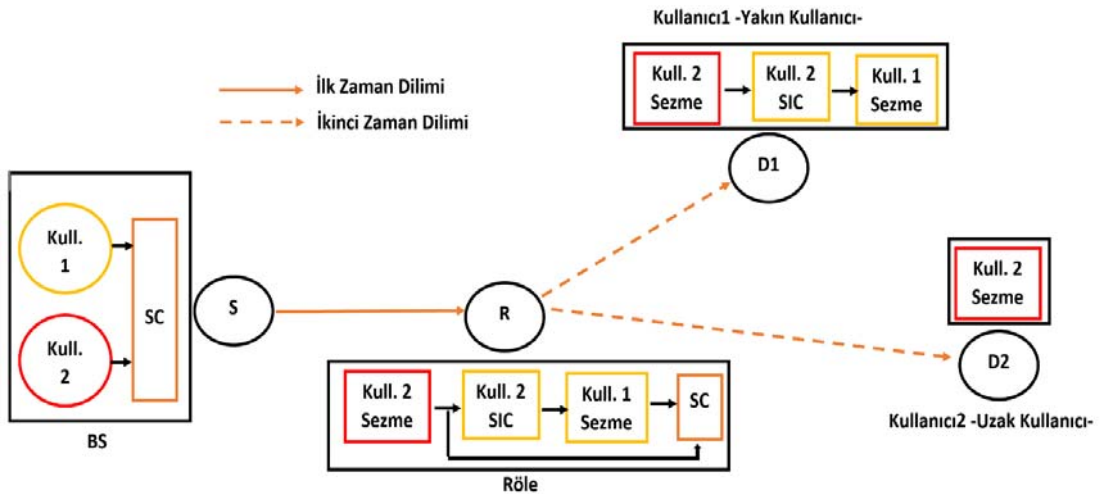
$$y_{RD,i} = h_{RD,i}\tilde{x}_{SC} + w_{R,i} \quad i = 1,2 \quad (3)$$

olur (Eş. 3) [8, 28]. Burada  $h_{RD,i}$  ve  $w_{R,i}$  sırasıyla röle ile kullanıcı  $i$  arasındaki sönmüleme kanal katsayısını ve  $i$ . alıcıdaki AWGN’yi ifade etmektedir.  $\tilde{x}_{SC}$  rölede çözülen kullanıcı sembollerin tekrar SC kullanılarak birleştirilmesi sonucu oluşan işarettir ve  $\tilde{x}_{SC} = \sqrt{\rho P_R}\tilde{x}_1 + \sqrt{(1-\rho)P_R}\tilde{x}_2$  olarak ifade edilir. Burada,  $P_R$  röle verici gücünü ve  $\rho$  röle güç paylaşım katsayısını göstermektedir. Alınan  $y_{RD,i}$  işaretlerinden kullanıcılar kendilerine ait verileri sezmektedir. Yakın kullanıcı olan D1 düğümünde SIC işlemi gerçekleştirilirken, uzak kullanıcı olan D2 düğümünde yakın kullanıcı işaretlerine gürültü gibi davranarak ML kullanarak kendi verilerini sezecektir.

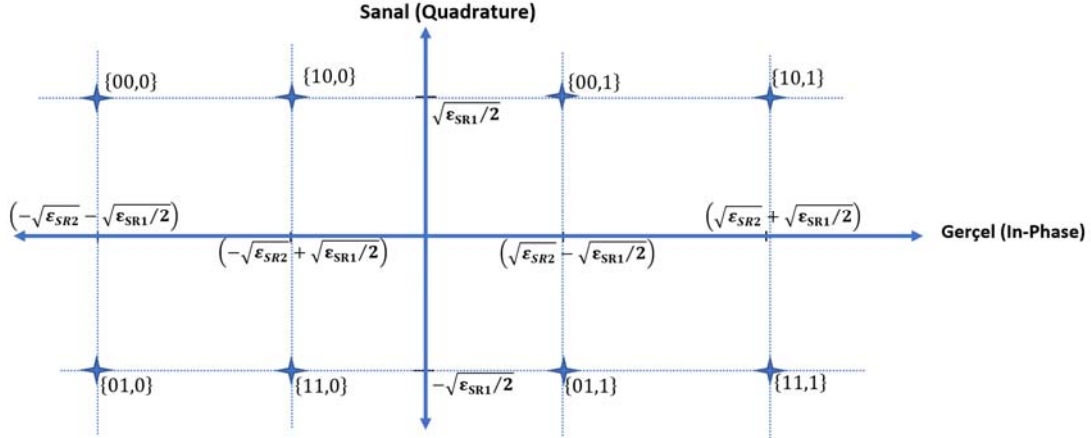
### 3. E2E BEP ANALİZİ (E2E BEP ANALYSIS)

Sistemde bulunan her bir kullanıcı için E2E BEP hesaplanabilmesi için her iki zaman dilimindeki BEP ifadelerinin bulunması gerekmektedir. Yakın kullanıcı için QPSK ve uzak kullanıcı için BPSK kullanıldığı durumda BS tarafından gönderilen toplam  $x_{SC}$  işareti için temel bant işaret uzayı Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’de  $\varepsilon_{SR,1} = \alpha P_s$  ve  $\varepsilon_{SR,2} = (1-\alpha)P_s$  sırasıyla kullanıcı1 ve kullanıcı2 sembol enerjilerini ifade etmektedir.  $\{i_{1,2}, i_{1,1}, i_2\}$  formunda gösterilen  $x_{SC}$  sembol bitleri için, ilk alt indis kullanıcıyı ikinci alt indis ise o kullanıcıya ait bit sırasını ifade etmektedir.

R düğümünde gerçekleştirilen sezme işlemi sırasında öncelikle kullanıcı2 sembollerine karar verilir. Kullanıcı2 sembolleri için BPSK kullanıldığından ML karar kuralı, alınan  $y_{SR}$  işaretinin gerçel (in-phase) bileşeninin sıfırdan “0” küçük olup olmaması olarak tanımlanır ( $y_{SR,i} < 0$  veya  $y_{SR,i} \geq 0$ ) [30]. Bu durumda R düğümünde kullanıcı2 sembolleri için BEP ifadesi [12] ve [31] yardımı ile



Şekil 1. DF röle-yardımlı-NOMA sistem modeli gösterimi (Illustration of the DF relay-aided NOMA system model)



Şekil 2. BS'de SC uygulanmış toplam işaret uzayı (Total signal space with SC at the BS)

$$P_{SR,2}(e) = \frac{1}{2} \times \left[ P\left(n_I \geq \sqrt{\epsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\epsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR}\right) + P\left(n_I \geq \sqrt{\epsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\epsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR}\right) \right] \quad (4)$$

(Eş. 4) olarak bulunur. Burada  $n_I$  AWGN'nin in-phase bileşenini göstermektedir.  $n_I$ , "0" ortalamaya ve  $N_0/2$  varyansa sahip bir Gauss rastgele değişkenidir. Şekil 2'de verilen  $x_{SC}$  işaret uzayı incelendiğinde in-phase enerji seviyesi açısından iki gruba ayrılabilir. A grubu  $x_{SC} = \{00,0\}, \{01,0\}, \{10,1\}$  ve  $\{11,1\}$  sembollerinden oluşurken, B grubu  $x_{SC} = \{00,1\}, \{01,1\}, \{10,0\}$  ve  $\{11,0\}$  sembollerinden oluşmaktadır. Buna göre,  $\gamma_{SR,A} = \frac{(\sqrt{2\epsilon_{SR,2}} + \sqrt{\epsilon_{SR,1}})^2 \times |h_{SR}|^2}{N_0}$  ve  $\gamma_{SR,B} = \frac{(\sqrt{2\epsilon_{SR,2}} - \sqrt{\epsilon_{SR,1}})^2 \times |h_{SR}|^2}{N_0}$  işaret gürültü oranı (signal-to-noise ratio -SNR) tanımlamaları yapılır ise Eş. 4'te verilen BEP ifadesi

$$P_{SR,2}(e) = \frac{1}{2} \times [Q(\sqrt{\gamma_{SR,A}}) + Q(\sqrt{\gamma_{SR,B}})] \quad (5)$$

şeklinde yazılır [31]. Burada  $Q(\cdot)$  Malcum  $Q$  fonksiyonudur ve

$Q(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} e^{-z^2/2 \sin^2 \theta} d\theta$  olarak tanımlanır [32]. R düğümünde kullanıcı2 için ABEP ifadesi Eş. 5'te verilen ifadenin rastgele SNR'ler üzerinden ortalama alınmasıyla bulunur. Buna göre, R düğümünde kullanıcı2 için ABEP ifadesi

$$\bar{P}_{SR,2}(e) = \frac{1}{2} \times \left[ \int_0^\infty Q(\sqrt{\gamma_{SR,A}}) f_{\gamma_{SR,A}}(\gamma_{SR,A}) d\gamma_{SR,A} + \int_0^\infty Q(\sqrt{\gamma_{SR,B}}) f_{\gamma_{SR,B}}(\gamma_{SR,B}) d\gamma_{SR,B} \right] \quad (6)$$

olarak hesaplanır.  $h_{SR}$  katsayılarının zarfının Rayleigh sönümlenmeli kanal için verildiği durumda  $\gamma_{SR,i}$   $i = A, B$  SNR ifadeleri üstel dağılımlı olur ve üstel dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f_{\gamma_{SR,i}}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR,i}} e^{-x/\bar{\gamma}_{SR,i}} \quad x \geq 0 \text{ ve } i = A, B \quad (7)$$

olarak verilir. Burada  $\bar{\gamma}_{SR,i} = E[\gamma_{SR,i}]$ ,  $i = A, B$ .  $E[\cdot]$  beklenen değer operatörüdür. Eş. 7, Eş. 6'da yerine konularak [33] yardımıyla R düğümündeki kullanıcı2 için ABEP ifadesi

$$\bar{P}_{SR,2}(e) = \frac{1}{4} \left[ \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR,A}}{2 + \bar{\gamma}_{SR,A}}}\right) + \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR,B}}{2 + \bar{\gamma}_{SR,B}}}\right) \right] \quad (8)$$

olarak bulunur.

R düğümünde SIC kullanılarak sezilen kullanıcı2 sembolleri  $\tilde{x}_2$ , toplam alınan  $y_{SR}$ 'den çıkarılarak kullanıcı1 sembollerine yine ML kullanılarak karar verilir.  $\tilde{x}_2$  sembollerinin doğru ya da hatalı sezilmesi, kullanıcı1 sembollerinin sezilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, R düğümündeki kullanıcı1 için BEP hesaplanırken her iki durumda göz önünde bulundurulmalıdır. Kullanıcı1 sembolleri için QPSK kullanıldığından ML karar kuralı, SIC işleminden sonra elde edilen  $\tilde{y}_{SR}$  işaretinin hem in-phase hem de sanal (quadrature) bileşenini sıfırdan küçük veya büyük olması olarak tanımlanır ( $\tilde{y}_{SR,I} < 0$  ve  $\tilde{y}_{SR,Q} < 0$ ,  $\tilde{y}_{SR,I} < 0$  ve  $\tilde{y}_{SR,Q} \geq 0$ ,  $\tilde{y}_{SR,I} \geq 0$  ve  $\tilde{y}_{SR,Q} < 0$  veya  $\tilde{y}_{SR,I} \geq 0$  ve  $\tilde{y}_{SR,Q} \geq 0$ ). Buna göre, öncelikle kullanıcı2 sembollerinin doğru sezildiği durum için R düğümündeki kullanıcı1 için BEP ifadesi Eş. 9'daki gibi yazılır [12] (bkz. Bir sonraki sayfanın üstü).

Eş. 9'da  $n_Q$  AWGN'nin quadrature bileşenini göstermektedir ve "0" ortalama ile  $N_0/2$  varyansa sahiptir.

Eş. 9'da verilen öncül olasılıklar  $\frac{1}{2} P\left(n_I \leq \sqrt{\epsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\epsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR}\right)$  ve  $\frac{1}{2} P\left(n_I \leq \sqrt{\epsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\epsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR}\right)$ , Eş. 4 kullanılarak elde edilen kullanıcı2 sembollerinin doğru sezilme olasılıklarıdır. Kullanıcı2 sembollerinin doğru sezilme olayı AWGN'nin in-phase bileşenine bağlı olduğu için, kullanıcı1 sembollerinin BEP ifadesinde in-phase bileşenini içeren olasılıklar koşullu olasılıklar olarak verilmiştir.

$$P_{SR,1}(e|doğru_2) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} P \left( n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \times \right. \\ \left. \left\{ P \left( n_I \leq -\sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \right\} + \right. \\ \left. \frac{1}{2} P \left( n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \times \left\{ P \left( n_I \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \right\} \right] \quad (9)$$

$$P_{SR,1}(e|doğru_2) = \frac{1}{4} \left[ P \left( n_I \leq -\sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \leq n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times \right. \right. \\ \left. \left. h_{SR} \right) \times \left\{ P \left( n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \right\} \right] \quad (10)$$

Eş. 9'da koşullu olasılık ifadeleri için  $P(\varphi|\omega) = \frac{P(\varphi \cap \omega)}{P(\omega)}$  yerine konulursa, R düğümünde kullanıcı2 sembollerinin doğru sezilmesi şartı altında kullanıcı1 için BEP Eş. 10'daki gibi bulunur (bknz. sayfanın üstü.). Aynı gösterimi kullanmak adına  $\gamma_{SR,C} = \frac{\varepsilon_{SR,1} \times |h_{SR}|^2}{N_0}$  ve  $\bar{\gamma}_{SR,C} = \varepsilon_{SR,1} / N_0 E[|h_{SR}|^2]$  tanımlamaları yapılırsa, R düğümünde kullanıcı2 sembollerinin doğru sezilmesi şartı altında kullanıcı1 için BEP

$$P_{SR,1}(e|doğru_2) = \frac{1}{4} \left[ Q(\sqrt{\gamma_{SR,C}}) \times \{4 - Q(\sqrt{\gamma_{SR,A}}) - Q(\sqrt{\gamma_{SR,B}})\} - Q(\sqrt{\gamma_{SR,A}}) \right] \quad (11)$$

şeklinde yazılır.

İkinci durum olan R düğümünde kullanıcı2 sembollerinin hatalı sezilmesi sonucunda kullanıcı için BEP ifadesi Eş. 9'a benzer şekilde Eş. 12'deki gibi verilir (bknz. Bir sonraki sayfanın üstü). Benzer şekilde,  $\frac{1}{2} P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right)$  ve  $\frac{1}{2} P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right)$  öncül olasılıkları, Eş. 4'te verilen R düğümündeki kullanıcı2 sembollerinin hatalı çözülme olasılıklarıdır. Koşullu olasılıklar ise Eş. 9'a benzer şekilde kullanıcı2 sembollerinin hatalı sezilme şartından kaynaklanmaktadır. Koşullu olasılık ifadeleri Eş. 12'de yerine konulursa, R düğümünde kullanıcı2 sembollerinin hatalı sezilmesi şartı altında kullanıcı2 için BEP ifadesi (Eş. 13) olarak bulunur (bknz. Bir sonraki sayfanın üstü).

R düğümünde hatalı sezilen kullanıcı2 sembollerinin SIC işleminden sonra elde edilen işaretin farklı SNR seviyeleri göz önünde bulundurularak  $\gamma_{SR,D} = \frac{(2\sqrt{2\varepsilon_{SR,2} + \varepsilon_{SR,1}} \times |h_{SR}|^2)}{N_0}$ ,  $\bar{\gamma}_{SR,D} = \frac{(2\sqrt{2\varepsilon_{SR,2} + \varepsilon_{SR,1}})^2}{N_0} E[|h_{SR}|^2]$ ,  $\gamma_{SR,E} = \frac{(2\sqrt{2\varepsilon_{SR,2} - \varepsilon_{SR,1}} \times |h_{SR}|^2)}{N_0}$  ve  $\bar{\gamma}_{SR,E} = \frac{(2\sqrt{2\varepsilon_{SR,2} - \varepsilon_{SR,1}})^2}{N_0} E[|h_{SR}|^2]$  tanımlamaları yapılırsa, R düğümünde kullanıcı2 sembollerinin hatalı sezildiği şartı altında kullanıcı1 için BEP ifadesi

$$P_{SR,1}(e|hata_2) = \frac{1}{4} \left[ Q(\sqrt{\gamma_{SR,C}}) \times \{Q(\sqrt{\gamma_{SR,A}}) + Q(\sqrt{\gamma_{SR,B}})\} + Q(\sqrt{\gamma_{SR,B}}) + Q(\sqrt{\gamma_{SR,D}}) - Q(\sqrt{\gamma_{SR,E}}) \right] \quad (14)$$

olarak bulunur.

R düğümündeki kullanıcı1 için toplam BEP ifadesi, Eş. 11 ve Eş. 14 toplanarak

$$P_{SR,1}(e) = P_{SR,1}(e|doğru_2) + P_{SR,1}(e|hata_2) \\ P_{SR,1}(e) = Q(\sqrt{\gamma_{SR,C}}) + \frac{1}{4} \left[ -Q(\sqrt{\gamma_{SR,A}}) + Q(\sqrt{\gamma_{SR,B}}) + Q(\sqrt{\gamma_{SR,D}}) - Q(\sqrt{\gamma_{SR,E}}) \right] \quad (15)$$

şeklinde yazılır.

Eş. 6-8 arasındaki işlemler benzer şekilde tekrarlanırsa [33] yardımıyla R düğümünde kullanıcı1 için ABEP

$$\bar{P}_{SR,1}(e) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR,C}}{2 + \bar{\gamma}_{SR,C}}} \right) + \frac{1}{8} \left[ \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR,A}}{2 + \bar{\gamma}_{SR,A}}} - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR,B}}{2 + \bar{\gamma}_{SR,B}}} + \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR,D}}{2 + \bar{\gamma}_{SR,D}}} - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{SR,E}}{2 + \bar{\gamma}_{SR,E}}} \right] \quad (16)$$

olarak bulunur.

R düğümünde elde edilen kullanıcı1 ve kullanıcı2 sembolleri SC kullanarak birleştirilir ve hedeflere (D1 ve D2) - kullanıcı1 ve kullanıcı2- toplam  $\tilde{x}_{SC}$  sembolü gönderilirse kullanıcılarda alınan işaretler Eş. 3'teki gibi olur. Kullanıcılarda gerçekleştirilen sezme işlemleri R düğümünde yapıldığı gibi yapılmalıdır. Kullanıcı2 R düğümünün sadece ilk aşamasında gerçekleştirilen ML sezme işlemini gerçekleştirir ve alınan  $\gamma_{RD,2}$  işaretinde kullanıcı1 sembollerine gürültü gibi davranarak kendi sembollerini sezer. Bu durumda ikinci zaman diliminde R-D2 arasındaki iletişim için BEP, Eş. 4'te verilen BEP ifadesine benzer şekilde

$$P_{RD,2}(e) = \frac{1}{2} \times \left[ P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD2} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD2} \right) + P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD2} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD2} \right) \right] \quad (17)$$



$$P_{SR,1}(e|hata_2) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \times \left\{ P \left( n_I \leq 2\sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \right\} + \frac{1}{2} P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \times \left\{ P \left( n_I \geq 2\sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \right\} \right] \quad (12)$$

$$P_{SR,1}(e|hata_2) = \frac{1}{4} \left[ P \left( \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \leq n_I \leq 2\sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_I \geq 2\sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \times \left\{ P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) + P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{SR,2}} \times h_{SR} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{SR,1}}{2}} \times h_{SR} \right) \right\} \right] \quad (13)$$

(Eş. 17) olarak bulunur. Burada  $\varepsilon_{SR,1} = \rho P_R$  ve  $\varepsilon_{SR,2} = (1 - \rho)P_R$  sırasıyla R düğümünde sezilen  $\tilde{x}_1$  ve  $\tilde{x}_2$  sembollerinin enerjilerini göstermektedir. Eş. 4-8 arasındaki işlemler Eş. 17 için tekrarlanırsa kullanıcı R-D2 düğümleri arasındaki iletişim için ABEP ifadesi

$$\bar{P}_{RD,2}(e) = \frac{1}{4} \left[ \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD2,A}}{2 + \bar{Y}_{RD2,A}}} \right) + \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD2,B}}{2 + \bar{Y}_{RD2,B}}} \right) \right] \quad (18)$$

(Eş. 18) olarak bulunur. Burada,  $\bar{Y}_{RD2,i} = E[\gamma_{RD,i}]$ ,  $i = A, B$ ,  $\gamma_{RD2,A} = \frac{(\sqrt{2\varepsilon_{RD,2}} + \sqrt{\varepsilon_{RD,1}})^2 \times |h_{RD2}|^2}{N_0}$  ve  $\gamma_{RD2,B} = \frac{(\sqrt{2\varepsilon_{RD,2}} - \sqrt{\varepsilon_{RD,1}})^2 \times |h_{RD2}|^2}{N_0}$  olarak tanımlanır.

Kullanıcı1 -D1 düğümü- ise kendi sembollerini sezebilmek için R düğümünde gerçekleştirilen tüm adımları tekrarlamak zorundadır. Önce SIC kullanılarak sezilen kullanıcı2 sembolleri alınan  $\gamma_{RD,1}$  işaretinden çıkarılır. Daha sonra elde edilen işaretten ML kullanılarak kendi sembollerine karar verir. Dolayısıyla R-D1 arasındaki iletişim için hata olasılığı tıpkı S-R arasında olduğu gibi gerçekleştirilen SIC işleminin hatalı yapıp yapılmamasına bağlıdır. Dolayısıyla, R-D1 arasındaki iletişimde BEP ifadesinin bulunabilmesi için hem kullanıcı2 sembollerinin doğru sezildiği hem de hatalı sezildiği durum ayrı ayrı ele alınmalıdır. Buradan yola çıkarak kullanıcı2 sembollerinin doğru sezildiği durumda R-D1 arasındaki iletişim için BEP ifadesi Eş. 9'a benzer şekilde Eş. 19'daki gibi verilir (bknz. Bir sonraki sayfanın üstü).

Kullanıcı2 sembollerinin hatalı sezildiği durumda R-D1 arasındaki iletişim için BEP ifadesi ise Eş. 12'den yararlanılarak (Eş. 20) olarak bulunur (bknz. Bir sonraki sayfanın üstü).

Eş. 19 için Eş. 9-11 arasındaki, Eş. 20 için ise Eş. 12-14 arasındaki işlemler tekrarlandıktan sonra, R-D1 arasındaki iletişim için toplam BEP ifadesi Eş. 15'ten yararlanılarak

$$P_{RD,1}(e) = Q(\sqrt{\gamma_{RD1,C}}) + \frac{1}{4} \left[ -Q(\sqrt{\gamma_{RD1,A}}) + Q(\sqrt{\gamma_{RD1,B}}) + Q(\sqrt{\gamma_{RD1,D}}) - Q(\sqrt{\gamma_{RD1,E}}) \right] \quad (21)$$

şeklinde yazılır. Burada,  $\bar{Y}_{RD1,i} = E[\gamma_{RD,i}]$ ,  $i = A, B, \dots, E$  olarak tanımlanır.  $\gamma_{RD1,A} = \frac{(\sqrt{2\varepsilon_{RD,2}} + \sqrt{\varepsilon_{RD,1}})^2 \times |h_{RD1}|^2}{N_0}$ ,  $\gamma_{RD1,B} = \frac{(\sqrt{2\varepsilon_{RD,2}} - \sqrt{\varepsilon_{RD,1}})^2 \times |h_{RD1}|^2}{N_0}$ ,  $\gamma_{RD1,C} = \frac{\varepsilon_{RD,1} \times |h_{RD1}|^2}{N_0}$ ,  $\gamma_{RD1,D} = \frac{(2\sqrt{2\varepsilon_{RD,2}} + \sqrt{\varepsilon_{RD,1}})^2 \times |h_{RD1}|^2}{N_0}$  ve  $\gamma_{RD1,E} = \frac{(2\sqrt{2\varepsilon_{RD,2}} - \sqrt{\varepsilon_{RD,1}})^2 \times |h_{RD1}|^2}{N_0}$  şeklindedir. R-D1 arasındaki iletişim için ABEP ifadesi Eş. 21'in rastgele SNR'ler üzerinden ortalama alınmasıyla,

$$\bar{P}_{RD,1}(e) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,C}}{2 + \bar{Y}_{RD1,C}}} \right) + \frac{1}{8} \left[ \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,A}}{2 + \bar{Y}_{RD1,A}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,B}}{2 + \bar{Y}_{RD1,B}}} + \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,D}}{2 + \bar{Y}_{RD1,D}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,E}}{2 + \bar{Y}_{RD1,E}}} \right] \quad (22)$$

(Eş. 22) olarak elde edilir.

Her iki kullanıcı için de  $S - R - Dj$ ,  $j=1,2$ , doğrusundaki E2E BEP ifadesi  $S - R$  ve  $R - Dj$  düğümleri arasındaki BEP ifadelerinin ortak olasılığı olarak ifade edilebilir [34].  $S - R$  arasındaki hata olayları ile  $R - Dj$  arasındaki hata olayları istatistiksel bağımsız olaylar olduğundan her iki kullanıcı içinde  $S - R - Dj$  arasındaki E2E BEP ifadeleri;

$$P_j(e) = P_{SR,j}(e) \times (1 - P_{RD,j}(e)) + (1 - P_{SR,j}(e)) \times P_{RD,j}(e), \quad j = 1,2 \quad (23)$$

şeklinde yazılır. E2E ABEP ifadesi ise Eş. 23'te verilen ifadelerin ortalamalarının alınmasıyla

$$\bar{P}_j(e) = \bar{P}_{SR,j}(e) \times (1 - \bar{P}_{RD,j}(e)) + (1 - \bar{P}_{SR,j}(e)) \times \bar{P}_{RD,j}(e), \quad j = 1,2 \quad (24)$$

olur.

Son olarak kullanıcı1 için Eş. 16 ve 22, kullanıcı2 için ise Eş. 8 ve 18, Eş. 24'te yerine konularak E2E ABEP ifadeleri

$$\begin{aligned}
 P_{RD,1}(e|doğru_2) &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} P \left( n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \times \right. \\
 &\left\{ P \left( n_I \leq -\sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) + \right. \\
 &P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \left. \right\} + \frac{1}{2} P \left( n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \times \\
 &\left\{ P \left( n_I \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) + \right. \\
 &\left. P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \leq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \right\} \left. \right] \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$P_{RD,1}(e|hata_2) =$$

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \times \right. \\
 &\left\{ P \left( n_I \leq 2\sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) + \right. \\
 &P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} - \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \left. \right\} + \frac{1}{2} P \left( n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \times \\
 &\left\{ P \left( n_I \geq 2\sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) + \right. \\
 &\left. P \left( n_Q \geq \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \mid n_I \geq \sqrt{\varepsilon_{RD,2}} \times h_{RD1} + \sqrt{\frac{\varepsilon_{RD,1}}{2}} \times h_{RD1} \right) \right\} \left. \right]. \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_1(e) &= \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,C}}{2 + \bar{Y}_{SR,C}}} \right) + \frac{1}{8} \left[ \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,A}}{2 + \bar{Y}_{SR,A}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,B}}{2 + \bar{Y}_{SR,B}}} + \right. \right. \\
 &\left. \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,D}}{2 + \bar{Y}_{SR,D}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,E}}{2 + \bar{Y}_{SR,E}}} \right] \left. \right\} \times \left( 1 - \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,C}}{2 + \bar{Y}_{RD1,C}}} \right) + \right. \right. \\
 &\left. \frac{1}{8} \left[ \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,A}}{2 + \bar{Y}_{RD1,A}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,B}}{2 + \bar{Y}_{RD1,B}}} + \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,D}}{2 + \bar{Y}_{RD1,D}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,E}}{2 + \bar{Y}_{RD1,E}}} \right] \right. \left. \right) + \\
 &\left( 1 - \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,C}}{2 + \bar{Y}_{SR,C}}} \right) + \frac{1}{8} \left[ \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,A}}{2 + \bar{Y}_{SR,A}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,B}}{2 + \bar{Y}_{SR,B}}} + \right. \right. \right. \\
 &\left. \left. \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,D}}{2 + \bar{Y}_{SR,D}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,E}}{2 + \bar{Y}_{SR,E}}} \right] \right\} \right) \times \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,C}}{2 + \bar{Y}_{RD1,C}}} \right) + \right. \\
 &\left. \frac{1}{8} \left[ \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,A}}{2 + \bar{Y}_{RD1,A}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,B}}{2 + \bar{Y}_{RD1,B}}} + \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,D}}{2 + \bar{Y}_{RD1,D}}} - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD1,E}}{2 + \bar{Y}_{RD1,E}}} \right] \right\} \quad (25)
 \end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_2(e) &= \frac{1}{4} \left[ \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,A}}{1 + \bar{Y}_{SR,A}}} \right) + \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,B}}{1 + \bar{Y}_{SR,B}}} \right) \right] \times \left( 1 - \right. \\
 &\left. \frac{1}{4} \left[ \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD2,A}}{1 + \bar{Y}_{RD2,A}}} \right) + \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD2,B}}{1 + \bar{Y}_{RD2,B}}} \right) \right] \right) + \left( 1 - \frac{1}{4} \left[ \left( 1 - \right. \right. \right. \\
 &\left. \left. \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,A}}{1 + \bar{Y}_{SR,A}}} \right) + \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{SR,B}}{1 + \bar{Y}_{SR,B}}} \right) \right] \right) \times \frac{1}{4} \left[ \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD2,A}}{1 + \bar{Y}_{RD2,A}}} \right) + \right. \\
 &\left. \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{Y}_{RD2,B}}{1 + \bar{Y}_{RD2,B}}} \right) \right] \quad (26)
 \end{aligned}$$

olarak kapalı-formda elde edilir.

#### 4. KULLANICI ADİLLİĞİ İÇİN OPTİMUMUMA YAKIN GÜÇ PAYLAŞIMI (SUB-OPTIMUM POWER ALLOCATION FOR USER FAIRNESS)

Her iki kullanıcının da E2E hata başarımının en iyi olabilmesi için hem kaynaktaki ( $\alpha$ ) hem de röledeki ( $\rho$ ) güç paylaşım katsayılarının seçimi önemlidir. Bu durumda kaynaktaki optimum güç paylaşım kriterleri

$$\arg \min_{\alpha} P_{SR,1} \cap \arg \min_{\alpha} P_{SR,2} \quad (27)$$

(Eş. 27) ve röledeki optimum güç paylaşım kriteri

$$\arg \min_{\rho} P_{RD,1} \cap \arg \min_{\rho} P_{RD,2} \quad (28)$$

(Eş. 28) olarak verilir.

Kullanıcıların E2E hata başarımaları için ortak optimum güç paylaşım kriteri ise Eş. 23 ve Eş. 24'ün yardımıyla

$$\arg \min_{\alpha, \rho} P_1 \cap \arg \min_{\alpha, \rho} P_2 \quad (29)$$

olarak bulunur.

Fakat her iki kullanıcı sembollerin SNR'leri birbiriyle ters orantılı şekilde değişmektedir. Güç paylaşım katsayılarının ( $\alpha, \rho$ ) artmasıyla kullanıcı1 sembollerinin SNR'leri artar



iken kullanıcı2 sembollerinin SNR'leri azalmaktadır. Ayrıca  $(\alpha, \rho)$  çiftinin artırılması SIC işlemleri sırasında yapılan hataları da arttırmaktadır. Dolayısıyla kullanıcıların E2E hata başarımları  $(P_1, P_2)$  de güç paylaşım katsayılarının değişimi açısından birbiriyle ters orantılı olarak değişmektedir. Sonuç olarak, Eş. 29'da verilen optimizasyon problemi konkav bir problem olmaktadır ve her iki kullanıcının da hata başarımlarını en iyi yapacak bir güç paylaşım katsayısı çifti  $(\alpha, \rho)$  bulunmamaktadır. Kullanıcıların hata başarımlarının güç paylaşım katsayıları açısından birbirleriyle ters orantılı olduğu bilinmektedir. Güç paylaşım katsayılarının fazlasıyla artması ise SIC işleminin doğru bir şekilde gerçekleştirilememesine sebep olmakta ve her iki kullanıcının da hata başarımlarını düşmektedir. Bu nedenle güç paylaşım katsayısı çiftini belirlerken hata başarımları açısından kullanıcılar arası adillik/eşitlik (fairness) de göz önüne alınmalıdır. Kullanıcıların hata başarımları arası oransal adillik (proportional fairness -PF) dikkate alınarak optimum güç paylaşım kriteri,

$$\arg \left( T_{PF_l} \frac{P_1}{P_2} \leq T_{PF_u} \right) \quad (30)$$

olarak yazılır. Burada  $T_{PF_l}$  ve  $T_{PF_u}$  sırasıyla oransal adillik eşik değerinin alt ve üst sınırı olarak tanımlanır. Kullanıcıların hata başarımlarının bu eşik değerlerin arasında kalmasını sağlayan güç paylaşım katsayısı çifti optimum güç paylaşım olarak adlandırılır. Böylece kullanıcılardan birinin E2E hata başarımlarını artırılırken diğer kullanıcının hata başarımları çok düşmez ve kullanıcılar arası adillik sağlanmış olur. Güç paylaşım katsayılarının  $0 < \alpha < 0.5$ ,  $0 < \rho < 0.5$  olması şartı göz önüne alındığında, Eş. 30'da verilen optimizasyon problemi Ağaç tabanlı arama (tree based search -TBS) algoritması [35] ile optimuma yakın şekilde çözülür. Optimumuma yakın güç paylaşımı için TBS algoritması Algoritma 1'de verilmiştir.

**Algoritma 1.** Ağaç tabanlı arama (TBS) ile optimumuma yakın güç paylaşım algoritması  
(Sub-optimum power allocation algorithm based on tree based search (TBS))

---

**Girdiler:**  $\alpha = 0.25$  ve  $\rho = 0.05$ ,  $T_{PF}$

```

1 : do
2 :     Eş. 25'i kullanarak  $P_1$  hesapla ve
       Eş. 26'i kullanarak  $P_2$  hesapla
3 :     Güncelle  $\rho = \rho + \rho/2$ 
4 :     if  $T_{PF_l} \leq \frac{P_1}{P_2} \leq T_{PF_u}$  then
5 :         Güç paylaşım katsayılarını
           kaydet  $(\alpha, \rho)$ , break;
6 :     else if  $\rho < 0.5$  then
7 :         Adım 2'yi tekrarla
8 :     else if  $\alpha < 0.5$  then
9 :         Güncelle  $\rho = 0.05$  ve  $\alpha = \alpha + \alpha/2$ 
10 :    end if
11 :    Güncelle  $\rho = 0.05$  ve  $\alpha = 0.05$ 
12 :    Adım 2'yi tekrarla
13 : end do
```

**Çıktılar:** Kaydedilen güç paylaşım katsayıları  $\alpha, \rho$

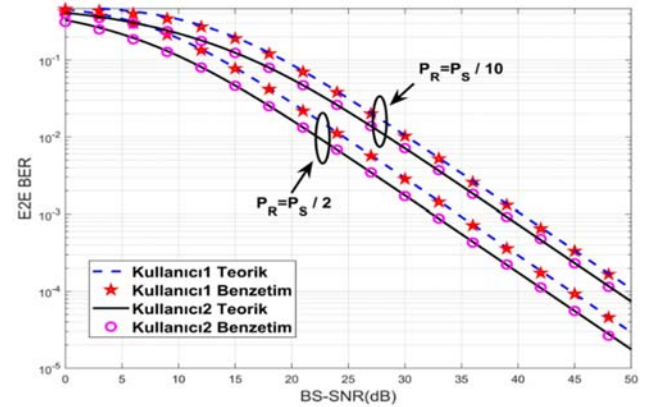
---

Algoritma 1'de belirlenen adım aralığı ile optimuma yakın güç paylaşım katsayısı çiftini bulmak için en fazla 24 iterasyon deneyerek güç paylaşım katsayısı çifti belirlenir ve kullanıcılar arası adillik sağlanmış olur. Algoritma 1'de verilen adım aralığı değiştirilerek denenen güç paylaşım çifti sayısı artırılabilir ya da azaltılabilir. Optimum güç paylaşım katsayısı çiftinin bulunması için ise tüm  $\alpha$  ve  $\rho$  çiftlerinin karşılaştırılması (tüm arama algoritması -full search algorithm) gerekmektedir. Tüm bu karşılaştırmalar işlem yükünü ve sistem karmaşıklığını üstel olarak arttırmaktadır. Dolayısıyla TBS algoritmasının sağladığı yüksek oransal adillik indeksi ve düşük işlem karmaşıklığı göz önüne alındığında TBS algoritmasının güç paylaşımı için optimuma yakın çözüm olarak öne çıkmaktadır.

## 5. NÜMERİK SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

Bu bölümde DF röle-yardımlı-NOMA sistemi için elde edilen teorik ABEP ifadelerinin bilgisayar benzetimleri ile karşılaştırmaları verilmiştir. Sistemin E2E hata başarımlarını etkileyen parametrelere göre değişimleri incelenmiştir.

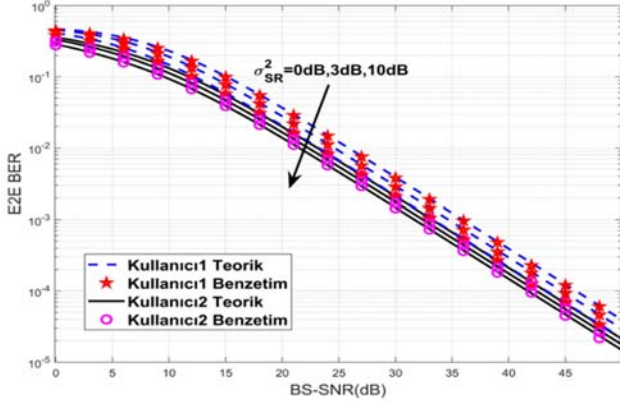
Öncelikle sistemde bulunan röle iletim gücünün sistemin hata başarımlarına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Şekil 3'te E2E bit hata oranı (bit error rate -BER) başarımları iki farklı senaryo için değişen BS SNR'sine göre incelenmiştir. İlk durumda  $P_R = P_S/10$ , ikinci durumda ise  $P_R = P_S/2$  olarak alınmıştır. Düşümler arasındaki ortalama kanal güçleri  $\sigma_{SR}^2 = 3dB$ ,  $\sigma_{RD1}^2 = 3dB$  ve  $\sigma_{RD2}^2 = 0dB$  olarak alınmıştır. BS'deki ve R'deki güç paylaşım katsayıları eşit ve  $\alpha = \rho = 0,3$  olarak ayarlanmıştır. Röle gücünün artması beklenildiği gibi E2E hata başarımlarını her iki kullanıcı için de arttırmıştır.



**Şekil 3.** Röle gücüne göre E2E hata başarımlarının karşılaştırılması  
(Comparison of the E2E error performances respect to relay power)

Şekil 4'te S-R arasındaki yol kalitesinin sistemin E2E hata başarımlarına etkisi araştırılmıştır.  $P_R = P_S/2$  ve  $\alpha = \rho = 0,3$  olarak ayarlanmıştır.  $\sigma_{RD1}^2 = 3dB$ ,  $\sigma_{RD2}^2 = 0dB$  olarak alınmış ve  $\sigma_{SR}^2 = 0dB, 3dB, 10dB$  olarak değiştirilmiştir. S-R düşümleri arasındaki ortalama kanal gücünün artışı DF rölede yapılan hataların azalmasını ve dolayısıyla da E2E hata başarımlarının iyileşmesini sağlamıştır. Buradan DF röle olarak kullanılacak cihazın iyi bir link kalitesine sahip

olması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Bu da bizleri ortamda bulunan / bulunabilen çoklu rölelerden / kullanıcılardan en iyi link kalitesine sahip olanının DF röle olarak seçilmesi durumunda röle-yardımlı-NOMA sistemi için E2E hata başarımının önemli oranda artacağı sonucuna ulaştırmaktadır.



**Şekil 4.** S-R arasındaki ortalama kanal gücüne göre E2E hata başarımının karşılaştırılması  
(Comparison of the E2E error performances respect to the average channel power between S-R nodes)

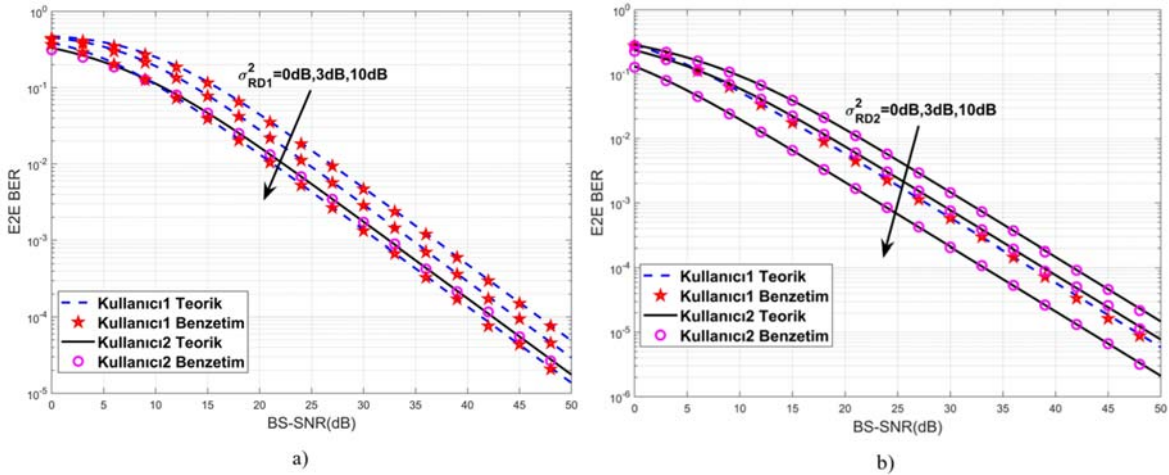
Şekil 5'te ise E2E hata başarımları farklı ortalama  $R - Dj$  kanal güçleri için verilmiştir. Şekil 5a'da  $\sigma_{RD1}^2 = 0dB, 3dB$  ve  $10dB$  senaryoları için E2E hata başarımları gösterilmiştir.  $\sigma_{SR}^2 = 3dB$  ve  $\sigma_{RD2}^2 = 0dB$  olarak kabul edilmiştir.

Şekil 5b'de ise E2E hata başarımları  $\sigma_{RD2}^2 = 0dB, 3dB$  ve  $10dB$  senaryoları için gösterilmiştir.  $\sigma_{SR}^2 = 10dB$  ve  $\sigma_{RD1}^2 = 10dB$  olarak kabul edilmiştir. Diğer tüm parametreler Şekil 4'teki gibi alınmıştır. Tüm kablosuz iletişim tekniklerinde olduğu gibi röle-yardımlı NOMA'da da her kullanıcı için artan  $R - Dj$  link kalitesi için ilgili kullanıcının hata başarımını iyileştirmiştir. Bu durum kullanılacak DF rölenin seçilmesi gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Şekil 3 ile Şekil 5 arasındaki benzetim sonuçları hem kullanıcılar arası hata başarım farkına dikkat çekmek hem de literatürdeki NOMA çalışmalarıyla karşılaştırılması adına sabit güç paylaşım katsayıları kullanılarak verilmiştir. Güç paylaşım katsayıları literatürdeki çoğu çalışmada olduğu gibi 0.3 olarak seçilmiştir. Bu durumda kullanıcıların hata başarımları arasındaki fark tüm senaryolarda açıkça gözükmemektedir. Fakat Bölüm 4'te sunulan optimuma yakın

**Tablo 1.** Farklı güç paylaşım katsayıları ile TBS tabanlı güç paylaşımının kullanıcıların hata başarımları açısından oransal adillik (PF) indeksi karşılaştırması (Comparison of the proportional fairness (PF) index in terms of the error performances of the users between the fixed power allocation coefficients and the TBS based power allocation)

	Oransal adillik (PF) indeksi ( $P_1/P_2$ )									
	$\sigma_{SR}^2 = 10dB, \sigma_{RD1}^2 = 3dB, \sigma_{RD2}^2 = 0dB$			$\sigma_{SR}^2 = 3dB, \sigma_{RD1}^2 = 10dB, \sigma_{RD2}^2 = 0dB$						
	$\alpha = \rho = 0,1$	$\alpha = \rho = 0,3$	$\alpha = \rho = 0,4$	TBS		$\alpha = \rho = 0,1$	$\alpha = \rho = 0,3$	$\alpha = \rho = 0,4$	TBS	
			PF	İter.				PF	İter.	
$SNR = 0dB$	1,87	1,43	1,28	<b>1,19</b>	12	1,56	1,16	<b>1,05</b>	1,15	5
$SNR = 10dB$	4,30	1,57	1,10	<b>0,98</b>	12	3,04	<b>0,96</b>	0,66	1,07	10
$SNR = 20dB$	7,25	1,48	0,82	<b>1,00</b>	6	4,11	0,80	0,44	<b>1,17</b>	5
$SNR = 30dB$	8,00	1,46	0,77	<b>0,95</b>	6	4,30	0,78	0,41	<b>1,16</b>	5
$SNR = 40dB$	8,08	1,45	0,76	<b>0,94</b>	6	4,32	0,78	0,40	<b>1,16</b>	5
$SNR = 50dB$	8,09	1,45	0,76	<b>0,94</b>	6	4,32	0,78	0,40	<b>1,16</b>	5



**Şekil 5.** Ortalama kanal gücüne göre E2E hata başarımının karşılaştırılması a) Değişen R-D1 ortalama kanal gücü b) Değişen R-D2 ortalama kanal gücü (Comparison of the E2E error performances respect to average channel Powers a) Changing average channel power between R-D1 nodes b) Changing average channel power between R-D2 nodes)

güç paylaşımı algoritması ile kullanıcılar arası adillik sağlanabilmektedir. Bu durumu göstermek adına iki farklı senaryo için sabit güç paylaşımı katsayısı kullanımı ile önerilen TBS algoritması ile belirlenen güç paylaşımı katsayılarının kullanımının karşılaştırılması oransal adillik (PF) indeksine göre Tablo 1’de verilmiştir.

Birinci senaryoda  $\sigma_{SR}^2 = 10dB$ ,  $\sigma_{RD1}^2 = 3dB$  ve  $\sigma_{RD2}^2 = 0dB$  olarak kabul edilirken ikinci senaryoda  $\sigma_{SR}^2 = 3dB$ ,  $\sigma_{RD1}^2 = 10dB$  ve  $\sigma_{RD2}^2 = 0dB$  olarak varsayılmıştır. Her iki senaryoda  $P_R = P_S/2$  alınmıştır. Karşılaştırmalar da sabit güç paylaşım katsayıları olarak  $\alpha = \rho = 0.1, 0.3$  ve  $0.4$  seçilmiştir. Tablo 1’den görüldüğü üzere tüm senaryolarda önerilen TBS algoritması kullanımı ile PF indeksi 1’e yaklaşmaktadır. Bu da kullanıcıların hata başarımları açısından adil bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Böylece kullanıcılardan birinin çok iyi bir hata başarımına sahip olurken diğer kullanıcının hata başarımının çok düşük seviyelerde kalmasının önüne geçilmiştir. Tablo 1’de her durum için en iyi PF indeksine sahip değerler işaretlenmiştir. Sadece iki durum için sabit güç paylaşım katsayısı önerilen TBS algoritmasından daha iyi bir PF indeksine sahiptir. Fakat bu durumlar için de TBS algoritmasının 1’e yakın bir PF indeksine sahip olduğu gözükmektedir. Bunun bir sonucu olarak TBS algoritmasının optimuma yakın çalıştığı bir kez daha gözükmektedir. Tablo 1’de ayrıca TBS algoritması ile belirlenen güç paylaşım katsayısı çiftinin Algoritma 1’in kaçınıcı iterasyonunda elde edildiği bilgisi de sunulmuştur. Bölüm 4’te verilen Algoritma 1 toplam 24 deneme içermesine rağmen, daha sayıda az deneme ile kullanıcılar arası adilliğin optimuma yakın bir şekilde sağlandığı gözükmektedir. Bu da vericideki işlem karmaşıklığını ve gecikmeyi (latency) tüm arama algoritmasına göre azaltmaktadır.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, yeni nesil hücresele ağları için doğrudan bağlantının kurulamadığı NOMA kullanıcılarıyla bir DF röle aracılığıyla iletişimin sağlandığı röle-yardımlı-NOMA sisteminin kullanımı öngörülmüştür. Röle-yardımlı-NOMA sistemi için teorik ABEP ifadeleri kapalı-formda türetilmiştir. Türetilen ABEP ifadeleri Monte Carlo benzetimleri ile doğrulanmıştır. Ayrıca hata başarımı açısından kullanıcılar arası adillik ön planda tutularak oransal adillik indeksine bağlı optimumuma yakın bir güç paylaşım algoritması sunulmuştur.

Doğrudan bağlantının sağlanamadığı durumlarda röle-yardımlı-NOMA’nın klasik NOMA sistemlerine önemli bir alternatif olduğu gösterilmiştir. Röle-yardımlı-NOMA sistemlerinde de tüm kablosuz haberleşme sistemlerinde olduğu gibi kanal kalitelerinin hata başarımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca SC sırasında kullanıcılara aktarılan gücü belirleyen güç paylaşım katsayısının kullanıcıların hata başarımları için önemli bir faktör olduğu gösterilmiştir. Güç paylaşım katsayısının değişimi yakın ve uzak kullanıcıların hata başarımları için

ters etkiye sahip olduğundan güç paylaşımının optimum olarak belirlenmesi önem kazanmaktadır. Verilen optimumuma yakın güç paylaşım algoritmasının kullanılması ile kullanıcıların hata başarımları oransal olarak belli bir değerin üzerinde tutulmuş ve kullanıcılar arası adillik sağlanmıştır. Sistemin E2E başarımının SIC hatalarından fazlasıyla etkilenmesinden dolayı SIC hatalarını azaltmak için yeni sezme/çözme algoritmaların araştırılması yapılması gereken çalışmalar olarak öne çıkmaktadır. Son olarak, rölede gerçekleştirilen işlemler sırasında yapılan hatalar sistemin E2E başarımını doğrudan etkilediğinden röledeki hata başarımı önem arz etmektedir. Röledeki hata başarımının artırılabilmesi için  $S-R$  düğümleri arasındaki kanal kalitesinin artması gerektiği benzetim sonuçlarından açıkça gözükmektedir. Bundan dolayı, kullanılacak rölenin başarımını arttırmak için rölenin ortamda bulunan/bulunabilen çok sayıda röle/kullanıcı arasından seçildiği sistemler önem kazanmaktadır. Literatürde bilinen röle seçim kuralları veya yeni geliştirilecek röle seçim kuralları ile birlikte uygulanan röle-yardımlı-NOMA sistemlerinin hata başarımlarının araştırılması gelecekteki çalışmaların önemli bir bölümünü oluşturacaktır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2211-E programı kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Andrews, J.G.J.G., Buzzi, S., Choi, W., vd., What will 5G be?, IEEE J. Sel. Areas Commun., 32, (6), 1065–1082, 2014.
2. Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N., Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey, IEEE Commun. Surv. Tutorials, 18, (3), 1617–1655, 2016.
3. Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., vd., Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project, IEEE Commun. Mag., 52, (5), 26–35, 2014.
4. Liu, Y., Qin, Z., El Kashlan, M., Ding, Zhiguo, A.N., Hanzo, L., Non-Orthogonal Multiple Access for 5G”, Proceedings of IEEE, 2017.
5. Saito, Y., Benjebbour, A., Kishiyama, Y., Nakamura, T., System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA), IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC, 611–615, 2013.
6. Islam, S.M.R., Avazov, N., Dobre, O.A., Kwak, K.S., Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges, IEEE Commun. Surv. Tutorials, 19, (2), 721–742, 2017.
7. Benjebbour, A., Saito, Y., Kishiyama, Y., Li, A., Harada, A., Nakamura, T., Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access”, ISPACS-International Symposium on Intelligent Signal

- Processing and Communication Systems, 770–774, 2013.
8. Kara, F., Kaya, H., Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA): Gelecek Nesil Radyo Erişim Ağlarında Kitlesel Erişim ve Yüksek Spektral Verimlilik için Bir Çözüm, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Derg.* (Karaelmas Science and Engineering Journal), 9, (1), 152-165, 2019
  9. Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A., Higuchi, K., Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access, *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1–5, 2013.
  10. Ding, Z., Yang, Z., Fan, P., Member, S., Poor, H.V., On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users, *IEEE Signal Process. Lett.*, 21, (12), 1501–1505, 2014.
  11. Wang, X., Labeau, F., Mei, L., Closed-Form BER Expressions of QPSK Constellation for Uplink Non-Orthogonal Multiple Access, *IEEE Commun. Lett.*, 21, (10), 2242–2245, 2017.
  12. Kara, F., Kaya, H., On the BER Performances of Downlink and Uplink NOMA in the presence of SIC errors over Fading Channels”*IET Commun.*, 12, (15), 1834-1844, 2018.
  13. Timotheou, S., Krikidis, I., Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems, *IEEE Signal Process. Lett.*, 22, (10), 1647–1651, 2015.
  14. Liu, F., Mahonen, P., Petrova, M., Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access, *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, 1127–1131, 2015.
  15. Guo, J., Wang, X., Yang, J., Zheng, J., Zhao, B., User pairing and power allocation for downlink non-orthogonal multiple access, 2016 *IEEE Globecom Work. GC Wkshps Proc.*, 1–5, 2016.
  16. Ali, M.S., Tabassum, H., Hossain, E., Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems, *IEEE Access*, 4, 6325–6343, 2016.
  17. Oviedo, J.A., Sadjadpour, H.R., A Fair Power Allocation Approach to NOMA in Multiuser SISO Systems, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 66, (9), 7974–7985, 2017.
  18. Ding, Z., Peng, M., Poor, H.V., Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems, *IEEE Commun. Lett.*, 19, (8), 1462–1465, 2015.
  19. Kara, F., Kaya, H., On the Error Performance of the Cooperative-NOMA with Statistical CSIT, *IEEE Commun. Lett.*, 23, (1), 128-131, 2019
  20. Ding, Z., Liu, Y., Choi, J., vd., Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks, *IEEE Commun. Mag.*, 55, (2), 185–191, 2017.
  21. Sun, Q., Han, S., I, C.-L., Pan, Z., On the Ergodic Capacity of MIMO NOMA Systems, *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 4, (4), 405–408, 2015.
  22. Kim, J.-B., Lee, I.-H., Capacity Analysis of Cooperative Relaying Systems Using Non-Orthogonal Multiple Access, *IEEE Commun. Lett.*, 19, (11), 1949–1952, 2015.
  23. Liu, Y., Ding, Z., Elkashlan, M., Yuan, J., Nonorthogonal Multiple Access in Large-Scale Underlay Cognitive Radio Networks, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 65, (12), 10152–10157, 2016.
  24. Duan, W., Wen, M., Yan, Y., Xiong, Z., Lee, M.H., Use of Non-Orthogonal Multiple Access in Dual-hop relaying, 2016, arXiv ID:1604.01151 .
  25. Liang, X., Wu, Y., Ng, D.W.K., Zuo, Y., Jin, S., Zhu, H., Outage Performance for Cooperative NOMA Transmission with an AF Relay, *IEEE Commun. Lett.*, 21, (11), 2428-2431, 2017.
  26. Zhong, C., Zhang, Z., Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Full-Duplex Relaying, *IEEE Commun. Lett.*, 20, (12), 2478–2481, 2016.
  27. Luo, S., Teh, K.C., Adaptive transmission for cooperative NOMA system with buffer-aided relaying, *IEEE Commun. Lett.*, 21, (4), 937–940, 2017.
  28. Ding, Z., Dai, H., Poor, H.V., Relay Selection for Cooperative NOMA”*IEEE Trans. Veh. Technol.*, 5, (4), 416–419, 2016.
  29. Higuchi, K., Kishiyama, Y., Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink, *IEEE Veh. Technol. Conf.*, 1-5, 2013.
  30. Proakis, J.G., *Digital Communications*, McGraw-Hill, Singapur, 2008.
  31. Kara, F., Kaya, H., Nakagami-m Sönümlenmeli Kanallarda DL-NOMA için Kapalı-Form BHO İfadelerinin Türetilmesi, 26. *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları, İzmir, Türkiye*, 2-5 Mayıs, 2018.
  32. Craig, J.W., A new, simple and exact result for calculating the probability of error for two-dimensional signal constellations”*MILCOM 91 - Conf. Rec.*, 571–575, 1991.
  33. Simon, M.K., Alouini, M.-S., *Digital Communication over Fading Channels*, John Wiley & Sons, Inc., Newyork, ABD, 2004.
  34. Laneman, J.N., Tse, D.N.C., Wornell, G.W., Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 50, (12), 3062–3080, 2004.
  35. Grosan, C., Abraham, A., *Intelligent Systems: A modern Approach*, Springer Heidelberg, Berlin, Almanya, 2011.