



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**EN İYİ RÖLE SEÇİMLİ NOMA TABANLI**  
**İŞBİRLİKLİ TELSİZ AĞLARIN**  
**NAKAGAMI-M SÖNÜMLEMELİ**  
**KANALLARDAKİ PERFORMANSI**

**Ahmad Farouq Ibrahim ASOUS**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Nisan-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmad Farouq Ibrahim ASOUS tarafından hazırlanan “En İyi Röle Seçimli NOMA Tabanlı İşbirlikli Telsiz Ağların Nakagami-m Sönümlemeli Kanallardaki Performansı” adlı tez çalışması 27/04/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Uğur TAŞKIRAN

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmad Farouq Ibrahim ASOUS

Tarih: 27/04/2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS

#### EN İYİ RÖLE SEÇİMLİ NOMA TABANLI İŞBİRLİKLİ TELSİZ AĞLARIN NAKAGAMI-M SÖNÜMLEMELİ KANALLARDAKİ PERFORMANSI

**Ahmad Farouq Ibrahim ASOUS**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. ÖZGÜR ÖZDEMİR**

**2022, 51 Sayfa**

**Jüri**

**Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR  
Dr. Öğr. Üyesi Uğur TAŞKIRAN  
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN**

Çok yüksek hızlı veri transferini mümkün kılan ve oldukça düşük gecikme sağlayan 5G ve ötesi telsiz sistemlerin artan telsiz iletişim taleplerinin karşılanmasında önemli rol oynamaları beklenmektedir. Klasik dik çoklu erişim metodlarının 5G ve ötesi iletişim ağları ile hedeflenen yüksek kullanıcı erişimini sağlamada yetersiz kalmaları nedeniyle, çok sayıda kullanıcının aynı kanalda farklı iletim gücü seviyelerini kullanarak eş zamanlı bir şekilde işaret iletimi yaptıkları dik olmayan çoklu erişim tekniği (NOMA) önerilmiştir. Öte yandan telsiz ağda sanal anten dizileri oluşturarak anten çeşitleme kazancı sağlayan işbirlikli çeşitleme yaklaşımı servis kalitesini artırmada kullanılan bir başka önemli teknolojidir. İşbirlikli iletişim tekniği ile NOMA teknolojisinin bir arada kullanımı 5G ve ötesi mobil ağlarda kayda değer spektral verimlilik artışları sağlamaktadır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında bir kaynak, L adet röle ve bir hedeften meydana gelen NOMA tabanlı işbirlikli bir ağ ele alınmış ve kaynağın hedef ile doğrudan ve seçilen en iyi röle aracılığı ile haberleştiği bir sistem modeli incelenmiştir. Röle seçim kriteri, sistemin ulaşılabilir hızını maksimum yapan en iyi röleyi etkinleştirmek olarak önerilmiştir. Sistemdeki tüm kanalların Nakagami-m sönümlemeli oldukları varsayılmış ve L toplam röle sayısının, m sönümleme parametresinin ve link ortalama işaret gürültü oranlarının değişik değerleri için sistemin ortalama erişilebilir hızı bilgisayar simülasyonları ile belirlenmiştir. NOMA kullanan en iyi röle seçimli işbirlikli ağların birçok durumda klasik röle seçimli işbirlikli sistemlerden daha iyi performans sağladığı simülasyon sonuçları ile görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Dik olmayan çoklu erişim, İşbirlikli iletişim, Nakagami-m sönümlemeli kanallar, Röle seçimi.

## **ABSTRACT**

## **MS THESIS**

# **THE PERFORMANCE OF NOMA-BASED COOPERATIVE WIRELESS NETWORKS WITH BEST RELAY SELECTION OVER NAKAGAMI-M FADING CHANNELS**

**Ahmad Farouq Ibrahim ASOUS**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. ÖZGÜR ÖZDEMİR**

**2022, 51 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Özgür ÖZDEMİR  
Asst. Prof. Dr. Uğur TAŞKIRAN  
Asst. Prof. Dr. Ayşe Elif CANBİLEN**

5G and beyond wireless systems, which enable very high speed data transfer and extremely low latency, are expected to play an important role in meeting the increasing wireless communication demands. Since the classical orthogonal multiple access methods are inefficient to provide high user access aimed with 5G and beyond communication networks, the non-orthogonal multiple access technique (NOMA) in which many users simultaneously transmit signals using the same channel but different transmission power levels has been proposed. On the other hand, cooperative diversity approach, which provides antenna diversity gain by obtaining virtual antenna arrays in the wireless network, is another principal technology used to increase the quality of service. The combination of cooperative communication technique and NOMA technology provides significant spectral efficiency increases in 5G and beyond mobile networks. In this master's thesis, a NOMA-based cooperative network consisting of a source,  $L$  relays and a destination is considered and a system model, where the source communicates with the destination directly and through the selected best relay is examined. The relay selection criterion has been proposed as choosing a relay that maximizes the achievable rate of the system. Nakagami-m fading is assumed for all the channels in the system and the average achievable rate of the system is determined by computer simulations for different values of  $L$ -total number of relays,  $m$ -fading parameter and link average signal-to-noise ratios. It has been seen by simulation results that in many cases the NOMA-based cooperative networks with the best relay selection outperforms the conventional cooperative systems with relay selection.

**Keywords:** Cooperative communications, Nakagami-m fading channels, Non-orthogonal multiple access, Relay selection.

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen, yardım ve fikirlerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, zor zamanlarımda beni hedefime ulaşmak için teşvik eden değerli hocam Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR'e ve sevgili aileme en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Ahmad Farouq Ibrahim ASOUS  
KONYA-2022

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                                                              | <b>iv</b>   |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                           | <b>v</b>    |
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                                                             | <b>vi</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                                                       | <b>vii</b>  |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>                                                           | <b>viii</b> |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                          | <b>1</b>    |
| <b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>                                                             | <b>3</b>    |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                                                              | <b>5</b>    |
| 3.1. Telsiz İletişim Kanalları.....                                                            | 5           |
| 3.1.1. Rayleigh sönümlemesi .....                                                              | 6           |
| 3.1.2. Rician sönümlemesi .....                                                                | 8           |
| 3.1.3. Nakagami-m sönümlemesi .....                                                            | 9           |
| 3.2. İşbirlikli İletişim Sistemleri .....                                                      | 11          |
| 3.2.1. Kuvvetlendir ve Aktar tekniği .....                                                     | 11          |
| 3.2.2. Çöz ve Aktar tekniği .....                                                              | 13          |
| 3.3. NOMA Kullanan İşbirlikli Telsiz Ağlar .....                                               | 16          |
| 3.4. NOMA Kullanan En İyi Röle Seçimli İşbirlikli Telsiz Ağlar .....                           | 17          |
| <b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                                                 | <b>20</b>   |
| 4.1. NOMA Kullanan İşbirlikli Telsiz Ağlarda Erişilebilir Hız Analizi .....                    | 20          |
| 4.2. NOMA Kullanan İşbirlikli Telsiz Ağlar İçin Simülasyon Sonuçları .....                     | 21          |
| 4.2.1. Rayleigh sönümlemeli kanallar için matematiksel analizler ve simülasyon sonuçları ..... | 22          |
| 4.2.2. Rician sönümlemeli kanallar için simülasyon sonuçları.....                              | 25          |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                                                           | <b>27</b>   |
| 5.1. Sonuçlar .....                                                                            | 27          |
| 5.1.1. Bir adet röle durumunda simülasyon sonuçları .....                                      | 29          |
| 5.1.2. Röle seçim kriteri.....                                                                 | 32          |
| 5.1.3. Simülasyon sonuçları .....                                                              | 32          |
| 5.2. Öneriler .....                                                                            | 36          |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                         | <b>37</b>   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                |                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------|
| $a$            | : İletim güç katsayıları                                    |
| $\rho$         | : İşbirlikli sistemin SNR değeri                            |
| $C$            | : Anlık ortalama erişilebilir hız                           |
| $\bar{C}$      | : Ortalama erişilebilir hız                                 |
| $E_s$          | : Sembol enerjisi                                           |
| $E_b$          | : Bit enerjisi                                              |
| $y$            | : Alıcıda oluşan işaret                                     |
| $x$            | : İletilen veri sembolü                                     |
| $\hat{x}$      | : Rölenin elde ettiği kaynak verisi                         |
| $z$            | : Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN)                    |
| $h$            | : Kanalın sönmüleme katsayısı                               |
| $N_0$          | : Gürültünün güç spektral yoğunluğu                         |
| $f(x)$         | : Olasılık yoğunluk fonksiyonu                              |
| $\sigma^2$     | : Varyans                                                   |
| $S$            | : Kaynak (Source)                                           |
| $s$            | : Veri sembolleri                                           |
| $R$            | : Röle (Relay)                                              |
| $D$            | : Hedef (Destination)                                       |
| $G$            | : Kuvvetlendirme katsayısı                                  |
| $m$            | : Nakagami-m sönmüleme parametresi                          |
| $K$            | : Rician faktörü                                            |
| $L$            | : Toplam röle sayısı                                        |
| $\gamma$       | : Kanalın anlık işaret-gürültü oranı (SNR) değeri           |
| $\bar{\gamma}$ | : Kanalın ortalama SNR değeri                               |
| $E[.]$         | : Beklenen değer operatörü                                  |
| $\alpha$       | : Kanal sönmüleme genliği                                   |
| $\Omega$       | : Ortalama kanal gücü                                       |
| $I_0(.)$       | : Birinci tip sıfır mertebeli düzenlenmiş Bessel fonksiyonu |

## Kısaltmalar

|       |                                                                                    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 5G    | : Beşinci Nesil Mobil Ağlar (Fifth-Generation Mobile Networks)                     |
| AF    | : Kuvvetlendir ve Aktar (Amplify and Forward)                                      |
| AWGN  | : Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü (Additive White Gaussian Noise)                  |
| BER   | : Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)                                                  |
| BPSK  | : İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase-Shift Keying)                     |
| CDMA  | : Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)                         |
| C-MRC | : İşbirlikli En Büyük Oran Birleştirmesi (Cooperative Maximal Ratio Combining).    |
| DF    | : Çöz ve Aktar (Decode and Forward)                                                |
| FDMA  | : Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)                |
| IoT   | : Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)                                        |
| LOS   | : Doğrudan Görüş Hattı (Line of Sight)                                             |
| MIMO  | : Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multiple Input Multiple Output)                         |
| MTC   | : Makine Tipi Haberleşme (Machine-Type Communications)                             |
| NOMA  | : Dik Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access)                        |
| OFDMA | : Dik Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) |
| OMA   | : Dik Çoklu Erişim (Orthogonal Multiple Access)                                    |
| QAM   | : Dördün Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)                      |
| QPSK  | : Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)                |
| SER   | : Sembol Hata Olasılığı (Symbol Error Rate)                                        |
| SIC   | : Ardışık Girişim Giderme (Successive Interference Cancellation)                   |
| SNR   | : İşaret-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)                                     |
| TDMA  | : Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)                       |

## 1. GİRİŞ

Yeni nesil iletişim modellerinin insanlar arası mobil iletişim sistemlerine ek olarak makine tipi haberleşme sistemlerini (Machine-Type Communications, MTC) de içermesi hedeflenmektedir (Shariatmadari ve ark., 2015; Ferdi ve ark., 2018). Bu durumun veri trafiğinde mevcut duruma göre 1000 kattan fazla bir artış meydana getirmesi beklenmektedir (Li ve ark., 2014; Wen ve Zhu, 2013). Her geçen gün artmakta olan mobil iletişim taleplerini karşılamak üzere ortaya atılmış olan 5G ve ötesi iletişim sistemlerinin oldukça düşük hata oranı ve gecikme, yüksek hızlı veri transferi, düşük verici gücü gibi beklentilere cevap verebilmesi gereklidir. 5G ve ötesi telsiz iletişim sistemleri ile hedeflenen servis kalitesine ulaşılmasında çok girişli çok çıkışlı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) sistemler, işbirlikli çeşitleme ve dik olmayan çoklu erişim (NOMA) gibi teknolojik bileşenler önemli rol oynayacaklardır.

MIMO sistemler verici ve alıcı kısımda birden fazla sayıda anten bulundurarak anten çeşitlemesi sağlamak suretiyle önemli kapasite artışları sunan yapılardır (Foschini ve Gans, 1998; Telatar, 1999). Böylelikle yeni nesil iletişim teknolojilerinin gerektirdiği yüksek kapasite ve düşük enerji tüketimi gibi ihtiyaçların karşılanmasına katkı sunarlar. MIMO teknolojisi oldukça yüksek kapasite artışları sağlamakla birlikte terminal boyutlarını, donanım karmaşıklığını ve maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Alıcı ve/veya vericide en yüksek kanal kazancına sahip antenlerin aktif edilmesi prensibine dayanan anten seçim tekniğinin bu sorunları ortadan kaldırmakla birlikte MIMO sistemlerin sunduğu tam çeşitleme kazancını koruyabildiği gösterilmiştir (Bahçeci ve ark., 2003; Chen ve ark., 2005; Özdemir ve ark., 2010).

Verici ve alıcıda fiziksel anten dizileri konumlandırılarak anten çeşitleme kazancının elde edildiği çok antenli sistemlere alternatif olarak ortaya atılmış bir başka model işbirlikli çeşitleme yöntemidir. İşbirlikli çeşitleme, kaynak ile hedef arası iletişime ortamda bulunan ve röle adı verilen ara terminallerin yardımcı olması fikrine dayanır ve bu şekilde elde edilen sanal anten dizileri yoluyla anten çeşitleme kazancı sağlanır. İşbirlikli bir iletişim sisteminin performansını iyileştiren ana faktörlerden birisi sistemdeki toplam röle sayısındaki artıştır. Bununla birlikte toplam röle sayısındaki artış beraberinde sistem enerji tüketiminde ve karmaşıklığında artış oluşturmaktadır. Ağdaki tüm röleleri kullanmak yerine performansı en iyileştiren rölelerin seçilerek aktif yapılması prensibine dayanan röle seçim tekniği ile işbirlikli ağlarda düşük enerji tüketimi ve daha iyi servis kalitesi elde etmek mümkün olmaktadır.

5G ve ötesi sistemlerle hedeflenen kullanıcı erişim seviyelerine ulaşmada frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA), zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA), kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) ve dik frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) gibi klasik dik çoklu erişim (OMA) teknikleri yetersiz kalmaktadır. Kullanıcıların güç düzleminde çoğullanması fikrine dayanan NOMA tekniğinde verici tarafta süperpozisyon kodlama (superposition coding) alıcı tarafta ise ardışık girişim giderme (SIC) teknikleri kullanılmaktadır. Böylelikle yeni nesil iletişim sistemlerinin gerektirdiği performans ölçütlerine ulaşmak mümkün hale gelmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında NOMA kullanan Nakagami-m sönümlemeli işbirlikli telsiz ağlarda en iyi röle seçimi konusu ele alınmıştır. Beş bölümden oluşan tezin ikinci bölümde kaynak araştırması verilmiştir. Üçüncü bölümde materyal ve yöntem, dördüncü bölümde araştırma sonuçları sunulmuştur. Son bölümünde ise sonuçlar ve ileriye yönelik araştırma konuları verilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

MIMO iletişim teknolojisinin önemli kapasite artışları sunduğu literatürde gösterilmiştir (Telatar, 1999; Foschini ve Gans, 1998). Telsiz sistemlerde anten çeşitleme kazancı sağlayan bir diğer önemli yaklaşım işbirlikli çeşitlemedir. Kaynaktan hedefe olan iletimde ortamda bulunan ve röle adı verilen başka telsiz terminallerin de görev alması suretiyle sanal anten dizilerinin oluşturulduğu ve anten çeşitleme kazancının sağlandığı işbirlikli iletişim tekniğinin internet, hücresel mobil iletişim sistemleri ve multimedya hizmetleri gibi haberleşme teknolojilerinin gerektirdiği servis kalitesini sağlamada önemli rol oynayacağı öngörülmektedir. Bu konuda yapılmış öncü çalışmalardan olan (Sendonaris ve ark., 2003)'te işbirlikli iletişim sistemlerinin servis dışı kalma olasılıkları analiz edilerek CDMA uygulaması incelenmiştir. (Laneman ve ark., 2004)'te ise DF, AF, seçimli aktarma ve artımlı aktarma protokolleri önerilmiş ve bunların servis dışı kalma olasılık ifadeleri türetilmiştir.

Yeni nesil iletişim teknolojilerinin gerektirdiği veri hızı, kapasite, spektral verimlilik, bağlantı kalitesi ve düşük verici gücü gibi ihtiyaçları karşılamak üzere önerilmiş teknolojilerden birisi NOMA'dır (Dai ve ark., 2015; Saito ve ark., 2013). NOMA tekniği, FDMA ve TDMA gibi klasik OMA tekniklerinden farklı olarak değişik güç seviyeleri tahsisi ile frekans ve zaman düzlemlerinde kanal kaynaklarının kullanıcılar tarafından paylaşılması prensibine dayanır (Liu ve ark., 2016; Shin ve ark., 2017). Bu işlem gerçekleştirilirken kanal şartları iyi olan kullanıcılara düşük, kanal şartları nispeten kötü kullanıcılara yüksek güç tahsisi yapılır. Alıcılarda ise SIC tekniği ile sembol kestirimi gerçekleştirilir (Liu ve ark., 2017; Ding ve ark., 2017).

İşbirlikli iletişim tekniği ile NOMA teknolojisinin bir arada kullanımı 5G ve ötesi mobil ağlarda (Li ve ark., 2014; Wen ve Zhu, 2013) kayda değer spektral verimlilik artışları sağlamaktadır. (Kim ve Lee, 2015)'te bir kaynak, bir röle ve bir hedeften oluşan temel bir işbirlikli ağda NOMA iletişim tekniğinin performansı ortalama erişilebilir hız ifadeleri türetilerek ve bir güç tahsisi yaklaşımı sunularak bağımsız Rayleigh sönümlmeli kanal yapısı için incelenmiştir. Nesnelerin interneti (IoT) gibi bazı önemli 5G uygulamalarında doğrudan görüş hattı (LOS) bileşenlerinin de alıcıda mevcut olması durumu göz önüne alınarak (Kim ve Lee, 2015)'teki temel sistem modelinin aynısı (Jiao ve ark., 2017)'de verilen çalışmada Rician sönümlmeli kanallarda ele alınmıştır. (Kim ve Lee, 2015)'teki tasarım modelini Rayleigh ve Rician sönümlemesi dışında farklı kanal yapılarında ele alan literatürde başka çalışmalar da

mevcuttur (Panic ve ark., 2019; Kumar ve ark., 2019; Soni ve ark., 2020). Literatürde kapasiteyi maksimum yapan en iyi röle seçimine dayalı NOMA kullanan işbirlikli ağlar da incelenmiştir (Kim ve ark., 2016; Özdemir, 2020). Bunun yanı sıra ağ kodlamalı işbirlikli haberleşme sistemlerinin NOMA işaretlenmesi ile birlikte kullanımını ele alan çalışmalar da literatürde bulunmaktadır (Agarwal ve Jagannatham, 2019; Özdemir, 2021).

Bu çalışmada NOMA tabanlı ve en iyi röle seçimli işbirlikli iletişim ağlarının Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki başarımı incelenmiştir. Literatürdeki NOMA tabanlı işbirlikli ağların Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki başarımını ele alan diğer çalışmalardan (Kumar ve ark., 2020; Li ve ark., 2017; Ibraheem ve ark., 2018) farklı olarak, (Kim ve Lee, 2015)'te sunulan bir kaynak bir röle ve bir hedef düğümünden oluşan sistem modeli üzerinde durulmuştur.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Telsiz İletişim Kanalları

İletişim kanalındaki yansımalar ve hareketlilik nedeniyle alıcıdaki işarete meydana gelen ve sönümleme olarak isimlendirilen dalgalanma etkisi, telsiz iletişim sistemlerinin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan en önemli zorluklardan birisidir. Bozucu etki olarak sadece gürültünün olması halinde alıcıda oluşan işaret

$$y = \sqrt{E_s} x + z \quad (3.1)$$

olarak verilebilirken frekans seçici olmayan (düz) sönümlemeli bir kanalda alıcıda meydana gelen işaret

$$y = h\sqrt{E_s} x + z \quad (3.2)$$

biçiminde olur. (3.1) ve (3.2) ifadelerinde  $E_s$  sembol gücünü,  $x$  iletilen veri sembolünü,  $h$  sönümleme katsayısını,  $z$  ise alıcıda oluşan toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN) belirtmekte olup boyut başına ortalaması sıfır ve varyansı  $N_0/2$  olan kompleks Gauss rastlantı değişkeni biçiminde modellenmektedir. Burada  $N_0$  gürültünün güç spektral yoğunluğunu göstermektedir. Gauss dağılımına sahip bir  $n$  rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, pdf) ise

$$f_N(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(n-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty \leq n \leq \infty \quad (3.3)$$

şeklindedir. (3.3) eşitliğinde  $\mu$  beklenen değeri,  $\sigma^2$  ise varyansı temsil etmektedir.

(3.1) ifadesi ile gösterilen AWGN kanalın işaret-gürültü oranı (SNR)  $\frac{E_s}{N_0}$

ifadesi ile tanımlanırken (3.2) ifadesi ile tanımlanan sönümlemeli bir kanalda anlık ve

ortalama SNR sırasıyla  $\gamma = \frac{E_s |h|^2}{N_0}$  ve  $\bar{\gamma} = \frac{E_s}{N_0} E[|h|^2]$  ile belirlenir. Burada  $E[.]$

operatörü beklenen değeri göstermektedir. AWGN ve sönümlemeli kanalların kapasiteleri ise sırasıyla

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{N_0} \right) \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (3.4)$$

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{N_0} |h|^2 \right) \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (3.5)$$

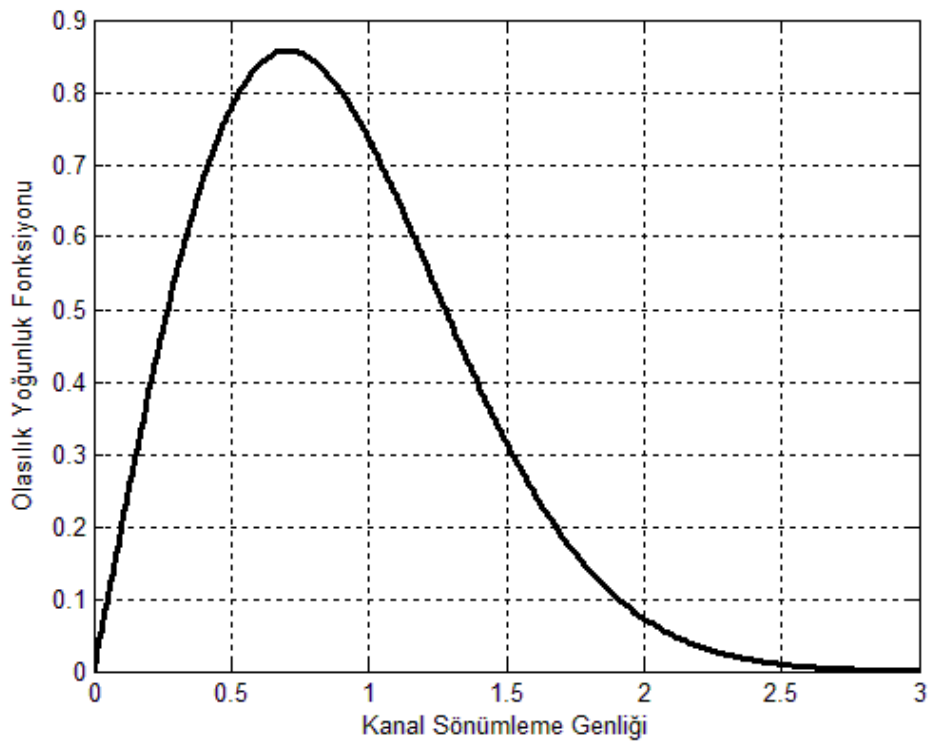
eşitlikleri ile belirlenir (Shannon, 1948; Gesbert ve Akhtar, 2002).

### 3.1.1. Rayleigh sönümlemesi

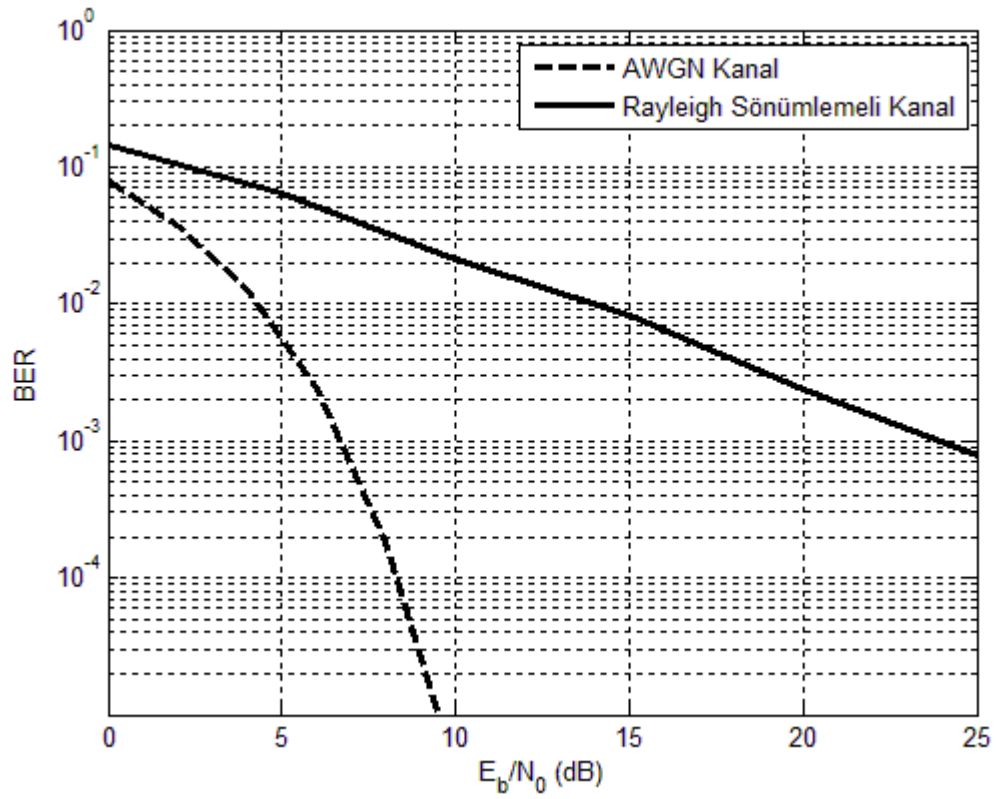
Rayleigh sönümlemesinde iletilen işaretin LOS bileşeni alıcıya ulaşmazken, alıcıda oluşan işaret yansıyan bileşenlerin toplamından ibarettir. Rayleigh sönümlemeli kanal yapısında (3.2) ifadesinde geçen ve kanalın sönümleme katsayını göstermekte olan  $h$  terimi boyut başına ortalaması sıfır ve varyansı  $\sigma_h^2/2$  olan kompleks Gauss rastlantı değişkenleri biçiminde modellenir. Bu durumda kanal sönümleme genliği  $\alpha = |h|$  Rayleigh dağılımlı bir rastlantı değişkeni olur ve olasılık yoğunluk fonksiyonu ise

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega} e^{-\frac{\alpha^2}{\Omega}}, \quad \alpha \geq 0 \quad (3.6)$$

ifadesi ile verilebilir (Simon ve Alouini, 2000). (3.6) eşitliğinde  $\Omega = E[\alpha^2]$  şeklindedir. Şekil 3.1’de Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonunun grafiği verilmiştir. Şekil 3.2’de ise QPSK modülasyonunun Rayleigh sönümlemeli ve AWGN kanallarda ortalama bit hata oranı (BER) simülasyon eğrileri sunulmuştur. Burada  $E_b$  bit enerjisi olup QPSK modülasyonu için  $E_s = 2E_b$  şeklindedir. Eğrilerden de görüldüğü gibi sönümleme sistem performansını önemli ölçüde düşürmektedir.



Şekil 3.1.  $\Omega = 1$  için Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (Simon ve Alouini, 2000)



Şekil 3.2. QPSK modülasyonunun BER performans eğrileri

### 3.1.2. Rician sönümlemesi

Alicıda çok sayıda yansıyan işaret bileşenlerine ek olarak güçlü bir LOS işaret bileşeninin de bulunması durumunda telsiz kanal Rician dağılımı ile modellenir ve (3.2) ifadesindeki kanal sönümleme genliğinin ( $\alpha = |h|$ ) olasılık yoğunluk fonksiyonu

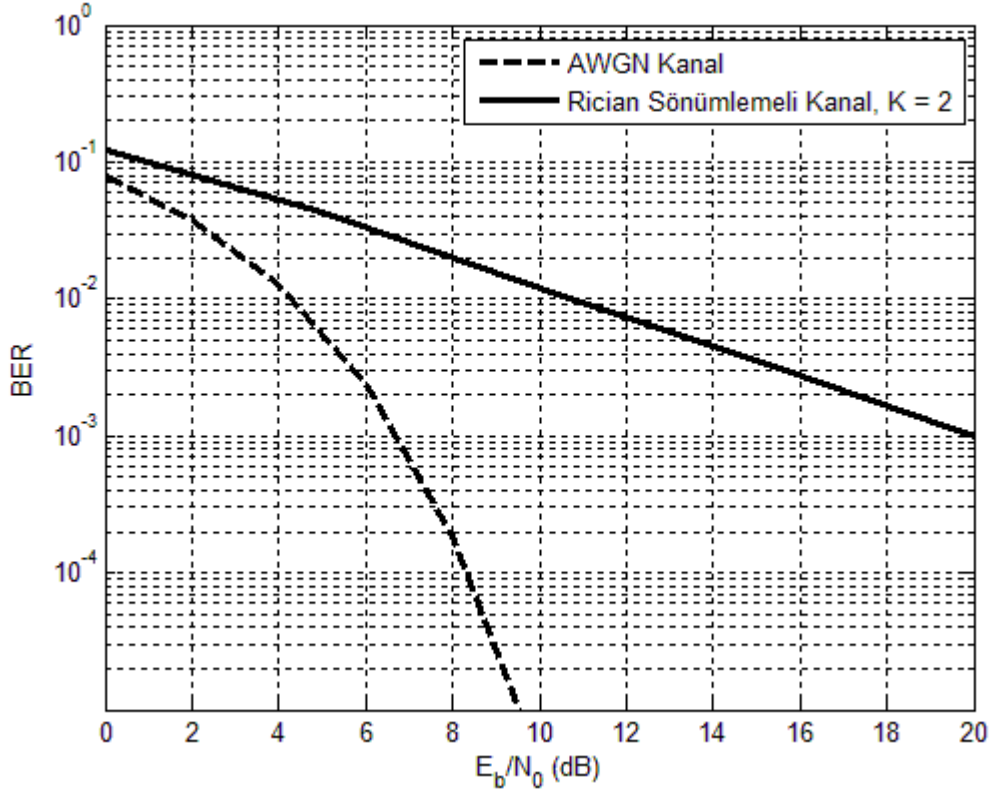
$$f_{\alpha}(\alpha) = \frac{2\alpha(1+n^2)}{\Omega} e^{-n^2 - \frac{(1+n^2)\alpha^2}{\Omega}} I_0 \left( 2n\alpha \sqrt{\frac{(1+n^2)}{\Omega}} \right), \quad \alpha \geq 0 \quad (3.7)$$

şeklinde olur (Simon ve Alouini, 2000). (3.7) eşitliğinde  $n$  sönümleme parametresini,  $\Omega$  toplam alınan gücü ve  $I_0(\cdot)$  birinci tip sıfır mertebeli düzenlenmiş Bessel fonksiyonunu göstermektedir.  $K = n^2$  olarak alınan ve LOS bileşeni ile saçılmış işaret bileşenlerinin güç oranlarını gösteren Rician faktörüne göre sönümleme genliğinin olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f_{\alpha}(\alpha) = \frac{2\alpha(1+K)}{\Omega} e^{-K - \frac{(1+K)\alpha^2}{\Omega}} I_0 \left( 2\alpha \sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}} \right), \quad \alpha \geq 0 \quad (3.8)$$

olarak düzenlenebilir. Burada  $K = 0$  durumunda Rayleigh sönümlmeli kanal,  $K = \infty$  durumunda ise AWGN kanalı elde edilir.

Şekil 3.3'te QPSK modülasyonunun Rician sönümlmeli kanallarda  $K = 2$  alınarak elde edilmiş performans eğrisi ile AWGN kanallardaki performans eğrisi karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi sönümlleme etkisi nedeniyle önemli performans düşüşleri gözlenmektedir.



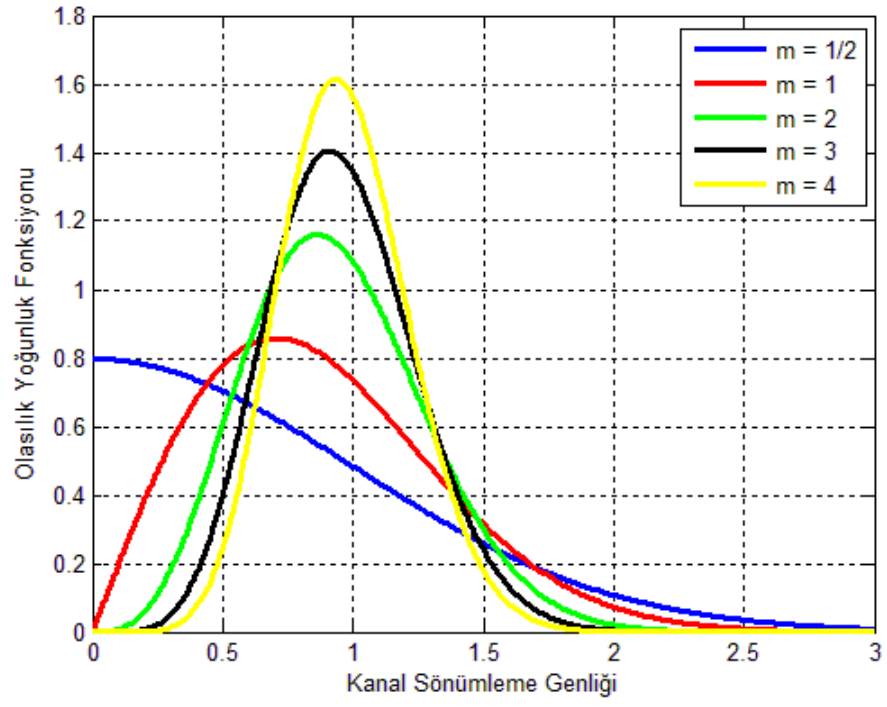
Şekil 3.3. QPSK modülasyonunun Rician sönümlmeli ( $K = 2$  ve  $\Omega = 1$ ) ve AWGN kanallardaki BER performansları

### 3.1.3. Nakagami-m sönümlemesi

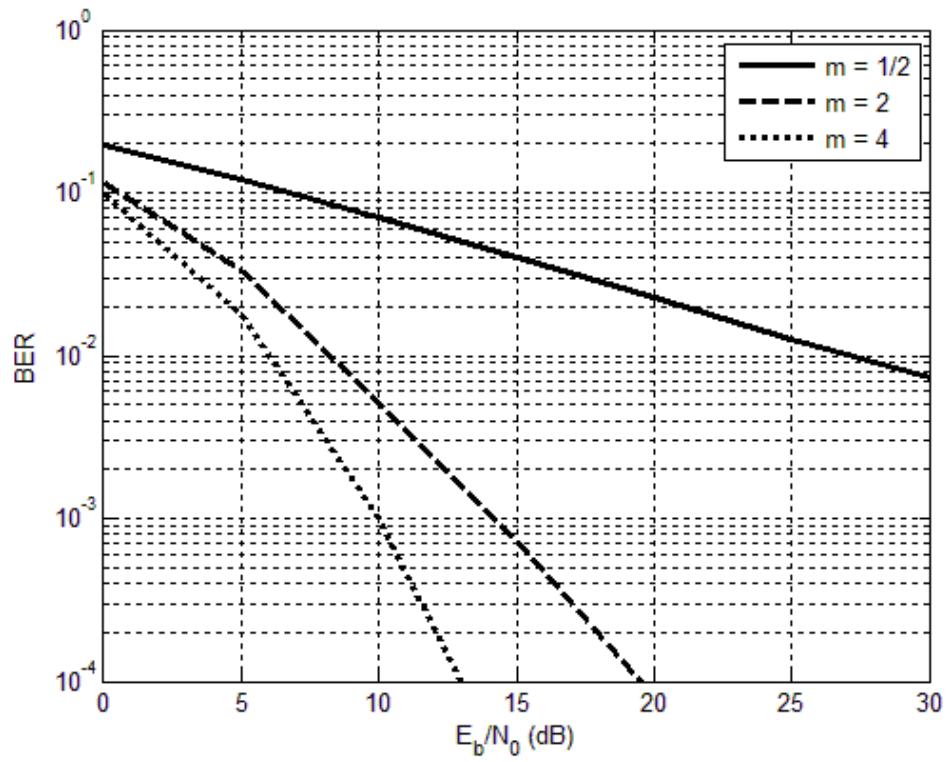
Sönümlmeli kanalları modellemede kullanılan bir başka dağılım kanal sönümleme genliğinin olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f_{\alpha}(\alpha) = \frac{2m^m \alpha^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0 \quad (3.9)$$

ile verilen Nakagami-m dağılımıdır. (3.9) ifadesinde  $m$  sönümleme parametresi olup  $1/2$  ile  $\infty$  arasında değerler alır.  $m = 1/2$  için tek taraflı Gauss dağılımı,  $m = 1$  için Rayleigh dağılımı ve  $m \rightarrow \infty$  durumunda AWGN kanalı elde edilir (Simon ve Alouini, 2000). Şekil 3.4'te ortalama link gücü  $\Omega = 1$  alınarak sönümleme parametresinin çeşitli değerleri için elde edilmiş olan olasılık yoğunluk fonksiyonu eğrileri verilmiştir. Şekil 3.5'te ise QPSK modülasyonunun Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki BER performansı gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Nakagami-m dağılımının  $\Omega = 1$  ve çeşitli  $m$  değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonları



Şekil 3.5. QPSK modülasyonunun Nakagami-m sönümlenmeli kanallardaki performansı

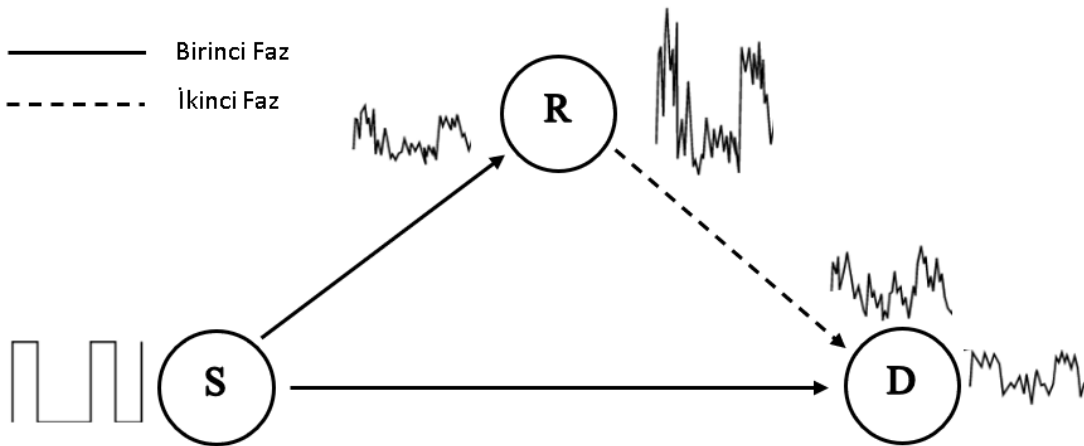
### 3.2. İşbirlikli İletişim Sistemleri

Telsiz iletişim sistemlerinde ortaya çıkan sönümlenmenin bozucu etkilerini azaltmakta kullanılan yaklaşımlardan birisi çeşitlemedir. Çeşitleme, bilgi işaretinin kopyalarının birbirinden bağımsız sönümlenmeli farklı kanallardan iletilmesi prensibine dayanır. Bu kopyaların hepsinin birden yüksek bozulmaya uğrama olasılıkları düşük olduğundan alıcıda uygun birleştirme teknikleri kullanılarak performans artışı elde edilebilir. Çeşitleme uzay (anten), frekans ve zaman düzlemlerinde gerçekleştirilebilir.

İşbirlikli iletişim sistemlerinde kaynağın hedefe olan iletiminde ortamda bulunan ve röle olarak isimlendirilen komşu terminallerin görev alması sağlanarak anten çeşitlemesi sağlanır. Böylelikle verici ve alıcıda fiziksel anten dizileri konumlandırılarak elde edilen MIMO sistemlere göre terminal boyut ve maliyetlerinde kayda değer düşmeler elde edilmektedir. Röle terminallerinde kullanılan işaret işleme yaklaşımına göre işbirlikli ağlar “AF” veya “DF” tekniklerine dayalı olabilmektedirler (Laneman ve Wornell, 2003; Laneman ve ark., 2004).

#### 3.2.1. Kuvvetlendir ve Aktar tekniği

AF tekniğinde röle termali kaynaktan aldığı işareti kuvvetlendirerek hedefe tekrar iletir. Şekil 3.6’da bir kaynak (source, S), bir röle (relay, R) ve bir hedef (destination, D) olmak üzere üç terminalden oluşan, AF tekniğine dayalı temel bir işbirlikli ağ yapısı görülmektedir. İki fazdan oluşan iletim protokolünün ilk fazında kaynak verisini dinlemedeki röle ve hedef terminallerine iletir.



Şekil 3.6. AF protokolü

Bu durumda hedef ve rölede oluşan işaretler sırasıyla

$$y_{SD} = h_{SD} \sqrt{E_s} x + z_{SD} \quad (3.10)$$

$$y_{SR} = h_{SR} \sqrt{E_s} x + z_{SR} \quad (3.11)$$

şeklinde. Burada  $x$  kaynağın sembolünü,  $h_{SD}$  ve  $h_{SR}$  sırasıyla kaynak-hedef ve kaynak-röle arası linklere ilişkin sönmüleme katsayılarını,  $z_{SD}$  ve  $z_{SR}$  ise gürültü terimlerini göstermektedir. İkinci fazda röle ilk fazda aldığı işareti kuvvetlendirerek hedefe iletir. Bu durumda ikinci fazda rölenin iletimi sonucu hedefte meydana gelen işaret

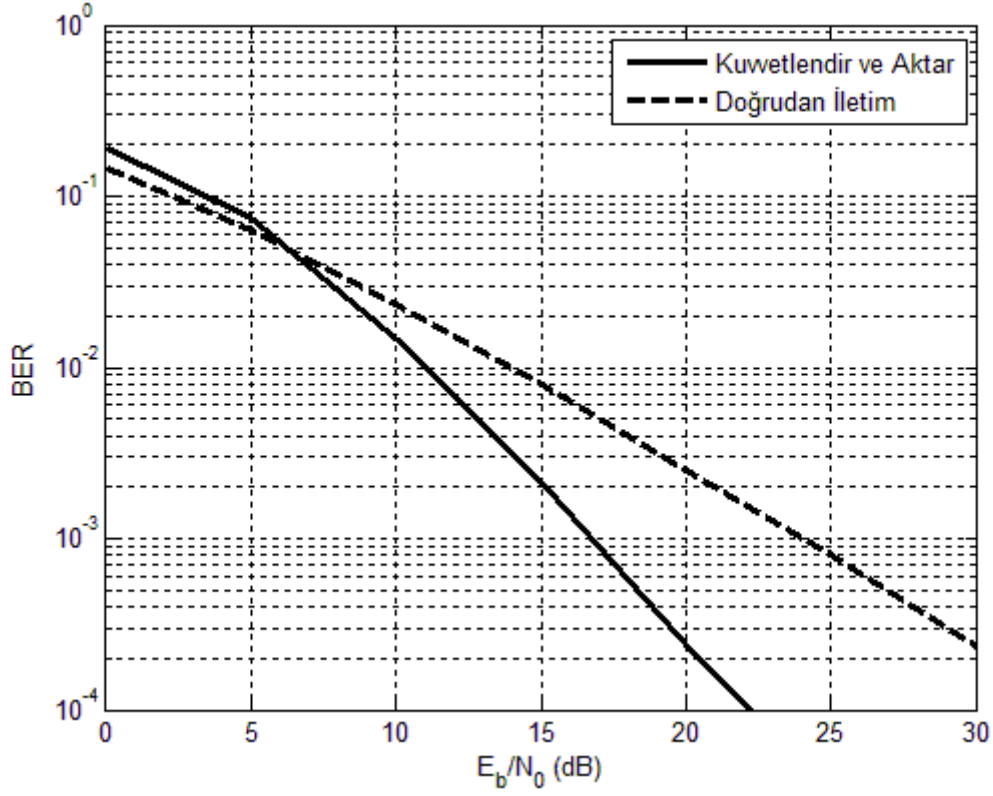
$$y_{RD} = h_{RD} G \left[ h_{SR} \sqrt{E_s} x + z_{SR} \right] + z_{RD} \quad (3.12)$$

olarak verilebilir. Bu ifadede  $z_{RD}$  gürültüyü ve  $h_{RD}$  röle-hedef arası kanalın sönmüleme katsayısını belirtirken kuvvetlendirme katsayısı

$$G = \sqrt{\frac{E_s}{|h_{SR}|^2 E_s + N_0}} \quad (3.13)$$

ile bulunmaktadır. (3.12) ifadesinden de görüldüğü gibi AF tekniğinde gürültü de kuvvetlendirilerek hedefe aktarılmaktadır. Bu durum AF tekniğinin dezavantajını teşkil etmektedir.

Şekil 3.7’de AF protokolü ile doğrudan iletimin BPSK modülasyonu için BER performans eğrileri verilmiştir. Görüldüğü gibi AF tekniği çeşitleme kazancı sağlamakta ve daha iyi başarımlar sunmaktadır.



Şekil 3.7. AF protokolü ile doğrudan iletimin Rayleigh sönümlmeli kanallarda BPSK modülasyonu için performans eğrileri

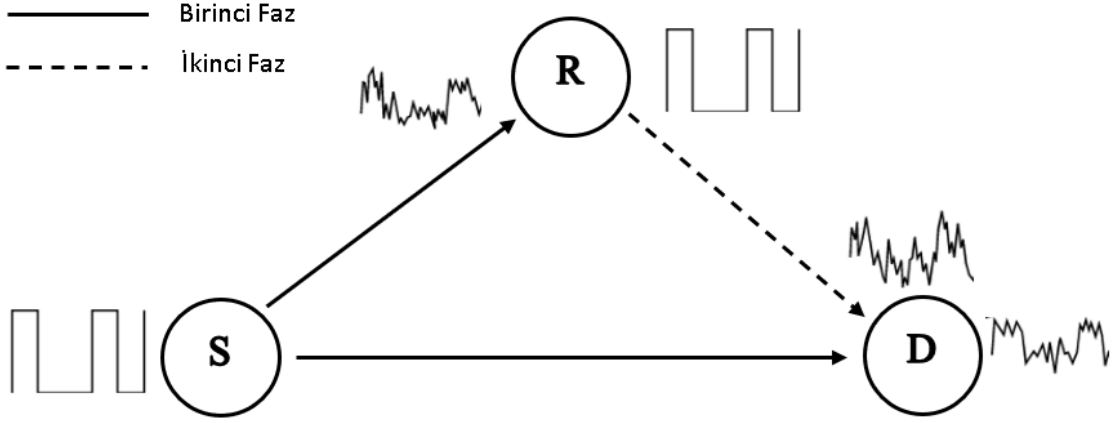
### 3.2.2. Çöz ve Aktar tekniği

DF tekniğinde röle termali kaynaktan aldığı işareti çözdükten sonra hedefe tekrar iletir. Şekil 3.8’de bir kaynak, bir röle ve bir hedef terminalinden oluşan DF tekniğini kullanan işbirlikli bir iletişim sistemi verilmiştir. İletişim protokolü iki fazdan oluşmaktadır. İlk fazda kaynak iletimde iken röle ve hedef dinlemededir. Bu durumda hedef ve röle meydana gelen işaretler sırasıyla

$$y_{SD} = h_{SD} \sqrt{E_s} x + z_{SD} \quad (3.14)$$

$$y_{SR} = h_{SR} \sqrt{E_s} x + z_{SR} \quad (3.15)$$

olarak ifade edilebilir. (3.14) ve (3.15) eşitliklerinde  $h_{SD}$  ve  $h_{SR}$  sırasıyla kaynak-hedef ve kaynak-röle arası kanallara ilişkin sönümleme katsayılarını,  $z_{SD}$  ve  $z_{SR}$  ise



Şekil 3.8. DF protokolü

gürültü terimlerini göstermektedir. Röle kaynak verisini sezdikten sonra ikinci faz iletimini gerçekleştirir. Bu durumda ikinci fazda hedefte oluşan işaret

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{E_s} \hat{x} + z_{RD} \quad (3.16)$$

olarak verilebilir. Bu ifadede  $z_{RD}$  gürültüyü ve  $h_{RD}$  röle-hedef arası kanalın sönümleme katsayısını belirtirken  $\hat{x}$  rölenin elde ettiği kaynak verisidir. DF stratejisinde karşılaşılan temel problem röledeki algılama hataları sonucu meydana gelen hata yayılımı sorunudur. Bu sorunun meydana getirdiği performans düşüşlerini azaltmak üzere ortaya atılmış tekniklerden birisi işbirlikli en büyük oran birleştirmesidir (C-MRC). C-MRC tekniğinde (Wang ve ark., 2007) hedefteki karar kuralı

$$\bar{x} = \arg \min_{x \in A} \left| w_{SD} y_{SD} + w_{RD} y_{RD} - |h_{SD}|^2 \sqrt{E_s} x - w_{RD} h_{RD} \sqrt{E_s} x \right|^2 \quad (3.17)$$

biçimindedir. Burada  $A$  işaret kümesinin elemanları olup BPSK modülasyonu için

$A \in \{-1, +1\}$  şeklindedir. Birleştirme katsayıları  $w_{SD} = h_{SD}^*$  ve  $w_{RD} = \frac{\gamma_e h_{RD}^*}{\gamma_{RD}}$  olarak

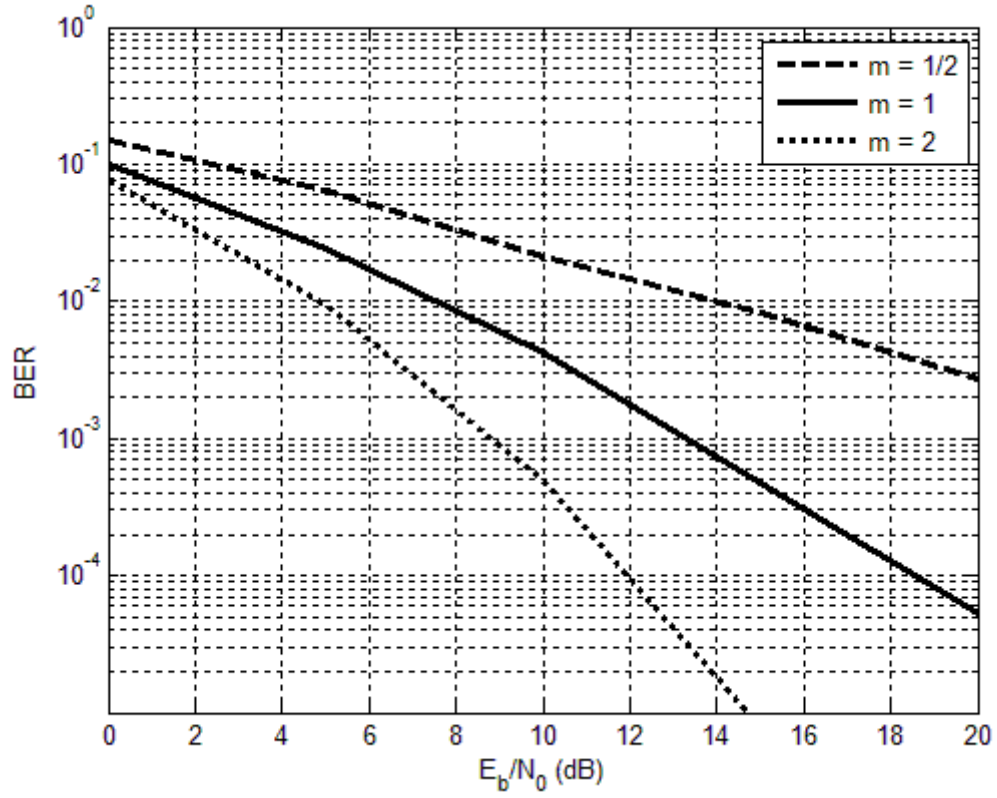
alınırken  $\gamma_{RD} = \frac{E_s |h_{RD}|^2}{N_0}$  ve  $\gamma_e = P_{BER}^{-1} [P_{BER}^e(\gamma_{SR}, \gamma_{RD})]$  şeklindedir.  $P_{BER}^e(\gamma_{SR}, \gamma_{RD})$

kaynak-röle-hedef linkinin BER değeri olup (Wang ve ark., 2007)

$$P_{\text{BER}}^e(\gamma_{\text{SR}}, \gamma_{\text{RD}}) = P_{\text{BER}}(\gamma_{\text{SR}})[1 - P_{\text{BER}}(\gamma_{\text{RD}})] + P_{\text{BER}}(\gamma_{\text{RD}})[1 - P_{\text{BER}}(\gamma_{\text{SR}})] \quad (3.18)$$

ile hesaplanır. (3.18) eşitliğinde  $\gamma_{\text{SR}} = \frac{E_s |h_{\text{SR}}|^2}{N_0}$  ve  $\gamma_{\text{RD}} = \frac{E_s |h_{\text{RD}}|^2}{N_0}$  şeklindedir.

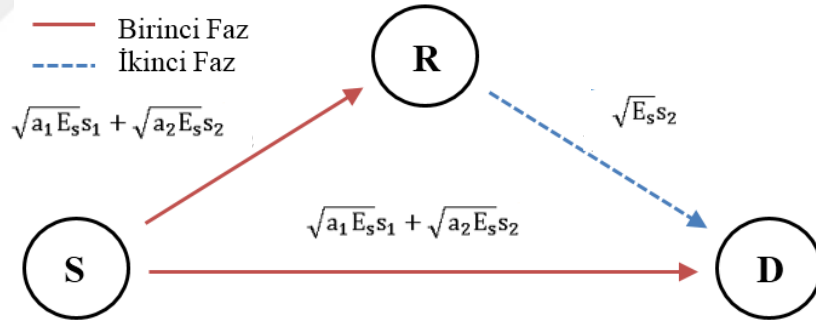
Şekil 3.9’da C-MRC tabanlı DF tekniğinin Nakagami-m kanallardaki performans eğrileri verilmiştir. Beklendiği gibi m arttıkça performans iyileşmektedir.



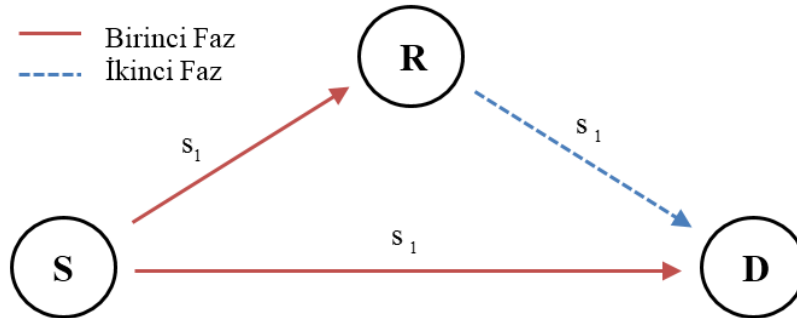
Şekil 3.9. DF protokolünün BPSK modülasyonu durumunda ve C-MRC tekniği ile Nakagami-m kanallardaki performans eğrileri

### 3.3. NOMA Kullanan İşbirlikli Telsiz Ağlar

Şekil 3.10’da bir kaynak (S), bir röle (R) ve bir hedeften (D) oluşan NOMA tekniğinin kullanıldığı bir işbirlikli haberleşme modeli görülmektedir (Kim ve Lee, 2015; Jiao ve ark., 2017; Panic ve Jayakody, 2019; Kumar ve ark., 2019; Soni ve ark., 2020; Özdemir, 2019). Şekil 3.11’deki her iki iletim fazında da kaynağa ait bir sembolün iletildiği klasik işbirlikli iletişim modelinden farklı olarak NOMA tabanlı işbirlikli iletişim sisteminde iletişim protokolünün ilk fazında kaynak dinlemedeki hedef ve röleye  $\sqrt{a_1 E_s s_1} + \sqrt{a_2 E_s s_2}$  sembolünü gönderir. Burada  $E_s$  toplam iletim gücünü,  $s_1$  ve  $s_2$  veri sembollerini,  $a_1$  ve  $a_2$  iletim güç katsayılarını göstermektedir ( $E[|s_1|^2] = E[|s_2|^2] = 1$ ,  $a_1 + a_2 = 1$ ). Rölede, SIC tekniği kullanılarak  $s_2$  sembolü elde edilir. İkinci fazda röle  $E_s$  gücü ile  $s_2$  sembolünü hedefe aktarır. Böylelikle NOMA işaretleşmesinin kullanıldığı işbirlikli iletişim sisteminde iki iletim fazında iki sembolün hedefe iletimi sağlanarak Şekil 3.10’da görülen klasik işbirlikli ağa göre spektral verimlilikte iyileşme elde edilmektedir.



Şekil. 3.10. NOMA tabanlı işbirlikli iletişim için sistem modeli



Şekil. 3.11. Klasik işbirlikli iletişim için sistem modeli

Bu durumda NOMA tabanlı sistem modelinde birinci fazda röle ve hedefte oluşan işaretler

$$y_{SR} = h_{SR}(\sqrt{a_1 E_s} s_1 + \sqrt{a_2 E_s} s_2) + z_{SR} \quad (3.19)$$

$$y_{SD} = h_{SD}(\sqrt{a_1 E_s} s_1 + \sqrt{a_2 E_s} s_2) + z_{SD} \quad (3.20)$$

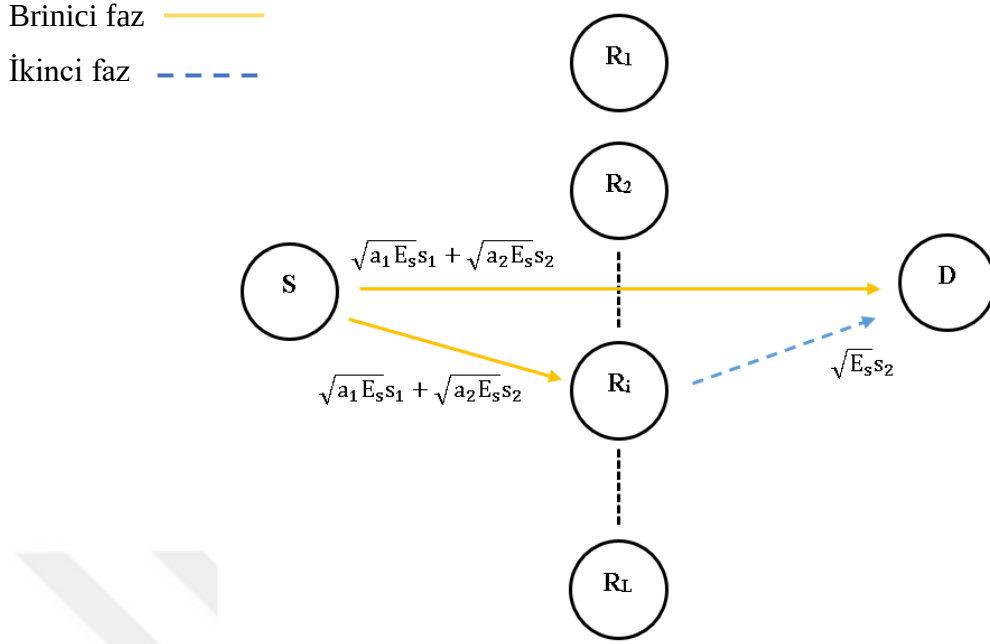
olarak verilirken ikinci fazda hedefte oluşan işaret

$$y_{RD} = h_{RD}(\sqrt{E_s} s_2) + z_{RD} \quad (3.21)$$

şeklinde olur (Kim ve Lee, 2015). Burada  $z_{SR}$ ,  $z_{SD}$  ve  $z_{RD}$  gürültü terimleri olup bağımsız sıfır ortalamalı ve boyut başına varyansları  $N_0/2$  olan kompleks Gauss rastlantı değişkenleri olarak modellenirler. Bu tez çalışmasında  $h_{SD}$ ,  $h_{SR}$  ve  $h_{RD}$  ile gösterilen üç kanal, (Kim ve Lee, 2015; Jiao ve ark., 2017; Panic ve Jayakody, 2019; Kumar ve ark., 2019; Soni ve ark., 2020)'den farklı olarak Nakagami-m sönümlmeli alınmaktadır. Nakagami-m dağılımına sahip bir  $x$  rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu (3.9) ifadesinde verilmişti. Burada link ortalama gücü  $\Omega = E[\alpha^2]$  şeklindedir.

### 3.4. NOMA Kullanan En İyi Röle Seçimli İşbirlikli Telsiz Ağlar

Bu çalışmada Şekil 3.12'de gösterilmiş olan ve bir kaynak (S), bir hedef (D) ve  $L$  adet röleden ( $R_1, R_2, \dots, R_L$ ) meydana gelen NOMA işaretleşme modelinin kullanıldığı bir işbirlikli ağ incelenmektedir. Kaynak verisi doğrudan link ve  $L$  adet röle arasından seçilen en iyi röle üzerinden DF tekniği ile hedefe iletilmektedir. Kaynak-hedef, kaynak-röleler ve röleler-hedef arası kanallar Nakagami-m sönümlmelidir.  $1 \leq i \leq L$  seçilen en iyi rölenin indisini,  $h_{SD}, h_{SR_1}, h_{SR_2}, \dots, h_{SR_L}, h_{R_1D}, h_{R_2D}, \dots, h_{R_LD}$  ise sönümlleme katsayılarını göstermektedir.



Şekil 3.12. NOMA kullanan en iyi röle seçimli işbirlikli telsiz ağ yapısı

Linklerin ortalama güçleri  $\Omega_{ij} = E[|h_{ij}|^2]$  ( $i \in \{S, R\}, j \in \{R_1, R_2, \dots, R_L, D\}$ ) şeklinde tanımlanmakta olup  $E[.]$  ortalama değeri belirtmektedir. Ele alınan işbirlikli işaretleşme modeli Bölüm 3.3’de açıklanan modelin çok sayıda röle arasından en iyi rölenin seçildiği bir işbirlikli ağa uyarlanmış halidir. İki fazdan oluşan iletişim protokolünün ilk fazında kaynak dinlemedeki hedef ve rölelere  $\sqrt{a_1 E_s} s_1 + \sqrt{a_2 E_s} s_2$  sembolünü gönderir. Burada  $E_s$  toplam iletim gücünü,  $s_1$  ve  $s_2$  veri sembollerini,  $a_1$  ve  $a_2$  ( $a_1 + a_2 = 1$ ) iletim güç katsayılarını göstermekte olup  $E[|s_1|^2] = E[|s_2|^2] = 1$  alınmıştır. Bu durumda seçilen en iyi röle ve hedefte oluşan işaretler

$$y_{SR_i} = h_{SR_i} (\sqrt{a_1 E_s} s_1 + \sqrt{a_2 E_s} s_2) + z_{SR_i} \quad (3.22)$$

$$y_{SD} = h_{SD} (\sqrt{a_1 E_s} s_1 + \sqrt{a_2 E_s} s_2) + z_{SD} \quad (3.23)$$

biçiminde olur. Seçilen en iyi rölede ( $R_i$ ), SIC yöntemi kullanılarak  $s_2$  sembolü elde edilir ve bu sembol  $E_s$  gücü ile hedefe iletilir. Rölede sezim hatası yapılmadığı varsayılırsa ikinci fazda hedefte oluşacak işaret

$$y_{R_iD} = h_{R_iD}(\sqrt{E_s}s_2) + z_{R_iD} \quad (3.24)$$

ile belirlenir. Yukarıdaki eşitliklerde geçen  $z_{SR_i}$ ,  $z_{SD}$  ve  $z_{R_iD}$  terimleri gürültüyü belirtmekte olup bağımsız sıfır ortalamalı ve boyut başına varyansları  $N_0/2$  olan kompleks Gauss rastlantı değişkenleri olarak modellenirler. Bu durumda sistemdeki her bir kanalın ortalama SNR değeri  $\bar{\gamma}_\delta = \rho\sigma_\delta^2$  ( $\delta \in \{SD, SR_i, R_iD\}$ ) ifadesi ile belirlenir.

Burada  $\rho = \frac{E_s}{N_0}$  sistemin SNR değerini göstermektedir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. NOMA Kullanan İşbirlikli Telsiz Ağlarda Erişilebilir Hız Analizi

Şekil 3.10’da verilmiş olan tek röleli NOMA kullanan bir işbirlikli ağda, birinci faz iletimi sonucu veri sembolleri  $s_1$  ve  $s_2$  için rölede oluşan SNR ifadeleri sırasıyla

$$\lambda_{SR}^I = \frac{a_1 E_s |h_{SR}|^2}{a_2 E_s |h_{SR}|^2 + N_0} \quad (4.1)$$

$$\lambda_{SR} = \frac{a_2 E_s |h_{SR}|^2}{N_0} \quad (4.2)$$

şeklindedir (Kim ve Lee, 2015). Benzer şekilde  $s_1$  ve  $s_2$  veri sembolleri için hedefte oluşan SNR ifadeleri sırasıyla

$$\lambda_{SD} = \frac{a_1 E_s |h_{SD}|^2}{a_2 E_s |h_{SD}|^2 + N_0} \quad (4.3)$$

$$\lambda_{RD} = \frac{E_s |h_{RD}|^2}{N_0} \quad (4.4)$$

olarak yazılabilir (Kim ve Lee, 2015). Bu durumda  $s_1$  ve  $s_2$  veri sembolleri için erişilebilir hız ifadeleri sırasıyla

$$\begin{aligned} C_{s_1} &= \frac{1}{2} \min \left\{ \log_2 (1 + \lambda_{SD}), \log_2 (1 + \lambda_{SR}^I) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \log_2 (1 + \min \{ \gamma_{SD}, \gamma_{SR} \}) - \frac{1}{2} \log_2 (1 + \min \{ \gamma_{SD}, \gamma_{SR} \} a_2) \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} C_{s_2} &= \frac{1}{2} \min \left\{ \log_2 (1 + \lambda_{SR}), \log_2 (1 + \lambda_{RD}) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \log_2 (1 + \min \{ a_2 \gamma_{SR}, \gamma_{RD} \}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

olarak verilebilir (Kim ve Lee, 2015). Burada  $\gamma_\delta = \rho |h_\delta|^2$  ( $\delta \in \{SD, SR, RD\}$ ) ilgili terminalin anlık SNR değerini ve  $\rho = \frac{E_s}{N_0}$  sistemin SNR değerini göstermektedir. Bu durumda sistemin erişilebilir hızı  $C_N = C_{s_1} + C_{s_2}$  şeklinde olur. (4.5-4.6) ifadelerinden yola çıkılarak  $X = \min\{\gamma_{SD}, \gamma_{SR}\}$  ve  $Y = \min\{\gamma_{RD}, a_2 \gamma_{SR}\}$  rastlantı değişkenleri tanımlanırsa ortalama erişilebilir hız ifadeleri

$$\bar{C}_{s_1} = \int_0^\infty \frac{1}{2} \{\log_2(1+x) - \log_2(1+xa_2)\} f_X(x) dx \quad (4.7)$$

$$\bar{C}_{s_2} = \int_0^\infty \frac{1}{2} \{\log_2(1+y)\} f_Y(y) dy \quad (4.8)$$

şeklinde olur (Kim ve Lee, 2015). Burada  $f_X(x)$  ve  $f_Y(y)$ , sırasıyla X ve Y rastlantı değişkenlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarıdır (Kim ve Lee, 2015).

Öte yandan Şekil 3.11’de verilen NOMA tekniğinin kullanılmadığı DF tabanlı klasik işbirlikli iletişim modelinde sistem kapasitesinin

$$C_K = \frac{1}{2} \min \left\{ \log_2(1 + \rho |h_{SR}|^2), \log_2 \left[ 1 + \rho (|h_{SD}|^2 + |h_{RD}|^2) \right] \right\} \quad (4.9)$$

formülü ile belirlendiği (Laneman ve ark., 2004)’te gösterilmiştir.

#### 4.2. NOMA Kullanan İşbirlikli Telsiz Ağlar İçin Simülasyon Sonuçları

Bu alt-bölümde Şekil 3.10’da verilen NOMA tabanlı işbirlikli iletişim modelinin Rayleigh ve Rician sönümlemesi durumlarında kapasitesini veren simülasyon sonuçları sunulmuştur.  $S \rightarrow R$ ,  $S \rightarrow D$  ve  $R \rightarrow D$  linklerin ortalama güçleri sırasıyla  $\Omega_{SR} = E[|h_{SR}|^2]$ ,  $\Omega_{SD} = E[|h_{SD}|^2]$  ve  $\Omega_{RD} = E[|h_{RD}|^2]$  ile gösterilmiştir. Verilen nümerik sonuçlar, her bir link için  $10^5$  adet rastlantı değişkeni üretilerek bulunmuşlardır.

#### 4.2.1. Rayleigh sönümlemeli kanallar için matematiksel analizler ve simülasyon sonuçları

Şekil 3.10’da görülen NOMA kullanılan sistem modeli Rayleigh sönümlemeli kanallar için ilk olarak (Kim ve Lee, 2015) ile verilen çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmada  $X = \min\{|h_{SD}|^2, |h_{SR}|^2\}$  ve  $Y = \min\{\gamma_{RD}, a_2\gamma_{SR}\}$  rastlantı değişkenleri tanımlanarak Rayleigh sönümlemeli kanallar için ortalama erişilebilir hız ifadesi

$$\begin{aligned}\bar{C}_N &= \int_0^\infty \frac{1}{2} \{\log_2(1+x\rho) - \log_2(1+x\rho a_2)\} f_X(x) dx + \int_0^\infty \frac{1}{2} \{\log_2(1+y)\} f_Y(y) dy \\ &= -\frac{\log_2 e}{2} \left\{ \exp\left[\frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}}\right)\right] \text{Ei}\left[-\frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}}\right)\right] \right. \\ &\quad - \exp\left[\frac{1}{\rho a_2}\left(\frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}}\right)\right] \text{Ei}\left[-\frac{1}{\rho a_2}\left(\frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}}\right)\right] \\ &\quad \left. + \exp\left[\left(\frac{1}{\rho a_2 \Omega_{SR}} + \frac{1}{\rho \Omega_{RD}}\right)\right] \text{Ei}\left[-\left(\frac{1}{\rho a_2 \Omega_{SR}} + \frac{1}{\rho \Omega_{RD}}\right)\right] \right\}\end{aligned}\quad (4.10)$$

olarak türetilmiştir. Burada  $\text{Ei}(\cdot)$  üstel integral fonksiyonu olarak verilmiştir (Kim ve Lee, 2015; Gradshteyn ve Ryzhik, 2007).  $f_X(x)$  ve  $f_Y(y)$  ise sırasıyla  $X$  ve  $Y$  rastlantı değişkenlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonları olup

$$f_X(x) = \left(\frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}}\right) \exp\left[-x\left(\frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}}\right)\right] \quad (4.11)$$

$$f_Y(y) = \left(\frac{1}{\Omega_{RD}\rho} + \frac{1}{\Omega_{SR}\rho a_2}\right) \exp\left[-y\left(\frac{1}{\Omega_{RD}\rho} + \frac{1}{\Omega_{SR}\rho a_2}\right)\right] \quad (4.12)$$

şeklindedir (Kim ve Lee, 2015).

(4.9) ifadesinden kapasite ifadesinden yola çıkılarak Şekil 3.11’de verilen klasik işbirlikli iletişim sisteminin ortalama erişilebilir hızı

$$\bar{C}_K = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \log_2(1+z) f_Z(z) dz \quad (4.13)$$

integrali ile türetilebilir (Kim ve Lee, 2015). Burada  $Z = \min\{|h_{SR}|^2 \rho, |h_{SD}|^2 \rho + |h_{RD}|^2 \rho\}$  olarak tanımlı rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f_Z(z) = \left( \frac{\Omega_{SD}}{\Omega_{SD} - \Omega_{RD}} \right) \left( \frac{1}{\Omega_{SD}\rho} + \frac{1}{\Omega_{SR}\rho} \right) \exp \left[ -z \left( \frac{1}{\Omega_{SD}\rho} + \frac{1}{\Omega_{SR}\rho} \right) \right] + \left( \frac{\Omega_{RD}}{\Omega_{RD} - \Omega_{SD}} \right) \left( \frac{1}{\Omega_{RD}\rho} + \frac{1}{\Omega_{SR}\rho} \right) \exp \left[ -z \left( \frac{1}{\Omega_{RD}\rho} + \frac{1}{\Omega_{SR}\rho} \right) \right] \quad (4.14)$$

şeklinde (Kim ve Lee, 2015). (4.13) integrali

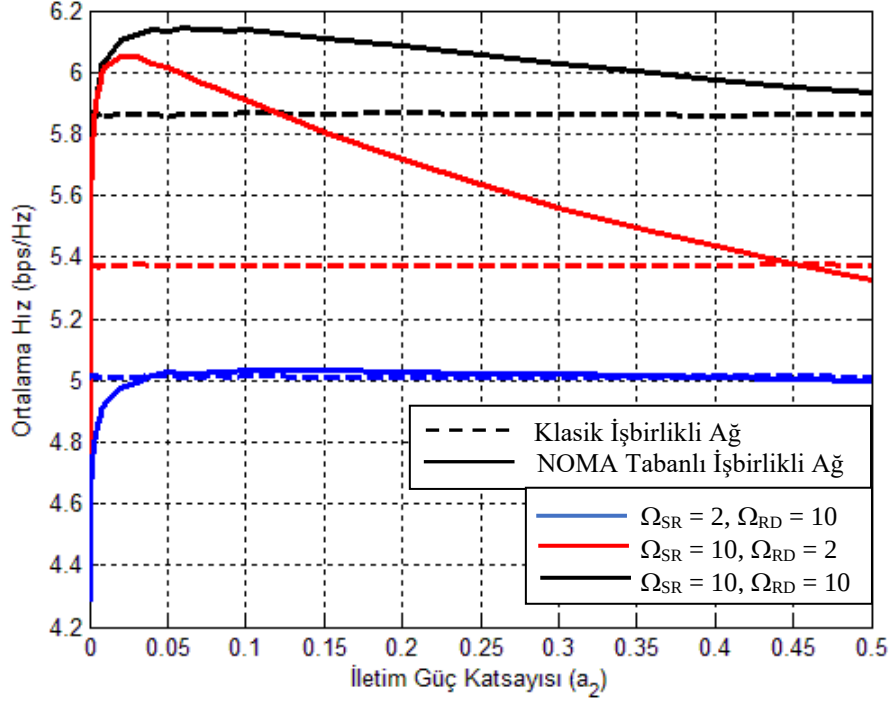
$$\bar{C}_K = -\frac{\log_2 e}{2} \left\{ \frac{\Omega_{SD}}{\Omega_{SD} - \Omega_{RD}} \exp \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}} \right) \right] \text{Ei} \left[ -\frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{\Omega_{SD}} + \frac{1}{\Omega_{SR}} \right) \right] + \frac{\Omega_{RD}}{\Omega_{RD} - \Omega_{SD}} \exp \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{\Omega_{SR}} + \frac{1}{\Omega_{RD}} \right) \right] \text{Ei} \left[ -\frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{\Omega_{SR}} + \frac{1}{\Omega_{RD}} \right) \right] \right\} \quad (4.15)$$

olarak belirlenebilir (Kim ve Lee, 2015).

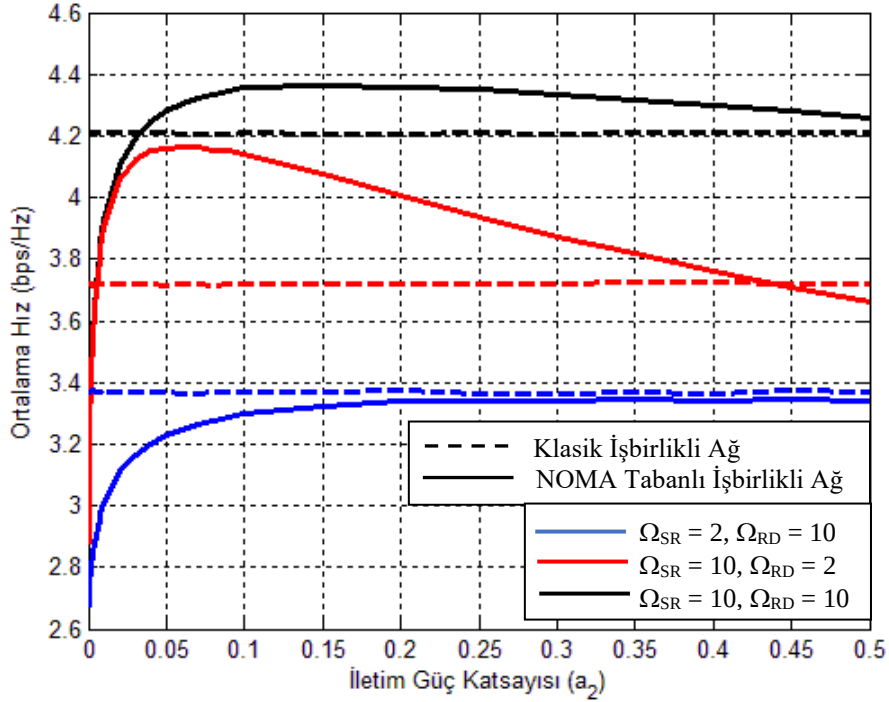
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de NOMA tabanlı ve klasik işbirlikli iletişim modellerinin Rayleigh sönümlemeli kanallarda  $\Omega_{SD} = 1$  alınması durumunda  $a_2$  güç kazancına göre ortalama toplam hız eğrileri verilmiştir (Kim ve Lee, 2015). Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 elde edilirken sistem SNR değerleri sırasıyla  $\rho = 30$  dB ve  $\rho = 20$  dB olarak alınmıştır (Kim ve Lee, 2015). Bu şekiller ortalama toplam hızı maksimum yapan  $a_2$  değerlerinin mevcut olduğunu göstermektedir (Kim ve Lee, 2015). Ayrıca sistem SNR değeri  $\rho$  arttıkça ortalama hız da artmaktadır (Kim ve Lee, 2015).

Şekil 4.3’te NOMA tabanlı ve klasik işbirlikli iletişim modelinin Rayleigh sönümlemeli kanallarda  $a_1 = 0.9$ ,  $a_2 = 0.1$  ve  $\Omega_{SD} = 1$  durumunda sistem SNR değerine göre (Kim ve Lee, 2015)’te sunulan ortalama toplam hız eğrileri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi yüksek SNR bölgesinde özellikle  $\Omega_{SR} \geq \Omega_{RD}$  iken NOMA kullanan işbirlikli sistem klasik sisteme göre daha iyi performans sağlamaktadır (Kim ve Lee,

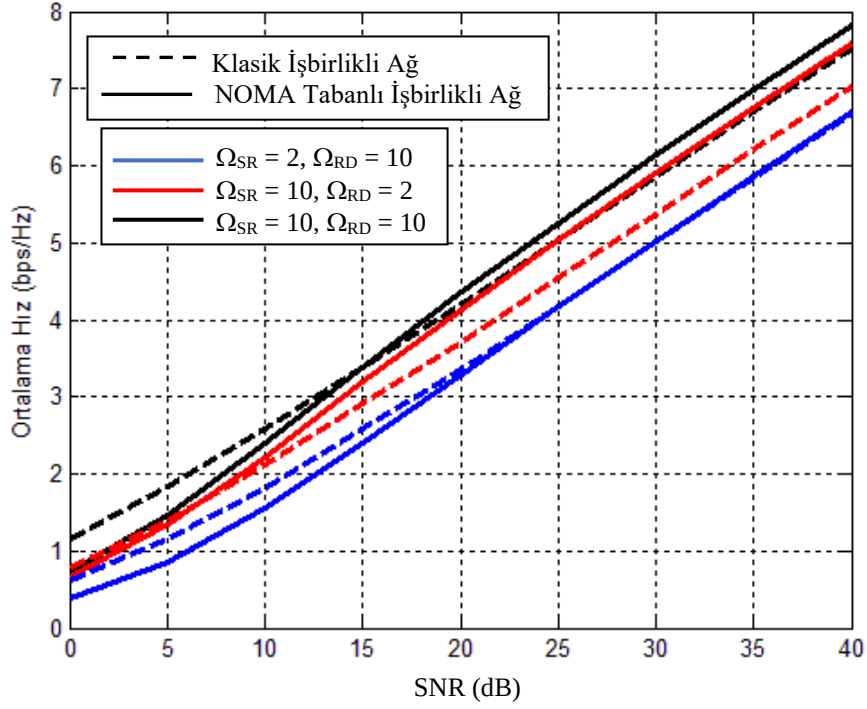
2015). Düşük SNR bölgesinde ise NOMA tabanlı işbirlikli sistem klasik sisteme göre daha kötü performans vermektedir (Kim ve Lee, 2015).



Şekil 4.1. NOMA tabanlı ve klasik işbirlikli iletişim modellerinin  $\rho = 30$  dB ve  $\Omega_{SD} = 1$  durumunda iletim güç katsayısına göre ortalama toplam hızları (Kim ve Lee, 2015)



Şekil 4.2. NOMA tabanlı ve klasik işbirlikli iletişim modellerinin  $\rho = 20$  dB ve  $\Omega_{SD} = 1$  durumunda iletim güç katsayısına göre ortalama toplam hızları (Kim ve Lee, 2015)

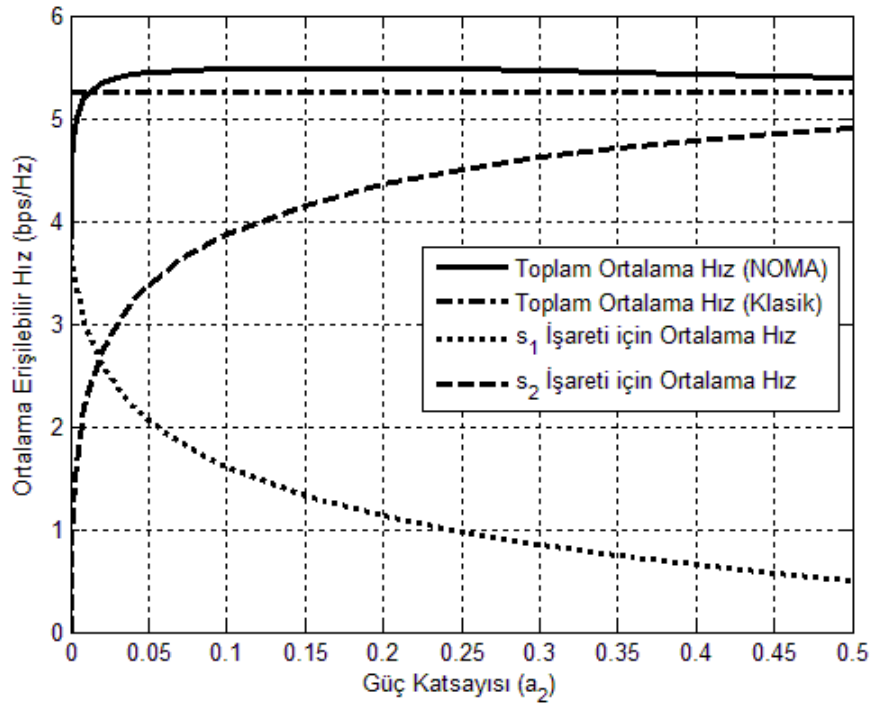


Şekil 4.3. NOMA tabanlı ve klasik işbirlikli iletişim modellerinin  $a_2 = 0.1$  ve  $\Omega_{SD} = 1$  durumunda sistem SNR değerine göre ortalama toplam hızları (Kim ve Lee, 2015)

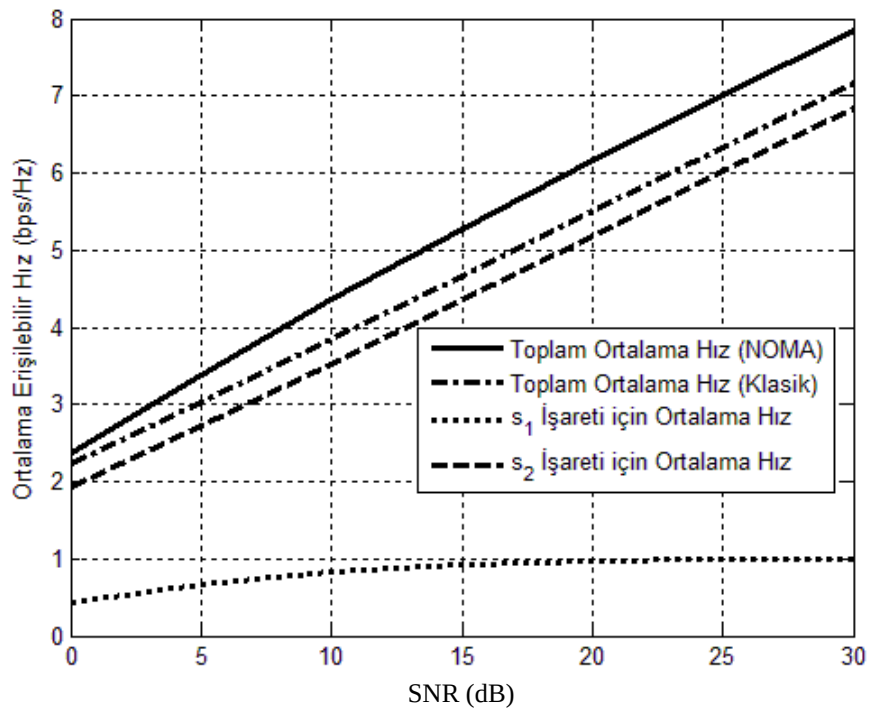
#### 4.2.2. Rician sönümlmeli kanallar için simülasyon sonuçları

Şekil 3.10’da görülen NOMA tabanlı işbirlikli iletişim sistem modelini Rician sönümlmeli kanallarda inceleyen çalışmalar literatürde bulunmaktadır (Jha ve Kumar, 2018; Jha ve Shree, 2018). (Jiao ve ark., 2017)’de bu sistem modelinin Rician sönümlmeli kanallarda matematiksel performans analizleri gerçekleştirilmiş ve ayrıca nümerik sonuçlar da sunulmuştur.

Şekil 4.4’te sistem parametreleri  $\Omega_{SR} = 25$ ,  $\Omega_{RD} = 18$ ,  $\Omega_{SD} = 3$ ,  $K_{SR} = 6$ ,  $K_{RD} = 6$ ,  $K_{SD} = 2$  ve  $\rho = 20$  dB alınarak  $a_2$  güç katsayısına bağlı olarak elde edilmiş ortalama erişilebilir hız simülasyon eğrileri verilmiştir. Şekil 4.5’de ise sistem parametreleri  $\Omega_{SR} = 100$ ,  $\Omega_{RD} = 24$ ,  $\Omega_{SD} = 2$ ,  $K_{SR} = 4$ ,  $K_{RD} = 4$ ,  $K_{SD} = 2$  ve  $a_2 = 0.25$  olarak seçilerek sistem SNR değerine göre kapasite simülasyon eğrileri sunulmuştur. Görüldüğü gibi NOMA kullanan işbirlikli ağ klasik yapıya göre daha iyi performans sağlamaktadır (Jiao ve ark., 2017).



Şekil 4.4. NOMA tabanlı ve klasik işbirlikli iletişim modellerinin Rician sönümlmeli kanallarda iletim güç katsayısına göre ortalama hız karşılaştırmaları (Jiao ve ark., 2017)



Şekil 4.5. NOMA tabanlı ve klasik işbirlikli iletişim modellerinin Rician sönümlmeli kanallarda sistem SNR değerine göre ortalama hız karşılaştırmaları (Jiao ve ark., 2017)

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

İşbirlikli çeşitleme, verici ve alıcı terminallerde fiziksel anten dizileri kullanılarak elde edilen geleneksel anten çeşitlemesine alternatif olarak ortaya atılmış bir tekniktir. İşbirlikli çeşitleme tekniğinde telsiz ağda yer alan terminaller kendi aralarında kaynak paylaşımı yaparak sanal anten dizileri meydana getirirler ve böylelikle anten çeşitleme kazancı sağlanır. Literatürdeki araştırmalar, yeni nesil telsiz iletişim sistemlerinin gerektirdiği servis kalitesine ulaşmada işbirlikli telsiz iletim yöntemlerinin önemli katkılar sağlayacağını ortaya koymaktadırlar (Sendonaris ve ark., 2003; Laneman ve ark., 2004).

Bir işbirlikli ağın tasarımında belirleyici olan en önemli parametrelerden birisi terminaller arası veri iletiminde kullanılan işaret aktarma yaklaşımıdır. AF ile DF teknikleri önde gelen işbirlikli aktarma yaklaşımları arasında yer alırlar (Georgy ve Sergey, 2012). AF tabanlı işbirlikli ağlarda röle terminalleri aldıkları işaretleri kuvvetlendirerek tekrar iletirlerken, DF tekniğinde röleler işareti çözdükten sonra hedefe iletim gerçekleştirirler. AF yönteminin olumsuz tarafı gürültünün de kuvvetlendirilerek iletilmesidir. DF yaklaşımının dezavantajı ise röle terminallerinde yapılan algılama hataları sonucu ortaya çıkan performans düşüşleridir. Bu tez çalışmasında DF tekniğinin kullanıldığı işbirlikli telsiz ağlara odaklanılmıştır.

İşbirlikli telsiz ağların performanslarını belirleyen bir başka önemli faktör sistemdeki röle sayısı ve röle seçim teknikleridir. Aktarma için sistemdeki tüm röleler yerine belirli bir performans ölçütünü en iyi yapan rölelerin seçilip aktif yapılması prensibine dayanan röle seçim tekniklerinin işbirlikli ağlarda servis kalitesini artırdığını, karmaşıklığı azalttığını ve düşük batarya tüketimine imkân sağladığını gösteren literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan (Aggelos ve ark., 2006)'da sistemin anlık uçtan uca telsiz kanal koşullarını göz önüne alarak bir grup röle arasından en iyisinin seçilip kaynak-hedef arası iletimde kullanıldığı bir röle seçim algoritması önerilmiş ve bu algoritmanın performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak-hedef arası iletim için bir grup röle terminali arasından en iyisini seçildiği bir başka çalışma olan (Elzbieta ve Raviraj, 2008)'de bir miktar geri besleme gerektiren basit bir röle seçim yaklaşımı önerilerek bu yaklaşımın kesinti olasılığı analiz edilmiştir.

(Dharmendra ve Sahu, 2012)'de AF protokolü kullanan röle seçimli bir işbirlikli ağın dördün genlik modülasyonu (QAM) işaret kümeleri durumunda Rayleigh sönümlemeli kanallar için ortalama sembol hata olasılığı (SER) ifadeleri türetilmiştir. İki kullanıcının karşılıklı veri iletimi yaptığı AF tabanlı iki yönlü röle seçimli bir işbirlikli sistem (Lingyang, 2011)'de ele alınmış ve optimum güç tahsisi gerçekleştirilmiştir.

Güç seviyesi tahsisi yapılarak kanal kaynaklarının kullanıcılar arasında paylaşılması prensibine dayanan NOMA, 5G ve ötesi telsiz iletişim sistemlerinin (Li ve ark., 2014) gerektirdiği performans kriterlerini sağlamada kayda değer katkılar sağlamaktadır (Dai ve ark., 2015; Shin ve ark., 2017; Liu ve ark., 2017; Ding ve ark., 2015). Kanal şartları iyi olan kullanıcılara düşük, kanal şartları daha kötü olan kullanıcılara ise yüksek güç tahsisinin yapıldığı NOMA tekniğinde alıcıda SIC tekniğinden yararlanılır. Güç düzleminden faydalanan NOMA tekniği ile uzay düzleminde çalışan işbirlikli iletişim yaklaşımının bir arada kullanımının birçok durumda önemli spektral verimlilik kazançları vereceğini gösteren literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Kim ve Lee, 2015; Jiao ve ark., 2017; Panic ve Jayakody, 2019; Kumar ve ark., 2019; Soni ve ark., 2020). Bunlardan (Kim ve Lee, 2015)'te bir kaynak, bir röle ve bir hedeften oluşan üç terminalli bir işbirlikli telsiz ağı NOMA tekniği uygulanarak Rayleigh sönümlemeli kanallarda sistemin kapasite ve optimum güç tahsisi analizleri gerçekleştirilmiştir. (Kim ve Lee, 2015)'te verilen sistem modelinin aynısı (Jiao ve ark., 2017)'de Rician sönümlemeli kanallarda ele alınmıştır. (Kim ve Lee, 2015)'teki NOMA tabanlı işbirlikli iletişim modelini Rayleigh ve Rician sönümlemesi dışında farklı kanal yapılarında ele alan literatürde başka çalışmalar da mevcuttur (Panic ve Jayakody, 2019; Kumar ve ark., 2019; Soni ve ark., 2020).

NOMA tabanlı işbirlikli telsiz ağlarda röle seçim tekniklerinin performanslarının incelenmesi 5G ve ötesi sistemlere ilişkin bir başka önemli araştırma alanını teşkil etmektedir (Yang ve ark., 2020). Bu konuda yapılan çalışmalardan (Ding ve ark., 2016) ve (Ju ve ark., 2019)'da bir baz istasyonu, iki kullanıcı ve çok sayıda röleden meydana gelen ve NOMA tekniğinin kullanıldığı bir telsiz ağda röle seçim kriterleri sunulmuş ve kesinti olasılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. (Ronglan ve ark., 2020)'de iki atlamalı NOMA tabanlı işbirlikli telsiz ağda bir kaynak ve bir hedef arasındaki iletişimde en iyi röle seçimi problemi ele alınarak toplam hız ve kesinti olasılığı ifadeleri sunulmuştur. (Guoxin ve ark., 2020)'de bir kaynak ve birisi yakın diğeri uzak iki kullanıcı içeren bir NOMA kullanan işbirlikli iletişim sistem modeli incelenerek uyarlamalı röle seçim stratejileri sunulmuştur. Bir kaynak ile bir hedef arasındaki iletişimde anlık erişilebilir

hızı maksimum yapan en iyi rölenin seçimine dayalı NOMA kullanan çöz ve aktar tabanlı işbirlikli ağların incelendiği çalışmalara örnek olarak (Kim ve ark., 2016) ve (Özdemir, 2020) verilebilir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında Nakagami-m sönümlemesi durumunda NOMA kullanan en iyi röle seçimli işbirlikli iletişim ağlarının kapasitesi araştırılmıştır. Bölüm 5.1.1.'de bir adet röle durumunda sistem performansı incelenmiştir. Bölüm 5.1.2.'de en iyi röle seçim kriteri ve kapasite analizi açıklanmıştır. Bölüm 5.1.3'te simülasyon sonuçları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar Bölüm-5.2'de tartışılmıştır.

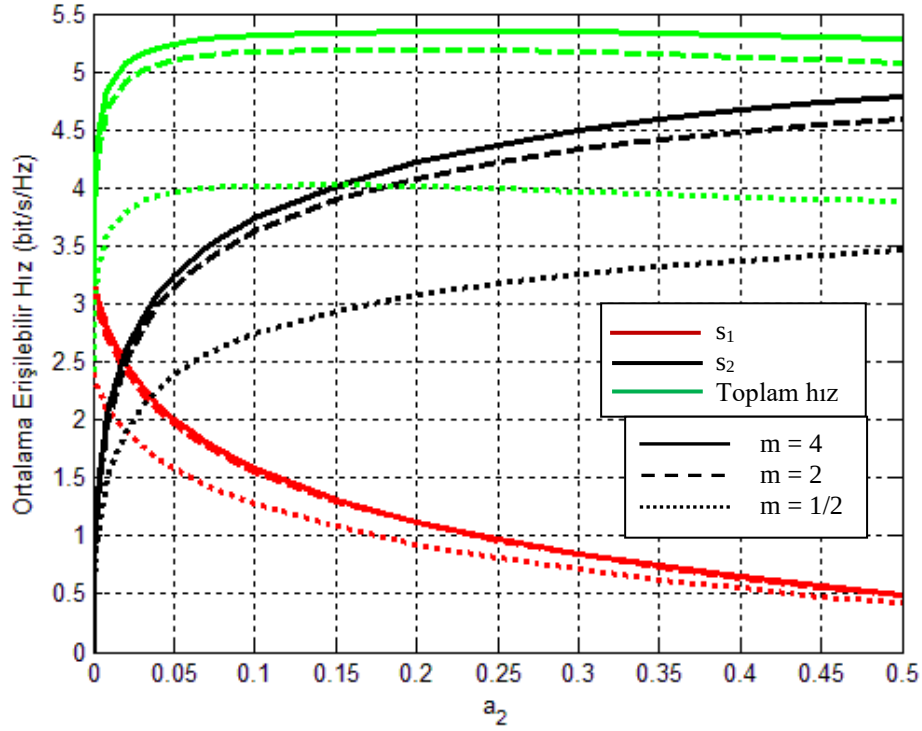
### 5.1.1. Bir adet röle durumunda simülasyon sonuçları

Literatürde NOMA kullanan işbirlik ağların Nakagami-m sönümlemeli kanallardaki performanslarını inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Kara ve Kaya, 2018; Kara ve Kaya 2020). Bu bölümde sistemde Şekil 3.10'da sunulmuş olan ve bir adet röle içeren NOMA tabanlı işbirlikli iletişim modelinin (Kim ve Lee, 2015) Nakagami-m sönümlemesi durumunda kapasitesini veren simülasyon sonuçları sunulmuştur. Şekil 5.1'de güç katsayısı  $a_2$ 'nin değişik değerlerinde toplam hız eğrileri ile  $s_1$  ve  $s_2$  sembollerinin erişilebilir hız eğrileri görülmektedir. Bu eğriler elde edilirken sistemin linklerin ortalama güçleri  $\Omega_{SD} = 1$ ,  $\Omega_{SR} = 20$  ve  $\Omega_{RD} = 15$ ; sistemin SNR değeri  $\rho = 20$  dB; sönümleme parametresi ise  $m = 1/2, 2$  ve  $4$  olarak alınmıştır. Eğrilerden görüldüğü gibi  $m$  değeri arttıkça toplam kapasite artmaktadır.

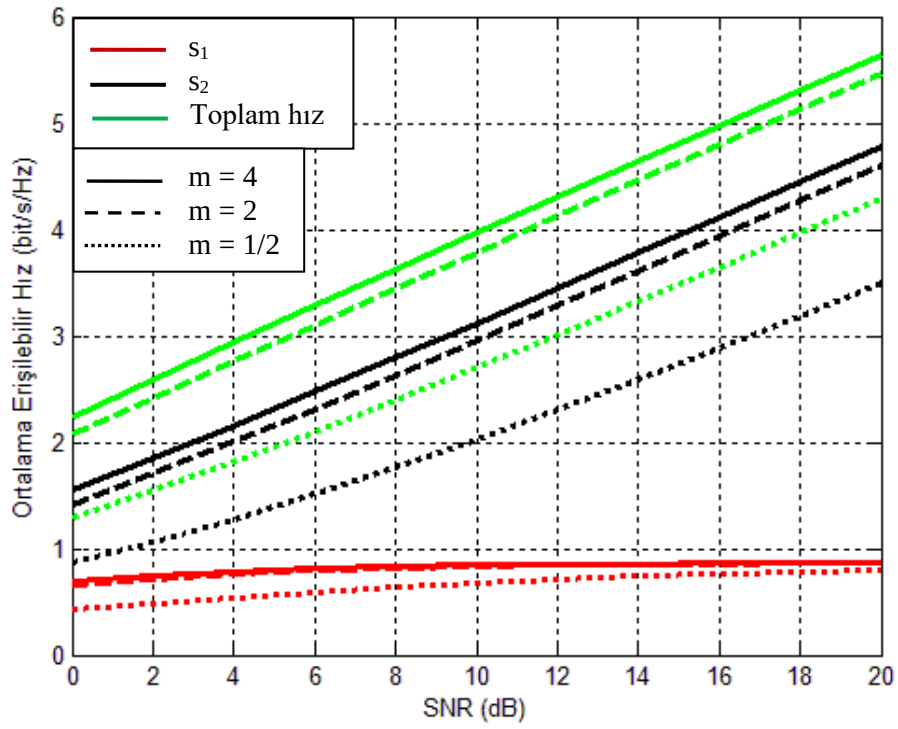
Şekil 5.2'de verilen performans eğrileri  $a_2 = 0.3$  alınarak elde edilmiş olup sistemin SNR değerine ( $\rho$ ) göre NOMA kullanan işbirlikli iletişim sisteminin Nakagami-m sönümlemeli kanallarda erişilebilir ortalama hızını göstermektedir. Bu eğriler elde edilirken sistemdeki linklerin ortalama güçleri  $\Omega_{SD} = 9$ ,  $\Omega_{SR} = 30$  ve  $\Omega_{RD} = 20$  olarak alınmıştır. Görüldüğü gibi SNR değerindeki artış  $s_1$  sembolünün erişilebilir ortalama hızında çok fazla bir değişim meydana getirmezken,  $s_2$  sembolünün erişilebilir ortalama hızı doğrusal olarak artmaktadır.  $m$  sönümleme parametresindeki artış ise  $s_2$  sembolünün erişilebilir ortalama hızını ve dolayısıyla toplam hızı artırmaktadır.

Şekil 5.3'te verilen performans eğrileri  $a_2 = 0.2$ ,  $\Omega_{SD} = 1$ ,  $\Omega_{SR} = 12$  ve  $\Omega_{RD} = 2$  alınarak elde edilmiş olup sistemin SNR değerine ( $\rho$ ) göre NOMA kullanan işbirlikli iletişim sistemi ile klasik işbirlikli iletişim sisteminin Nakagami-m sönümlemeli

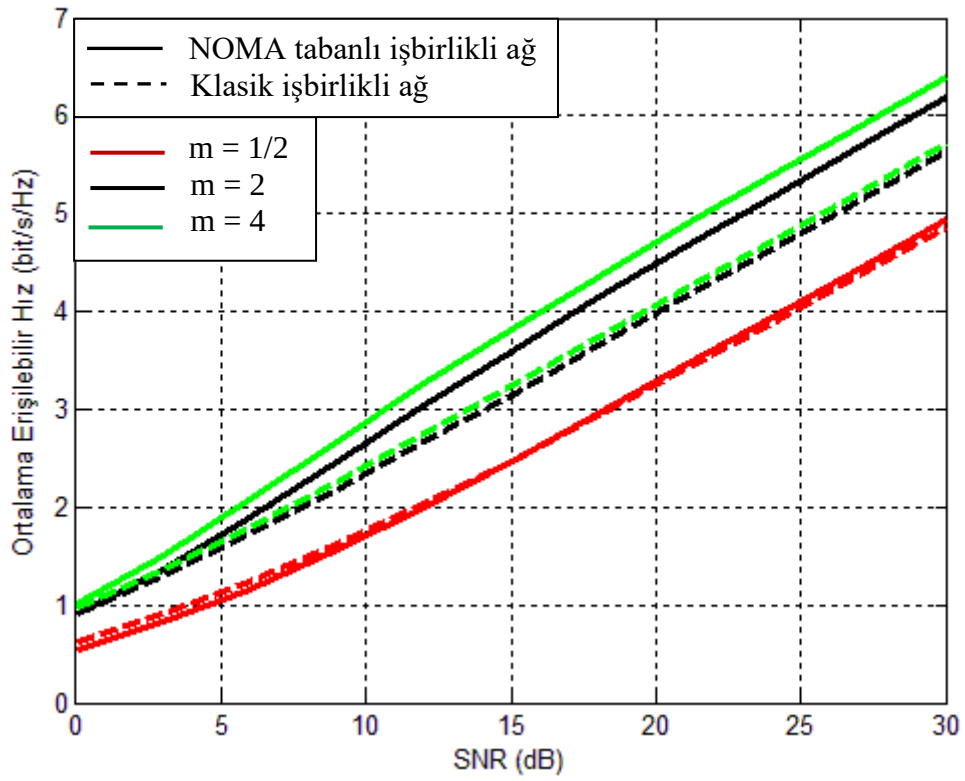
kanallardaki toplam erişilebilir ortalama hız karşılaştırmalarını göstermektedir.  $m = 1/2$  için klasik ve NOMA tabanlı işbirlikli ağlar yaklaşık aynı toplam hızı vermekteyken,  $m = 2$  ve  $m = 4$  durumlarında NOMA tabanlı işbirlikli ağın klasik sisteme göre daha iyi performans sunduğu görülmektedir.



**Şekil 5.1.** NOMA tabanlı işbirlikli iletişim sisteminin Nakagami- $m$  sönümlmeli kanallardaki ortalama erişilebilir hızı



Şekil 5.2. NOMA tabanlı işbirlikli iletişim sisteminin Nakagami- $m$  sönümlmeli kanallarda iletim SNR değerine göre ortalama erişilebilir hızı



Şekil 5.3. Klasik işbirlikli ağ ile NOMA tabanlı işbirlikli ağın performans karşılaştırması

### 5.1.2. Rôle seçim kriteri

Bölüm 3.4.'de verilen sistem modelinde kapasiteyi en yüksek yapan rôle seçilerek iletimde kullanılmaktadır. Bu durumda sistem kapasitesi

$$C = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq L} C_{s_1}^i + C_{s_2}^i \quad (5.1)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada C sistemin toplam anlık erişilebilir hızını, i seçilen rölenin indisini,  $C_{s_1}^i$  ve  $C_{s_2}^i$  ise sırasıyla  $s_1$  ve  $s_2$  sembollerinin erişilebilir hızlarını göstermektedir. (4.5) ve (4.6) eşitliklerinden faydalanarak bu hızlar

$$\begin{aligned} C_{s_1}^i &= \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \min \{ \lambda_{SD}, \lambda_{SR_i} \} \rho \right) - \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \min \{ \lambda_{SD}, \lambda_{SR_i} \} \rho a_2 \right) \\ C_{s_2}^i &= \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \min \{ \lambda_{SR_i} \rho a_2, \lambda_{R_iD} \rho \} \right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

biçiminde elde edilebilirler (Kim ve ark., 2016). (5.2)'te geçen ifadelerde  $\lambda_{SD} = |h_{SD}|^2$ ,  $\lambda_{SR_i} = |h_{SR_i}|^2$  ve  $\lambda_{R_iD} = |h_{R_iD}|^2$  olarak tanımlıdır.

NOMA tekniğinin kullanılmadığı klasik en iyi rôle seçimli işbirlikli yapının anlık erişilebilir hız ifadesi (Kim ve ark., 2016)

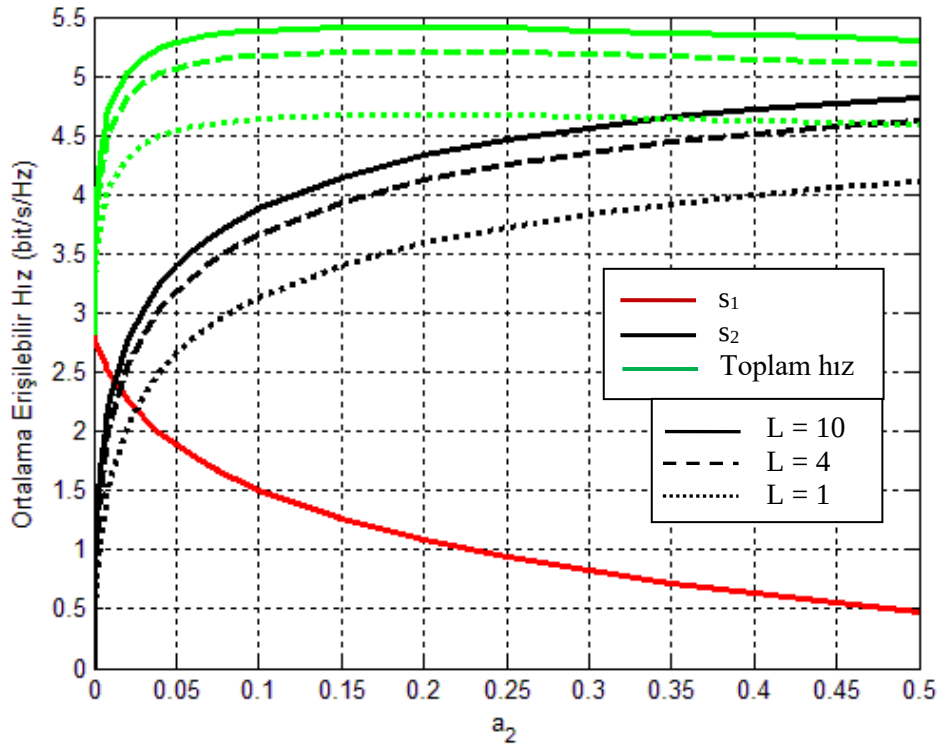
$$C_G^i = \frac{1}{2} \min \left\{ \log_2 \left( 1 + \rho \lambda_{SR_i} \right), \log_2 \left( 1 + \rho \lambda_{SD} + \rho \lambda_{R_iD} \right) \right\} \quad (5.3)$$

biçiminde türetilir (Aggelos ve ark., 2006; Sendenaris ve ark., 2003).

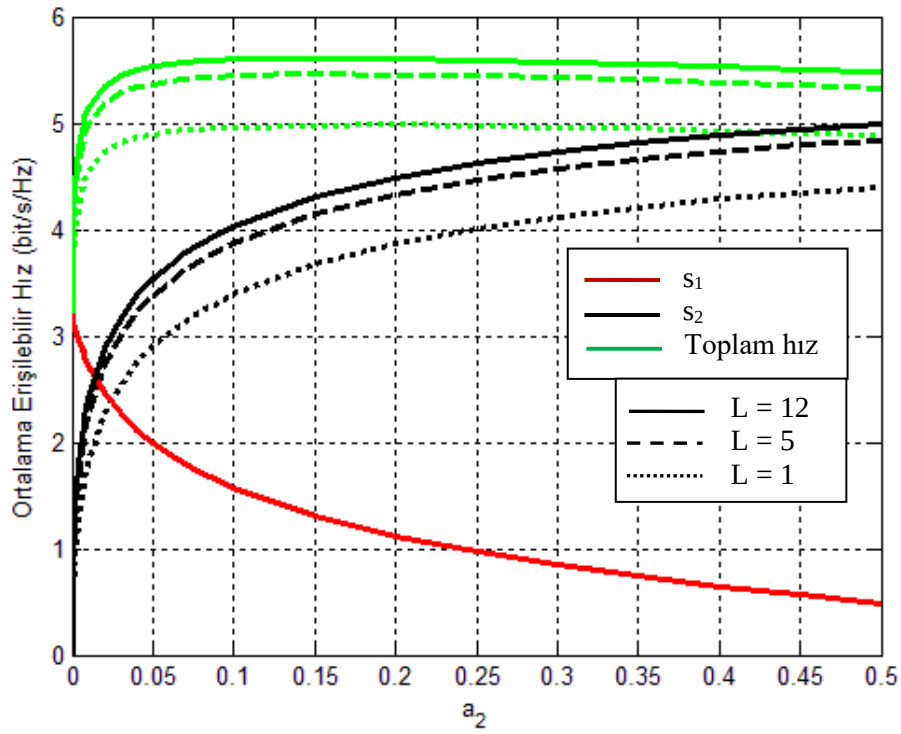
### 5.1.3. Simülasyon sonuçları

Bu bölümde Şekil 3.12'de görülen NOMA tabanlı en iyi rôle seçimli işbirlikli iletişim modelinin (Kim ve ark., 2016) Nakagami-m sönümlemesi durumunda kapasitesini veren simülasyon sonuçları verilmiştir. Sunulan performans eğrileri, m sönümleme parametresinin ve toplam rôle sayısının değişik değerlerinde her bir link için  $10^5$  adet Nakagami-m dağılımlı rastlantı değişkeni üretilerek elde edilmişlerdir.

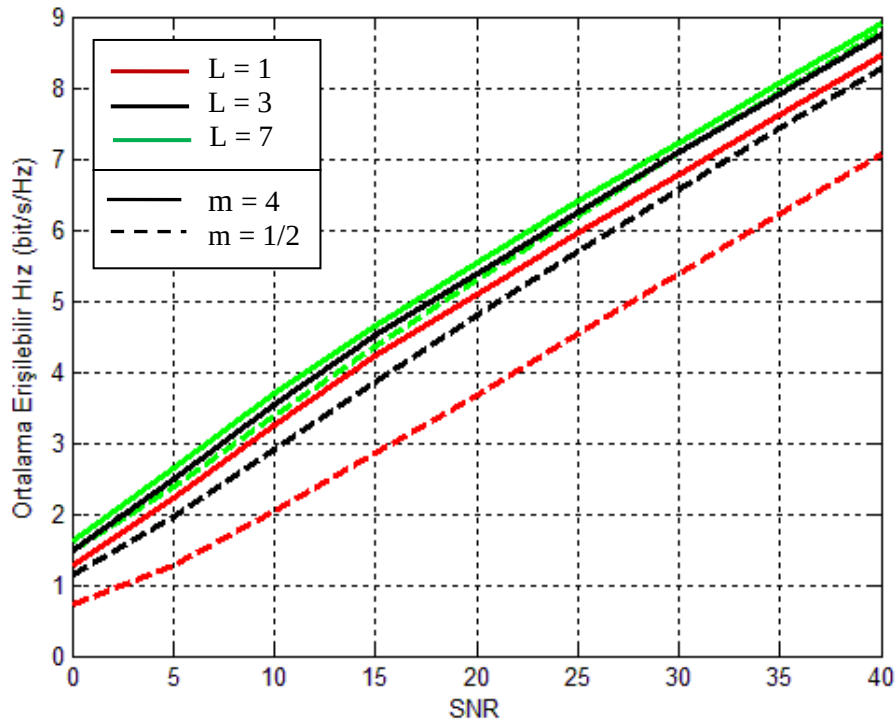
Şekil 5.4'te sönümleme parametresinin  $m = 2$ , linklerin ortalama güçlerinin  $\Omega_{SD} = 1$ ,  $\Omega_{SR} = 16$  ve  $\Omega_{RD} = 12$ , toplam röle sayısının  $L = 1, 4, 10$  ve sistem SNR değerinin  $\rho = 18$  dB alınması durumunda sistemin ortalama erişilebilir hızının  $a_2$  güç katsayısına göre değişimi verilmiştir. Bu simülasyon eğrilerinden görüldüğü gibi  $a_2$  güç katsayısının artışı ile  $s_1$  sembolü için ortalama erişilebilir hız beklendiği gibi azalırken,  $s_2$  sembolü için artmakta ve dolayısıyla toplam hızda artış görülmektedir. Eğrilerde toplam hızın maksimum olduğu  $a_2$  değeri sistem için optimum güç tahsisi noktasını göstermektedir. Toplam röle sayısı arttıkça  $s_2$  sembolünün ortalama erişilebilir hızı ve toplam hız artarken,  $s_1$  sembolü için ortalama erişilebilir hız röle sayısı ile değişmemektedir. Benzer sonuçlar sönümleme parametresinin  $m = 3$ , linklerin ortalama güçlerinin  $\Omega_{SD} = 1$ ,  $\Omega_{SR} = 13$  ve  $\Omega_{RD} = 9$ , toplam röle sayısının  $L = 1, 5, 12$  ve sistem SNR değerinin  $\rho = 20$  dB alındığı Şekil 5.5'teki eğrilerde de görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 karşılaştırıldığında sönümleme parametresinin değeri arttıkça  $s_1$  ve  $s_2$  sembolleri için ortalama erişilebilir hız ile toplam hızın arttıkları gözlemlenmektedir.



Şekil 5.4. NOMA kullanan röle seçimli işbirlikli iletişim sisteminin Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki ortalama erişilebilir hızı ( $m = 2$ ,  $\rho = 18$  dB,  $\Omega_{SD} = 1$ ,  $\Omega_{SR} = 16$  ve  $\Omega_{RD} = 12$ )

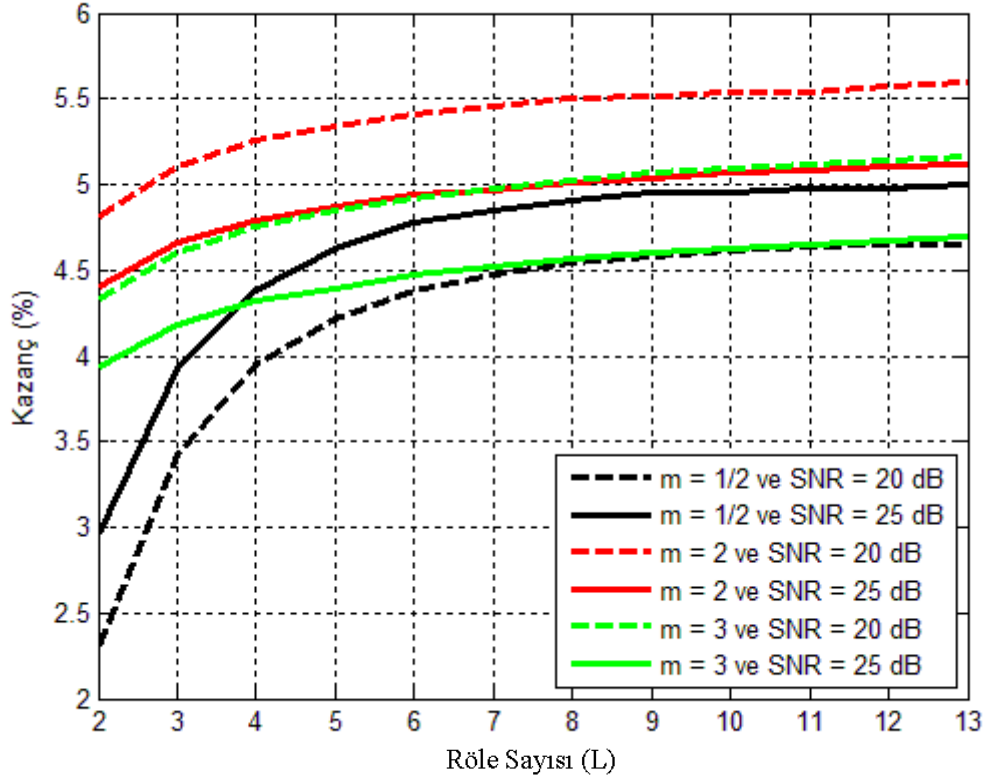


Şekil 5.5. NOMA tabanlı röle seçimli işbirlikli iletişim sisteminin Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki ortalama erişilebilir hızı ( $m = 3$ ,  $\rho = 20$  dB,  $\Omega_{SD} = 1$ ,  $\Omega_{SR} = 13$  ve  $\Omega_{RD} = 9$ )



Şekil 5.6. NOMA tabanlı röle seçimli işbirlikli iletişim sisteminin Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki toplam ortalama erişilebilir hızı ( $a_2 = 0.2$ ,  $\Omega_{SD} = 1.1$ ,  $\Omega_{SR} = 15$  ve  $\Omega_{RD} = 6$ )

Şekil 5.6’da sönümlleme parametresi  $m = 1/2$  ve 4, linklerin ortalama güçleri  $\Omega_{SD} = 1.1$ ,  $\Omega_{SR} = 15$  ve  $\Omega_{RD} = 6$ , toplam röle sayısı  $L = 1, 3, 7$  ve  $a_2 = 0.2$  alınması durumunda sistemin ortalama erişilebilir hızının sistemin SNR değerine göre değişimi verilmiştir. Bu simülasyon eğrilerinden görüldüğü gibi sistemin SNR değerinin artışı ile toplam ortalama erişilebilir hız beklendiği gibi artmaktadır. Toplam röle sayısındaki artış da sönümlleme parametresinin artması da sistem performansını iyileştirmektedir.



Şekil 5.7. NOMA tabanlı en iyi röle seçimine dayanan işbirlikli sistem ile klasik işbirlikli en iyi röle seçimine dayanan sistemin performanslarının karşılaştırması

Şekil 5.7’de  $(\bar{C} - \bar{C}_G) / \bar{C}_G$  formülüyle elde edilmiş ortalama hız kazancı eğrileri verilmiştir (Kim ve ark., 2016). Burada  $\bar{C}$ , NOMA kullanılan işbirlikli yapının,  $\bar{C}_G$  ise geleneksel sistemin ortalama hızını göstermektedir. Eğriler elde edilirken  $\Omega_{SD} = 2$ ,  $\Omega_{RD} = 10$ ,  $\Omega_{SR} = 12$ ,  $a_1 = 0.8$ ,  $a_2 = 0.2$ , olarak alınmıştır.  $\rho = 20$  dB ve  $\rho = 25$  dB alınarak iki farklı SNR değeri için karşılaştırma yapılmıştır. Görüldüğü gibi küçük  $L$  değerleri için toplam röle sayısı arttıkça kazanç değeri de artarken, büyük  $L$  değerlerinde sağlanan kazanç korunmaktadır (Kim ve ark., 2016).  $m = 2$  ve  $m = 3$  için SNR değeri ( $\rho$ ) azaldıkça kazanç artarken  $m = 1/2$  durumunda SNR değeri arttıkça

kazanç artmaktadır. En çok kazanç  $m = 2$  durumunda sağlanırken en az kazanç  $m = 1/2$  durumunda elde edilmektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu yüksek lisans tez çalışmasında NOMA tabanlı işbirlikli telsiz ağlarda en iyi röle seçim teknikleri konusu araştırılmıştır. Sistem modeli olarak literatürde daha önce de incelenmiş olan ancak Nakagami-m sönümlemeli kanallarda en iyi röle seçimi durumunda analizine rastlamadığımız bir kaynak, çok sayıda röle ve bir hedef terminalinden oluşan NOMA kullanan işbirlikli ağ yapısı ele alınmıştır. Bu sistem modelinin ortalama erişilebilir hız performansı kanalların ortalama güçlerinin, güç tahsis katsayılarının ve sönümleme parametresinin değişik değerleri için bilgisayar simülasyonları ile bulunmuştur. İleriye dönük araştırma konuları arasında incelenen sistem modeli için matematiksel analizlerin gerçekleştirilmesi, optimum güç tahsis katsayılarının elde edilmesi problemi, röledeki algılama hatalarının oluşturduğu performans düşüşleri ile mücadele tekniklerinin geliştirilmesi ve değişik modülasyon türleri için sistemin BER ve SER belirlenmesi verilebilir.

## KAYNAKLAR

- Agarwal, A. and Jagannatham, K. A., 2019, Performance analysis for nonorthogonal multiple access (NOMA)-based two-way relay communication, *IET Communications*, 13 (4), 363-370.
- Aggelos, B. S., Ashish, K. I., David, P. R. and Andrew, L., 2006, A Simple cooperative diversity method based on network path selection, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24 (3), 659-672.
- Bahçeci, I., Duman, T.M. and Altunbasak, Y., 2003, Antenna selection for multiple-antenna transmission systems: Performance analysis and code construction, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49 (10), 2669 - 2681.
- Chen, Z., Vucetic, B. and Yuan, J., 2005, Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (4), 1312 -1321.
- Dai, L., Wang, B., Yuan, Y., Han, S., Chih-lin, I. and Wang, Z., 2015, Nonorthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends, *IEEE Communications Magazine*, 53 (9), 74-81.
- Dharmendra, D. and Sahu, P., 2012, Symbol error rate of rectangular QAM with best-relay selection in cooperative systems over Rayleigh fading channels, *IEEE Communications Letters*, 16 (4), 466-469.
- Ding, Z., Dai, H. and Poor, H.V., 2016, Relay selection for cooperative NOMA, *IEEE Wireless Communications Letters*, 5 (4), 416-419.
- Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, K. G., Schober, R., Yuan, J. and Bhargava, K. V., 2017, A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35 (10), 2181-2195.
- Ding, Z., Peng, M. and Poor, V.H., 2015, Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems, *IEEE Communications Letters*, 19 (8), 1462-465.

- Elzbieta, B. and Raviraj, A., 2008, Selection cooperation in multi-source cooperative networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7 (1), 118-127.
- Ferdi, T., Evren, Ç., Umut, E. and Lutfiye, D., 2018, The effect of codebook design on the BER performance of MTC systems employing SCMA, *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*.
- Foschini, G. and Gans, M., 1998, On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas, *Wireless Personal Communications*, 6 (3), 311-335.
- Georgy, L. and Sergey, L., 2012, Amplify-and-forward versus decode-and-forward relaying: Which is better?, *22th International Zurich Seminar on Communications (IZS)*.
- Gesbert, D. and Akhtar, J., 2002, Breaking the barriers of Shannon's capacity: An overview of MIMO wireless systems, *Teletronikk Telenor Journal*.
- Gradshteyn, S.I. and Ryzhik, M.I., 2007, Table of Integrals, Series and Products, *7th ed.*, Academic Press, California, USA.
- Guoxin, L., Deepak, M., Yulin, H., Yuzhen, H. and Hai, J., 2020, Adaptive relay selection strategies for cooperative NOMA networks with user and relay cooperation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69 (10), 11728-11742.
- Ibraheem, S., Bedawy, W., Saad, W. and Shokair, M., 2018, Outage performance of NOMA-based DF relay sharing networks over Nakagami-m fading channels, *International Conference on Computer Engineering and Systems*, 512-517.
- Jiao, R., Dai, L., MacKenzie, R. and Hao, M., 2017, On the performance of NOMA-based cooperative relaying systems over Rician fading channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (12), 11409-11413.

- Jha, P. and Kumar, D., 2018, Achievable rate analysis of relay assisted cooperative NOMA over Rician fading channels, *4th Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology*.
- Jha, P. and Shree, S., 2018, An opportunistic-non orthogonal multiple access based cooperative relaying system over Rician fading channels, *4th Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology*.
- Ju, J.W., Duan, Q., Sun, G. and Zhang, G., 2019, Performance analysis for cooperative NOMA with opportunistic relay selection, *IEEE Access*, 7 (131), 488-131.
- Kara, F. and Kaya, H., 2018, Derivation of the closed-form BER expressions for DL-NOMA over Nakagami-m fading channels, *IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference*.
- Kara, F. and Kaya, H., 2020, Error analysis of decode-forward cooperative relaying NOMA schemes over Nakagami-m fading channels, *IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference*.
- Kim, J., Song, S. M. and Lee, I., 2016, Achievable rate of best relay selection for non-orthogonal multiple access-based cooperative relaying systems, *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 960-962.
- Kim, J.-B. and Lee, I.-H., 2015, Capacity analysis of cooperative relaying systems using non-orthogonal multiple access, *IEEE Communications Letters*, 19 (11), 1949-1952.
- Kumar, V., Cardiff, B. and Flanagan, M., 2020, NOMA-based cooperative relaying with receive diversity in Nakagami-m fading channels, *IEEE Open Journal of The Communications Society*, 1, 1907-1918.
- Kumar, V., Cardiff, B. and Flanagan, M., 2019, Performance analysis of NOMA-based cooperative relaying in  $\alpha$ - $\mu$  fading channels, *IEEE International Conference on Communications*.

- Laneman, J. and Wornell, G., 2003, Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49 (10), 2415-2425.
- Laneman, J. N., Tse, D. N. C. and Wornell, G. W., 2004, Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behaviour, *IEEE Transactions on Information Theory*, 50 (12), 3062-3080.
- Li, Q., Ge, J., Wang, Q. and Bu, Q., 2017, Joint relay-and-antenna selection in NOMA relaying networks over Nakagami-m fading channels, *IEEE/CIC International Conference on Communications in China*.
- Li, Q., Niu, H., Papathanassiou, A. and Wu, G., 2014, 5G network capacity: Key elements and technologies, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 9 (1), 71-78.
- Lingyang, S., 2011, Relay selection for two-way relaying with amplify-and-forward protocols, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (4), 1954-1959.
- Liu, Y., Ding, Z., El Kashlan, M. and Poor, H., 2016, Cooperative nonorthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34 (4), 938-953.
- Liu, Y., Qin, Z., El Kashlan, M., Ding, Z., Nallanathan, A. and Hanzo, L., 2017, Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond, *Proceedings of IEEE*, 105 (12), 2347-2381.
- Özdemir, Ö., 2010, Performance of super-orthogonal space-time trellis codes with transmit antenna selection, *IET Communications*, 4 (16), 1942-1951.
- Özdemir, Ö., 2019, Performance evaluation of NOMA-based cooperative communications over cascaded Rician fading channels, *IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference*.
- Özdemir, Ö., 2020, Achievable rate of NOMA-based cooperative communication systems with best relay selection over cascaded Rayleigh fading channels, *12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 159-162.

- Özdemir, Ö., 2021, Achievable rate analysis for two-way relay nonorthogonal multiple access systems, *IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile*, 80-85.
- Panic S. R. and Jayakody, D. N. K., 2019, Performance analysis of NOMA-based cooperative relay systems over Hoyt fading channels, *IEEE 89th Vehicular Technology Conference*.
- Ronglan, H., Dehuan, W., Fei, J., Hua, Q., Jie, L., Hua, Y. and Fangjiong, C., 2020, Performance analysis of NOMA-based cooperative networks with relay selection, *China Communications*, 17 (11), 111-119.
- Saito, Y., Kishiyama, A., Benjebbour, Y., Nakamura, T. and Higuchi, A., 2013, Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access, *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-5.
- Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B., 2003, User cooperation diversity. Part I and Part II, *IEEE Transactions on Communications*, 51 (11), 1927-1948.
- Shannon, E. C., 1948, A mathematical theory of communication, *Bell Syst. Tech. J.*, Reprinted in *Book form University of Illinois, Urbana*, 27 (3), 379-423, 623-656.
- Shariatmadari, H., Ratasuk, R., Iraji, S., Laya, A., Taleb, T., Jäntti, R. and Ghosh, A., 2015, Machine-type communications: Current status and future perspectives toward 5G systems, *IEEE Communications Magazine*, 53 (9), 10-17.
- Shin, W., Vaezi, M., Lee, B., Love, D., Lee, J. and Poor, H., 2017, Nonorthogonal multiple access in multi-cell networks: Theory, performance, and practical challenges, *IEEE Communications Magazine*, 55 (10), 176-183.
- Simon, M. K. and Alouini, M.-S., 2000, Digital communication over fading channels: A unified approach to performance analysis, *John Wiley & Sons, Inc.*
- Soni, B., Patel, D., Guan, Y., Sun, S., Chang, Y. and Limk, J., 2020, Performance analysis of NOMA aided cooperative relaying over  $\alpha$ - $\mu$ - $\kappa$ - $\mu$  fading channels, *National Conference on Communications*.

- Telatar, E., 1999, Capacity of multi-antenna Gaussian channels, *European Transactions on Telecommunications*, 10 (6), 585-595.
- Wang, T., Cano, A., Giannakis, G. B., Laneman, J. N., 2007, High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays, *IEEE Transactions on Communications*, 55 (7), 1427-1438.
- Wen, T. and Zhu, P., 2013, 5G: A technology vision, *Whitepaper Huawei Technol. Co. Ltd.*
- Yang, Z., Ding, Z., Wu, Y. and Fan, P., 2020, Novel relay selection strategies for cooperative NOMA, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69 (11), 10114-10123.