



RÖLE YARDIMLI AŞAĞI YÖNLÜ NOMA SİSTEMLERİNİN BİLİŞSEL RADYO AĞLARDAKİ ERGODİK KAPASİTE ANALİZİ

Fatma Kebire BARDAK, Mustafa NAMDAR* Arif BAŞGÜMÜŞ

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Aşağı Yönlü NOMA,
Bilişsel Radyo,
Ergodik Kapasite,
Röle Ağlar.

Öz

Bu çalışmada, röle yardımcı aşağı yönlü dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA) sistemlerinin bilişsel radyo ağlardaki ergodik kapasite analizi incelenmektedir. Önerilen sistem modelindeki matematiksel çıkarımlar, ikincil ağdaki yakın ve uzak kullanıcılar için tam ve yaklaşık ergodik kapasite kapalı form denklemlerinin üstel dağılımlı kanal göz önüne alınarak türetilmesiyle elde edilmektedir. Hem rölede, hem de yakın ve uzak kullanıcılarda ardışık girişim iptali gerçekleşmesi durumunda, toplam ergodik kapasite performansı düğümler arası mesafe, güç paylaşım katsayısı, iletim gücü ve yol kaybı üssü parametreleri dikkate alınarak, 10^6 tekrarlı Monte Carlo benzetimleriyle analiz edilmektedir. Elde edilen nümerik sonuçlar, yakın kullanıcıya atanan güç tahsisinin artması ile ergodik toplam kapasitenin arttığını göstermektedir. Birincil ağ vericisinin röleden uzaklaşmasının sistem performansını iyileştirdiği de gözlenmiştir. Yakın kullanıcı için tam olarak hesaplanan ergodik toplam kapasite başarımının, yaklaşık olarak hesaplanan ergodik toplam kapasite performansı ile örtüşmesi, ancak yüksek işaret gürültü oranı (SNR) bölgesinde mümkün olmaktadır. Bu durum, ikincil ağ olarak kurgulanan aşağı yönlü NOMA sisteminin, ortak kanal girişimi olarak etki gösteren birincil ağ ile aynı frekans bandını kullanmasının etkisi olarak değerlendirilmiştir.

ERGODIC CAPACITY ANALYSIS OF THE RELAY ASSISTED DOWNLINK NOMA SYSTEMS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Keywords

Downlink NOMA,
Cognitive Radio,
Ergodic Capacity,
Relay Networks.

Abstract

In this study, the ergodic capacity analysis of the relay assisted downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems in cognitive radio networks is investigated. Mathematical inferences in the proposed system model are obtained by deriving the closed-form equations of the exact and approximate ergodic capacities for the far and near users in the secondary network by considering exponentially distributed channels. In case of successive interference cancellation is implemented in both relay, far and near users, the ergodic sum capacity performances are analyzed with 10^6 repeated Monte Carlo simulations, considering the distance between nodes, power allocation coefficient, transmission power, and path loss coefficient parameters. The numerical results show that the ergodic total capacity increases with the increase in power allocation assigned to the near user. It has also been observed that moving the primary network transmitter away from the relay improves the system performance. The exact calculation of the ergodic total capacity performance for the near user is only possible in the high signal-to-noise ratio (SNR) region to coincide with the approximately calculated ergodic total capacity performance. This situation is evaluated as the effect of the downlink NOMA system designed as a secondary network using the same frequency band as the primary network acting as a co-channel interference.

Alıntı / Cite

Bardak, F.K., Namdar, M., Başgümüş, A., (2021). Röle Yardımlı Aşağı Yönlü Noma Sistemlerinin Bilişsel Radyo Ağlardaki Ergodik Kapasite Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(3), 992-1002.

* İlgili yazar / Corresponding author: mustafa.namdar@dpu.edu.tr, + 90-274-443-4226

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
F. K. Bardak, 0000-0002-9380-2330	Başvuru Tarihi / Submission Date	15.11.2020
M. Namdar, 0000-0002-3522-4608	Revizyon Tarihi / Revision Date	06.08.2021
A. Başgümüş, 0000-0002-0611-3220	Kabul Tarihi / Accepted Date	18.08.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	21.09.2021

1. Giriş (Introduction)

Dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA, Non-Orthogonal Multiple Access) beşinci nesil (5G, 5th Generation) telsiz ağlarda önemli bir radyo erişim tekniği olarak değerlendirilmektedir. Yeni nesil telsiz haberleşme sistemleri için spektral kaynakların verimliliğini destekleyen, kapasite kullanımını iyileştiren, yüksek trafik hacmini yönetebilme ve kullanıcı bağlantılarını artırabilme özellikleri ile öne çıkan NOMA, yeni nesil telsiz iletişimde anahtar radyo teknolojisi olarak kabul edilmekte ve son dönemde hem akademi hem de endüstri tarafında yoğun ilgi görmektedir (Ding vd., 2020). Geleneksel dikgen çoklu erişim (OMA, Orthogonal Multiple Access) tekniklerinden farklı olarak NOMA'da, her kullanıcının radyo kaynaklarının (zaman, frekans) tümünü kullanması ile hem spektral verimliliğin gelişmesine katkı sağlanır hem de kullanıcı servis alma eşitliği (adilliği) desteklenir. NOMA temel olarak, bir kaynak bloğundaki birden çok kullanıcı arasında spektrum paylaşımını teşvik etmektedir. Bunu vericinin, kullanıcıların önceliğine veya kanal koşullarına (kalitesine) bağlı olarak farklı güç düzeylerine sahip birden çok NOMA alıcısına, üst üste bindirilmiş işaretler göndermesi (süper pozisyon kodlaması) yoluyla gerçekleştirir. Alıcı tarafta ise daha iyi kanal durumuna sahip olan kullanıcıların, zayıf güç paylaşım faktörleri olan kullanıcılarından gelen girişimi gidermek ve üst üste bindirilmiş işaretleri ayırmak amacıyla, ardışık girişim iptali (SIC, Successive Interference Cancellation) uygulandığı görülmektedir. NOMA odağındaki bu tasarım, 3. Nesil ortaklık projesi (3GPP, 3rd Generation Partnership Project) standartlarına da girmiştir (Dai vd., 2018; Dai vd., 2015).

Frekans spektrumunun daha verimli şekilde kullanılmasının, ikincil kullanıcıların (İK, secondary user-SU) kullanım lisansı birincil kullanıcılara (BK, primary user-PU) ait olan bir spektrum bandına erişmek için çalışma parametrelerini akıllıca uyarladıkları, bilişsel radyo (BR) yaklaşımı ile fırsatçı ve işbirlikli yöntemlerle mümkün olabildiği ifade edilmektedir. BR teknolojisi, alt sınırlı spektrum paylaşım modeli sayesinde, ikincil ağ (İA) kullanıcılarının oluşturduğu girişim belirli bir eşik seviyesinin altında kaldığı sürece, frekans spektrumunu öncelikli kullanma lisansına sahip olan birincil ağ (BA) kullanıcıları için tolere edilebilir bir işbirlikli haberleşme desteği verir (Haykin, 2005; Namdar ve İlhan, 2018). Öte yandan, NOMA ve BR ağlar işbirliğinde çalışılan konuların, yapılan araştırmaların, yüksek spektral verimlilik, yoğun kitlesel bağlantılar, düşük gecikme gibi 5G yeni nesil telsiz haberleşme için öngörülen gereksinimleri karşılama motivasyonunda olduğunu da göstermektedir. Hem NOMA'nın hem de BR'nin girişim sınırlı olduğu düşünüldüğünde, etkili bir BR-NOMA sistem modelini oluşturmanın girişimi en aza indirmek ve spektral kaynakları daha verimli kullanmak anlamında önemli olduğu da gözlenmektedir.

Telsiz haberleşme sistemlerinde, işbirlikli iletim ile performansın iyileştirildiği belirtilen ve literatürde sıklıkla kullanılan kuvvetlendir-ve-aktar (AF, Amplify-and-Forward) ile çöz-ve-aktar (DF, Decode-and-Forward) yöntemlerinden bahsedilmektedir. Rölenin kendisine gelen gürültülü işareti kuvvetlendirerek yeniden hedef düğüme ilettiği AF ile, rölenin kaynaktan gönderilip üzerine gürültü bindirilmiş işareti çözerek ardından yeniden kodlayıp ve hedefe tekrardan gönderdiği DF yöntemlerinde amaç, sistem kapasitesini ve çeşitleme kazancını artırmaktır (Guo vd., 2011; Zhang vd., 2015; Ucar-Gul vd., 2020).

BR ağlar ile önerilen NOMA çözümünün farklı performans analizleri literatürde yer almaktadır: (Mohammadi vd., 2018)'de tam çift yönlü çok antenli rölenin, bir erişim noktasından bilişsel uzak kullanıcıya (UK) iletim yapmasına yardımcı olduğu BR-NOMA ağı düşünülmüş, aynı zamanda erişim noktasından bilişsel yakın kullanıcıya da (YK) iletim yapıldığı varsayılmıştır. Önerilen sistem modelinde YK ve UK için veri hızları analiz edilmiştir. Ayrıca, huzmeleme ve güç paylaşım yaklaşımlarından da yararlanan çalışma, yüksek işaret gürültü oranı (SNR, signal-to-noise ratio) varsayımında anten sayısı, tolere edilebilir girişim seviyesi gibi anahtar parametrelerin değerlendirilmesine ve kesinti olasılığı çıkarımlarına yer vermiştir. Aşağı yönlü alt sınırlı DF temelli işbirlikli BR-NOMA ağı üzerinden (Arzykulov vd., 2019)'da önerilen sistem modelinde iki hedef kullanıcı için kesinti olasılığı performans analizi mükemmel olmayan kanal durum bilgisi (CSI, Channel State Information) altında kapalı formdaki matematiksel denklemlerle sunulmuştur. Rôle yardımcı iletimde, hedef kullanıcılar için en uygun güç paylaşım faktörünün tespit edilmesi sağlanmıştır. (Kader vd., 2017)'de iki atlamalı işbirlikli rôle temelli NOMA sistem modelinde iki kaynak terminalin karşılıklı hedef alıcılarına tek bir rôle üzerinden aynı frekans bandında iletim yaptığı mimari kullanılmıştır. Bu çalışmada, mükemmel SIC ve mükemmel olmayan SIC durumlarında uçtan uca her bir kaynak kullanıcı için ergodik kapasite analizi gerçekleştirilmiştir. Mükemmel SIC konfigürasyonunda, geleneksel OMA tekniğine göre, NOMA'nın kapasite artışı sağladığı ve güç paylaşım

faktörünün sistem performansına önemli etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. İşbirlikli röle yaklaşımının BR-NOMA sistem modeli için kurgulandığı alt sınırlı (underlay) ve yer paylaşım (overlay) farklı ağ modelleri (Lv vd., 2018)'de verilmiştir. Aynı çalışma BR-NOMA odağındaki gelecek dönem olası araştırma konularını ve açık noktaları da adreslemektedir. İşbirlikli NOMA sisteminin mükemmel olmayan SIC konfigürasyonunda alt sınırlı BR ağlar için performans analizi (Im ve Lee, 2019)'da çalışılmıştır. Kaynak BK ile alıcı İK düğümleri arasındaki iletim kanalının Rayleigh dağılımlı olduğu düşünülerek kesinti olasılığı için temel matematiksel denklemlerin çıkarımı yapılmış, girişim ve iletim gücü kısıtları altında asimptotik yaklaşım değerlendirilmiştir. (Wang vd., 2018)'de yazarlar, aşağı yönlü NOMA sisteminde, vericinin her bir alıcı düğümdeki kullanıcı için istatistiksel CSI'yi bildiği bir senaryoda, kesinti olasılığı performansını Nakagami- m sönümleme kanalı için sunmuşlardır. Bu çalışmada ayrıca, her bir alıcı için kullanılan güç paylaşım faktörü ile toplam veri hızı optimize edilmiştir. Maksimum ergodik kapasiteyi elde etme motivasyonundaki (Sun vd., 2015)'deki çalışma çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO, Multi-Input Multi-Output) sistemlerde Rayleigh sönümlemeli kanal üzerinde, vericide istatistiksel CSI'nin bilindiği varsayımı altında gerçekleştirilmiştir. Toplam verici gücü ve UK için veri oranı kısıtı altında, düşük karmaşıklıkla en iyiye yakın bir çözüm önerilmiştir. (Wu, 2019)'da yazarlar, çoklu erişimde güç düzleminde, girişimi ortadan kaldırmak amacıyla geleneksel aşağı yönlü NOMA sisteminde kullanılan SIC çözümünden ziyade kod yardımcı çok kullanıcı aşağı yönlü iletimde MIMO-NOMA yapısı önermişlerdir. Kullanıcı düğümlerinin tek bir yöne içinde bulunan fazla küme ile gruplandığı ve her bir küme için ortogonal kodların üretildiği çözümde, kümeler arası girişimin giderilmesi başarımından bahsedilmektedir. Burada ayrıca, her bir kümedeki kullanıcı düğümleri için en uygun güç paylaşım yaklaşımı uygulanarak, maksimum veri oranı başarımları sağlanmıştır. Karşılıklı kullanıcıların röle yardımıyla bilgi paylaşımı için NOMA ve fiziksel katman ağ kodlamasını (PNC, Physical Layer Network Coding) kullandıkları (Ho ve Leow, 2019)'daki çalışma, dinamik güç paylaşım yaklaşımını kullanarak spektral verimliliğe ve kesinti performansının iyileşmesine dikkat çekmektedir. Büyük ölçekli alt sınırlı BR ağlarda rastgele dağılmış kullanıcılar için NOMA'nın uygulandığı (Liu vd. 2016)'da aktarılan sistem modelinde, stokastik geometri araçları ile kesinti olasılığına ait kapalı form matematiksel denklemler elde edilmiş ve BK vericisi için tanımlanan farklı güç kısıtları altında NOMA kullanıcıları için çeşitleme derecesi incelenmiştir. Tam çift yönlü röle yardımcı işbirlikli NOMA sisteminin iki kullanıcı bir sistem modelinde uygulanması (Zhong ve Zhang, 2016)'da çalışılmış, mükemmel olmayan SIC varsayımı altında, her iki kullanıcı için kesinti olasılığı başarımları ve ergodik kapasite analizi, analitik çıkarımlarla sunulmuştur. (Arzykulov vd., 2019)'da yazarlar, röle yardımcı alt sınırlı BR-NOMA ağını incelemişlerdir. İK vericisinin DF röleleme modeli ile mükemmel olmayan CSI durumunda, M adet NOMA alıcı düğümüne iletim yaptığı, kesinti olasılığına ait kapalı form matematiksel denklemlerin çıkarıldığı görülmektedir. (Wang vd., 2010)'daki çalışma anten seçimi algoritmasından yararlanarak, İK için kapasite analizini değerlendirmiştir. Burada İA kapasitesinin; BA alıcısı ile İA vericisi arasındaki mesafenin, İA vericisi ve İA alıcısı arasındaki mesafeye oranı olarak ifade edilen coğrafi bir ilişki ile belirlendiği gösterilmiştir. Spektrum paylaşım modeline göre en iyi anten seçimi algoritması yardımıyla kapasite için matematiksel çıkarımlar türetilmiştir. Küçük hücreleri içeren makro hücredeki bir baz istasyonunun, sırasıyla, doğrudan ve röle üzerinden son kullanıcılar eriştiği spektral verimliliği artırmak için tasarlanan NOMA temelli sistem modeli üzerinden, (Kim ve Lee, 2015)'te kesinti olasılığı ve ergodik kapasiteye ilişkin analitik çıkarımlar sunulmaktadır. Her biri iki kullanıcıdan oluşan iki grup arasındaki veri iletiminin iki-yönlü DF röle üzerinden gerçekleştiği NOMA sistemi ise (Yue vd., 2018)'de verilmiştir. Bu çalışmada mükemmel SIC ve mükemmel olmayan SIC yaklaşımı dikkate alınarak NOMA kullanıcıları için kesinti olasılığı kapalı form denklemleri çıkarılmıştır. Asimptotik performans analizini değerlendiren yazarlar ergodik kapasiteye ve çeşitleme derecesine ait matematiksel denklemler elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, röle yardımcı aşağı yönlü NOMA sistemlerinin BR ağlardaki ergodik kapasitesi analiz edilmiştir. Hem rölede, hem de hedef düğümlerde SIC gerçekleşmesi durumunda, UK ve YK için ergodik kapasite başarımları analitik çıkarımlarla sunulmaktadır. Yazarların bildiği kadarı ile tasarımı literatürde ilk olarak önerilen bu sistem modelinde, uçtan uca ergodik toplam kapasite için de kapalı form matematiksel denklemlerin elde edilmesi sağlanmıştır. Üstel dağılımlı kanal göz önüne alınarak yapılan, UK ve YK için tam ve yaklaşık ergodik kapasite çıkarımları; kullanıcılar arası mesafe, güç paylaşım katsayısı, iletim gücü, işaret gürültü oranı ve yol kaybı üssü parametreleri dikkate alınarak analiz edilmektedir. Çalışmanın 2. bölümünde sistem modeline yer verilmektedir. Performans analizinin yer aldığı 3. bölüm, önerilen sistem modeli için UK'ya ve YK'ya ait tam ve yaklaşık ergodik kapasite çıkarımlarını aktarmaktadır. Aynı bölümde, toplam ergodik kapasite için elde edilen analitik ifadeler sunulmaktadır. Nümerik sonuçlarının incelendiği 4. bölümde, performans analizi çıktılarına detaylı şekilde değinilmiştir. Son bölümde ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve yorumlar verilmiştir.

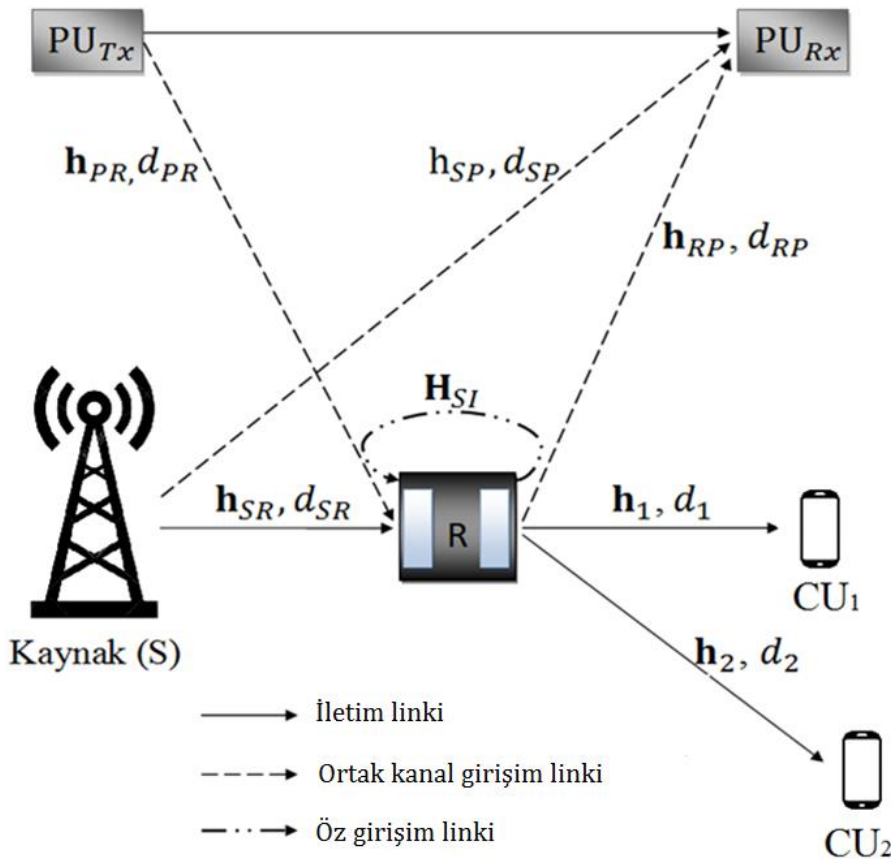
2. Sistem Modeli (System Model)

Bu çalışmada, Şekil 1'de görüldüğü gibi, kaynağın (S), çöz-ve-aktar çift yönlü rölenin (R), BA için tanımlı verici-alıcı kullanıcılarının ($P_{U_{Tx}}, P_{U_{Rx}}$) yanı sıra iki adet hedef İA kullanıcısının (C_{U_1}, C_{U_2}) yer aldığı aşağı yönlü (downlink) BR-NOMA sistemi incelenmektedir. Önerilen sistem modelinde İA kullanıcılarının, BA kullanıcıları ile

aynı frekans bandını kullandıkları varsayılmaktadır. S ile R arasında doğrudan bir iletim linkinin olduğu, öte yandan S ile İA kullanıcıları (CU₁, CU₂) arasında ise direkt bir iletim linkinin olmadığı kabul edilmektedir. S'nin, İA kullanıcıları ile DF röle üzerinden NOMA tekniği yardımıyla haberleştiği düşünülmektedir. CU₁ yakın kullanıcı, CU₂ ise uzak kullanıcı olarak tanımlanmıştır. Kullanıcı düğümleri arasında karşılık gelen mesafeler d_{PR} , d_{SP} , d_{RP} , d_{SR} , d_1 ve d_2 olarak verilmektedir. S'nin tek verici antene, CU₁ ve CU₂ kullanıcılarının tek alıcı antene, R'nin ise N_T adet verici ve N_R adet alıcı antene sahip olduğu değerlendirilmiştir. Rölede, CU₁ ve CU₂ kullanıcılarında SIC uygulandığı varsayılmaktadır. İA'da yer alan S'nin ve R'nin işaretlerini aynı zamanda ve aynı frekans bandını kullanarak ilettiği ve dolayısı ile S'nin ve R'nin, BA alıcısına (PU_{Rx}) girişim (ortak kanal girişim linki) oluşturdukları değerlendirilmektedir. Öte yandan çoklu anten yapısına sahip olan R'nin verici çıkışındaki işaret kaçığının, kendi girişi için öz girişim linki ile tanımlandığı, H_{SI} görülmektedir. Buna göre, S'nin ve R'nin iletim güçlerinin aşağıdaki eşitlikte belirtildiği gibi sınırlandırılması gerektiği söylenebilir (Bardak vd., 2020).

$$\max \left(\frac{P_S}{d_{SP}^\tau} |h_{SP}|^2, \frac{P_R}{d_{RP}^\tau} |\mathbf{h}_{RP}^T \mathbf{w}_t|^2 \right) \leq I_{th} \quad (1)$$

$$s[n] = \sqrt{\frac{P_S}{d_{SR}^\tau}} a_1 x_1[n] + \sqrt{\frac{P_S}{d_{SR}^\tau}} a_2 x_2[n] \quad (2)$$



Şekil 1. Röle yardımlı aşağı yönlü BR-NOMA tabanlı sistem modeli (Relay assisted downlink CR-NOMA based system model)

Burada, S ve R için iletim güçleri sırası ile P_S ve P_R , yol kaybı üssü τ , PU_{Rx} için tolere edilebilen girişim eşik seviyesi I_{th} ile gösterilmektedir. S ve PU_{Rx} arasındaki kanal linki h_{SP} ile, R ve PU_{Rx} arasındaki link ise \mathbf{h}_{RP} ($N_T \times 1$) kanal vektörü ile ifade edilmektedir. R'deki verici huzmeleme vektörü $\mathbf{w}_t \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ ile temsil edilmektedir. $(\cdot)^T$ matematiksel operatörü matris transpozunu (transpose), $|\cdot|$ ise mutlak değer operatörünü tanımlamaktadır. BA kullanıcılarının (PU_{Tx}, PU_{Rx}), İA kullanıcıları olan CU₁'den ve CU₂'den uzak oldukları, dolayısıyla, BA kullanıcılarının CU₁ ve CU₂ üzerinde girişim oluşturmayacakları varsayılmaktadır. Bu durumda $s[n]$, aşağı yönlü NOMA yönteminin kullanıldığı BR sistem modeline göre, S'nin R'ye göndereceği toplam işaret olarak tanımlanabilir. Burada, $x_i[n]$, $i \in \{1,2\}$ CU_i için bilgi sembolünü ve a_i , $a_1 < a_2$ ve $a_1 + a_2 = 1$ olmak üzere, güç paylaşım katsayısını belirtmektedir. Kaynak ile CU₁ ve kaynak ile CU₂ hedef kullanıcıları arasındaki iletimin, R yardımıyla iki fazlı olduğu düşünüldüğünde, ilk fazda R'de alınan işaret

$$y_R[n] = \mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR} s[n] + \sqrt{P_R} \mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{H}_{SI} \mathbf{w}_t s[n - \mu] + \sqrt{\frac{P_P}{d_{PR}^T}} \mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{PR} x_P[n] + \mathbf{w}_r^\dagger n_R[n] \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, \mathbf{h}_{SR} ($N_R \times 1$) S ile R arasındaki kanal vektörünü, $\mathbf{H}_{SI} \sim \text{CN}(0, \sigma_{SI}^2)$ rölenin alıcı ve verici antenleri arasında meydana gelen $N_R \times N_T$ boyutunda, birbirinden bağımsız ve eş dağılımlı girişim kanal matrisini, P_P , PU_{Tx} için iletim gücünü, \mathbf{h}_{PR} ($N_R \times 1$), PU_{Tx} ile R arasındaki kanal vektörünü, $\mathbf{w}_r \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ röledeki alıcı huzmeleme vektörünü, $x_P[n]$, PU_{Tx} 'in ilettiği bilgi sembolünü, μ , DF röleme işleminin sebep olduğu zaman gecikmesini ve $n_R[n] \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2)$ ise, σ_n^2 gürültü varyansı olmak üzere, röledeki toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN, Additive White Gaussian Noise) tanımlamaktadır. $(.)^\dagger$ matematiksel operatörü, eşlenik devriği (conjugate transpose) temsil etmektedir.

R, S'den aldığı $y_R[n]$ işaretinden, SIC yöntemini uygulayarak öncelikle $x_2[n]$ bilgisini, ardından $x_1[n]$ bilgisini çözer. Bu durumda, $x_2[n]$ için R'deki işaret-girişim gürültü oranı (SINR, signal-to-interference noise ratio) ifadesi ile

$$\gamma_{R,2} = \frac{\frac{P_S}{d_{SR}^T} a_2 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2}{\frac{P_S}{d_{SR}^T} a_1 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2 + P_R |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{H}_{SI} \mathbf{w}_t|^2 + \frac{P_P}{d_{PR}^T} |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{PR}|^2 + \sigma_n^2} \quad (4)$$

tanımlanabilir iken, $x_1[n]$ için R'deki SINR bilgisi ise

$$\gamma_{R,1} = \frac{\frac{P_S}{d_{SR}^T} a_1 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2}{P_R |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{H}_{SI} \mathbf{w}_t|^2 + \frac{P_P}{d_{PR}^T} |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{PR}|^2 + \sigma_n^2} \quad (5)$$

olarak verilmektedir. $x_1[n]$ ve $x_2[n]$ bilgileri R tarafından çözüldükten sonra, iletimin ikinci fazında, yine R tarafından yeniden kodlanarak CU_k , $k \in \{1,2\}$ kullanıcılarına gönderilmektedir. CU_k kullanıcıları için alınan işaret,

$$y_k[n] = \sqrt{\frac{P_R}{d_1^T}} a_1 \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_t x_1[n - \mu] + \sqrt{\frac{P_R}{d_2^T}} a_2 \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_t x_2[n - \mu] + n_k[n] \quad (6)$$

şeklinde verilmektedir. Burada, \mathbf{h}_k , $k \in \{1,2\}$ ($N_T \times 1$) röle ile CU_k kullanıcıları arasındaki kanal vektörünü, $n_k[n] \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2)$ CU_k kullanıcılarında oluşan AWGN'yi tanımlamaktadır. Böylelikle, CU_1 aldığı işaretten, kendi bilgisini girişim olarak kabul ederek, $x_2[n]$ bilgisini çözer. Sonrasında SIC yöntemini uygulayan CU_1 , kendi bilgisi olan $x_1[n]$ 'i çözmektedir. Bu durumda $x_2[n]$ bilgisi için CU_1 'de hesap edilen SINR,

$$\gamma_{1,2} = \frac{\frac{P_R}{d_1^T} a_2 |\mathbf{h}_1^T \mathbf{w}_t|^2}{\frac{P_R}{d_1^T} a_1 |\mathbf{h}_1^T \mathbf{w}_t|^2 + \sigma_n^2} \quad (7)$$

şeklinde bulunmaktadır. Mükemmel SIC yöntemi uygulanıp, CU_1 'de $x_1[n]$ bilgisi doğru olarak çözüldüğünde SINR,

$$\gamma_1 = \frac{\frac{P_R}{d_1^T} a_1 |\mathbf{h}_1^T \mathbf{w}_t|^2}{\sigma_n^2} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Öte yandan, CU_2 kullanıcısı $x_1[n]$ bilgisini (röleden aldığı işaretteki CU_1 kullanıcısının bilgisini) girişim olarak kabul ederek kendi bilgisi olan $x_2[n]$ 'i çözer. Bu durumda, CU_2 'deki SINR ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\gamma_2 = \frac{\frac{P_R}{d_2^T} a_2 |\mathbf{h}_2^T \mathbf{w}_t|^2}{\frac{P_R}{d_2^T} a_1 |\mathbf{h}_2^T \mathbf{w}_t|^2 + \sigma_n^2} \quad (9)$$

3. Performans Analizi (Performance Analysis)

Bu bölümde, röle yardımlı NOMA sisteminin BR ağlardaki ergodik kapasite analizi üstel dağılımlı kanal üzerinden incelenmektedir. Sırasıyla, uzak ve yakın kullanıcılar için ergodik kapasite çıkarımları, tam ve yaklaşık toplam ergodik kapasite hesaplamaları ile desteklenmektedir.

3.1 Uzak Kullanıcı için Ergodik Kapasite (Ergodic Capacity for the Far User)

$x_2[n]$ ile ilişkilendirilen erişilebilir kapasite (4), (7), ve (9) numaralı denklemler kullanılarak,

$$C_{x_2} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{R,2}, \gamma_{1,2}, \gamma_2)) \quad (10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $X = \gamma_{R,2}$, $T = \min(\gamma_{R,2}, \gamma_{1,2}, \gamma_2)$ olarak tanımlansın ve logaritma fonksiyonu $\log_2(\cdot)$ ile gösterilsin. Bu durumda, X rastgele değişkeninin birikimli dağılım fonksiyonu (CDF, Cumulative Distribution Function) (Zhong ve Zhang, 2016, Eşitlik 22) yardımıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_X(x) = 1 - \frac{(\rho_S \tilde{\lambda}_{SR})(a_2 - a_1 x) e^{\frac{-x}{(a_2 - a_1 x) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR}}}}{(a_2 - a_1 x) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR} + x \rho_P \tilde{\lambda}_{PR}} \quad (11)$$

Yukarıda (11)'in çıkarımı, detaylı şekilde Ek-A'da verilmektedir. Burada, $\rho_S = \frac{P_S}{d_{SR}^2 \sigma_n^2}$, $\rho_P = \frac{P_P}{d_{PR}^2 \sigma_n^2}$, $\rho_1 = \frac{P_R}{d_1^2 \sigma_n^2}$, $\rho_2 = \frac{P_R}{d_2^2 \sigma_n^2}$, $\mathbf{h}_{SR} \sim CN(0, \lambda_{SR})$, $\mathbf{h}_{PR} \sim CN(0, \lambda_{PR})$, $\mathbf{h}_1 \sim CN(0, \lambda_1)$, $\mathbf{h}_2 \sim CN(0, \lambda_2)$ olarak tanımlanmaktadır. \mathbf{h}_{SR} , \mathbf{h}_{PR} , \mathbf{h}_1 ve \mathbf{h}_2 kanal vektörlerine ait varyans ifadeleri sırası $\lambda_{SR} = d_{SR}^{-2}$, $\lambda_{PR} = d_{PR}^{-2}$, $\lambda_1 = d_1^{-2}$ ve $\lambda_2 = d_2^{-2}$ olarak belirtilmektedir. Öte yandan $\mathbf{w}_r = \mathbf{h}_{SR}$, $E[|\mathbf{h}_{SR}^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2] = (\mathbf{h}_{SR}^\dagger \mathbf{h}_{SR})^2 = \tilde{\lambda}_{SR}$ olduğu varsayılmaktadır. Benzer yaklaşım ile $E[|\mathbf{h}_{PR}^\dagger \mathbf{h}_{PR}|^2] = \tilde{\lambda}_{PR}$, $E[|\mathbf{h}_1^\dagger \mathbf{h}_1|^2] = \tilde{\lambda}_1$, $E[|\mathbf{h}_2^\dagger \mathbf{h}_2|^2] = \tilde{\lambda}_2$ şeklinde yazılabilir. $E[\cdot]$ beklenen değer operatörü olarak belirtilmektedir. (11) ile birlikte en az iki üstel dağılımlı rastgele değişkenler için tanımlanan CDF ifadesi kullanılarak ve

$$P(T > a) = P(\min(X, Y, Z) > a) = P(X > a, Y > a, Z > a) = P(X > a) P(Y > a) P(Z > a) \quad (12)$$

yardımlarıyla, T rastgele değişkeninin CDF'si,

$$F_T(t) = 1 - \left(\frac{(a_2 - a_1 t) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR}}{(a_2 - a_1 t) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR} + t \rho_P \tilde{\lambda}_{PR}} e^{-t \left(\frac{1}{(a_2 - a_1 t) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR}} + \frac{1}{(a_2 - a_1 t) \rho_1 \tilde{\lambda}_1} + \frac{1}{(a_2 - a_1 t) \rho_2 \tilde{\lambda}_2} \right)} \right) \quad (13)$$

şeklinde elde edilmektedir. $\int_0^\infty \log_2(1+x) f_x(x) dx = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_x(x)}{1+x} dx$ eşitliği kullanılarak (Kader, 2017), S ve CU_2 arasındaki ergodik kapasite

$$\bar{C}_{x_2} = \frac{1}{2 \ln(2)} \int_0^\infty (1+t)^{-1} \left(\frac{(a_2 - a_1 t) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR}}{(a_2 - a_1 t) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR} + t \rho_P \tilde{\lambda}_{PR}} e^{-t \left(\frac{1}{(a_2 - a_1 t) \rho_S \tilde{\lambda}_{SR}} + \frac{1}{(a_2 - a_1 t) \rho_1 \tilde{\lambda}_1} + \frac{1}{(a_2 - a_1 t) \rho_2 \tilde{\lambda}_2} \right)} \right) dt \quad (14)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada $\ln(\cdot)$, doğal logaritma operatörünü temsil etmektedir. Öte yandan, (14)'ün kapalı bir forma sahip olmadığı görülmektedir. Bu amaçla, $T = \min(\gamma_{R,2}, \gamma_{1,2}, \gamma_2)$ ifadesini gerçekleştirebilmek için ρ_j 'nin, $j \in \{1, 2, P, S\}$ yüksek bir değere sahip olduğu yaklaşımı ile, $T \triangleq \min\left(\frac{\rho_S a_2 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2}{\rho_S a_1 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2 + \rho_P |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{PR}|^2 + 1}, \frac{\rho_1 a_2 |\mathbf{h}_1^\dagger \mathbf{w}_t|^2}{\rho_1 a_1 |\mathbf{h}_1^\dagger \mathbf{w}_t|^2 + 1}, \frac{\rho_2 a_2 |\mathbf{h}_2^\dagger \mathbf{w}_t|^2}{\rho_2 a_1 |\mathbf{h}_2^\dagger \mathbf{w}_t|^2 + 1}\right) \approx \min\left(\frac{a_2 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2}{a_1 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2 + |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{PR}|^2}, \frac{a_2}{a_1}\right) \approx \min\left(W, \frac{a_2}{a_1}\right)$ şeklinde çıkarılmaktadır. İki üstel rastgele değişkenin birbirine oranının olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF, Probability Density Function,) kullanılarak (Wang vd., 2010, Eşitlik 5), W rastgele değişkeni için PDF ifadesi

$$f_W(w) = \frac{(\tilde{\lambda}_{PR} - a_1 \tilde{\lambda}_{SR})(-w a_1 \tilde{\lambda}_{SR} + a_2 \tilde{\lambda}_{SR})}{(w \tilde{\lambda}_{PR} - w a_1 \tilde{\lambda}_{SR} + a_2 \tilde{\lambda}_{SR})^2} + \frac{a_1 \tilde{\lambda}_{SR}}{w \tilde{\lambda}_{PR} - w a_1 \tilde{\lambda}_{SR} + a_2 \tilde{\lambda}_{SR}} \quad (15)$$

olarak bulunmaktadır. $f_W(w)$ yardımıyla ve (Kim ve Lee, 2015, Eşitlik 15) kullanılarak, S ve CU_2 arasındaki yaklaşık ergodik kapasite aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$\bar{C}_{x_2} \sim \frac{1}{2} \int_u^\infty \log_2(1+u) f_W(w) dw + \frac{1}{2} \int_0^u \log_2(1+w) f_W(w) dw. \quad (16)$$

Burada $u = \frac{a_2}{a_1}$ olarak tanımlanmaktadır. Mathematica programı yardımıyla (16) için hesaplama yapıldığında ve temel matematiksel işlemlerin ardından, S ve CU₂ arasındaki yaklaşık ergodik kapasiteye ilişkin kapalı form ifadesi

$$\bar{C}_{x_2}^{yaklaşık} \sim \frac{(a_2 \tilde{\lambda}_{PR} \tilde{\lambda}_{SR})(\ln[u \tilde{\lambda}_{PR}] - \ln[a_2 \tilde{\lambda}_{SR}] - \ln[1+u])}{2 \ln(2)(-\tilde{\lambda}_{PR} + a_1 \tilde{\lambda}_{SR})(-\tilde{\lambda}_{PR} + (a_1+a_2) \tilde{\lambda}_{SR})} \quad (17)$$

şeklinde bulunmaktadır.

3.2 Yakın Kullanıcı için Ergodik Kapasite (Ergodic Capacity for the Near User)

$x_1[n]$ ile ilişkilendirilen erişilebilir kapasite (5) ve (8) numaralı denklemler kullanılarak,

$$\bar{C}_{x_1} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{R,1}, \gamma_1)) \quad (18)$$

ile hesaplanmaktadır. $K \triangleq \min(\gamma_{R,1}, \gamma_1) = \min\left(\frac{\rho_S a_1 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2}{\rho_P |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{PR}|^2 + 1}, \rho_1 a_1 |\mathbf{h}_1^T \mathbf{w}_t|^2\right)$ olarak kabul edilmiştir. K rastgele değişkeninin CDF'si, Ek-A'daki yaklaşım kullanılarak aşağıdaki şekilde elde edilmektedir:

$$F_K(k) = 1 - \left(\frac{\rho_S a_1 \tilde{\lambda}_{SR}}{\rho_P \tilde{\lambda}_{PR} k + \rho_S a_1 \tilde{\lambda}_{SR}} \right) \times \left(e^{-k \left(\frac{1}{\rho_1 a_1 \tilde{\lambda}_1} + \frac{1}{\rho_S a_1 \tilde{\lambda}_{SR}} \right)} \right). \quad (19)$$

Ayrıca, $\int_0^\infty \log_2(1+x) f_x(x) dx = \frac{1}{\ln(2)} \int_0^\infty \frac{1-F_x(x)}{1+x} dx$ eşitliği kullanılarak, S ve CU₁ arasındaki ergodik kapasite ifadesi kapalı formda

$$\bar{C}_{x_1}^{tam} = \frac{1}{2 \ln(2)} \left(\frac{1}{A-B} A \left(-\exp(n) \text{Ei}(-n) - \exp\left(\frac{An}{B}\right) \left(-\text{Ei}\left(-\frac{An}{B}\right) + \ln\left(\frac{B}{A}\right) - \ln(n) + \ln\left(\frac{An}{B}\right) \right) \right) \right) \quad (20)$$

şeklinde bulunmaktadır. Burada $A = \rho_S a_1 \tilde{\lambda}_{SR}$, $B = \rho_P \tilde{\lambda}_{PR}$, $n = \frac{1}{\rho_1 a_1 \tilde{\lambda}_1} + \frac{1}{\rho_S a_1 \tilde{\lambda}_{SR}}$ olarak tanımlanmaktadır. (20)'nin matematiksel çıkarım detayları Ek-B'de verilmektedir. ρ_j 'nin, $j \in \{1, P, S\}$ yüksek bir değere sahip olduğu varsayımıyla, küçük x değerleri için $\text{Ei}(-x) \approx E_c + \ln(x)$ ve $e^x \approx 1 + x$ yaklaşıklığı kullanılarak, gerekli temel matematiksel işlemlerin ardından, S ve CU₁ arasındaki yaklaşık ergodik kapasite,

$$\bar{C}_{x_1}^{yaklaşık} \sim \frac{1}{2 \ln(2)} \left(\frac{A}{A-B} \left(\left(\frac{An}{B} - n \right) (E_c + \ln(n)) - \left(\frac{An}{B} + 1 \right) \ln\left(\frac{B}{A}\right) \right) \right) \quad (21)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, $\text{Ei}(\cdot)$ eksponansiyel integral fonksiyonu, E_c Euler sabiti olarak tanımlanmaktadır (Gradshteyn ve Ryzhik, 2007, Eşitlik 8.212.1).

Röle yardımlı aşağı yönlü NOMA sistemlerinin BR ağlardaki, tam ve yaklaşık ergodik kapasite analizine ilişkin etkileri, aşağıdaki ifadelerle verilmektedir. Hem rölede, hem de hedef düğümlerde SIC gerçekleşmesi durumunda, (17), (20) ve (21) kullanarak, uzak ve yakın kullanıcı için toplam ergodik kapasite ifadeleri

$$C_{top,1} = \bar{C}_{x_2}^{yaklaşık} + \bar{C}_{x_1}^{tam} \quad (22)$$

$$C_{top,2} = \bar{C}_{x_2}^{yaklaşık} + \bar{C}_{x_1}^{yaklaşık} \quad (23)$$

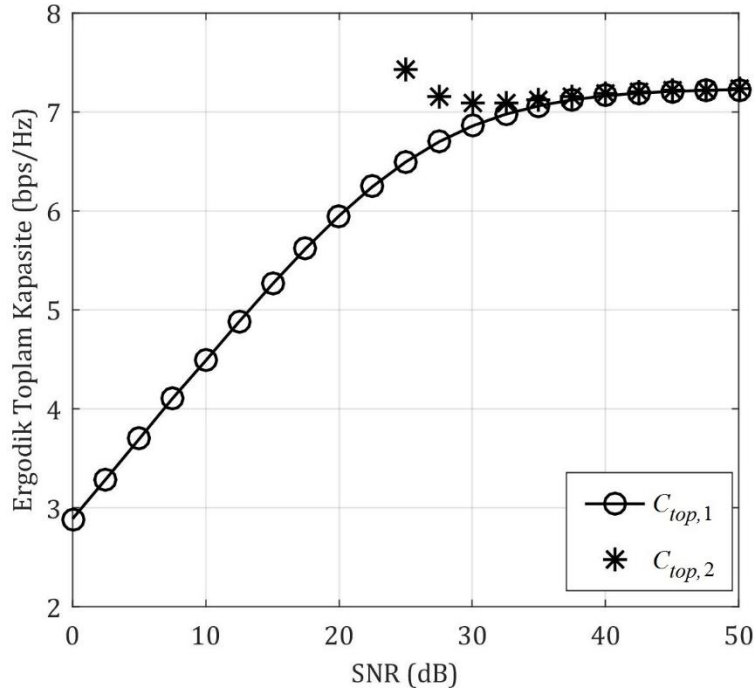
şeklinde hesaplanmaktadır.

4. Nümerik Sonuçlar (Numerical Results)

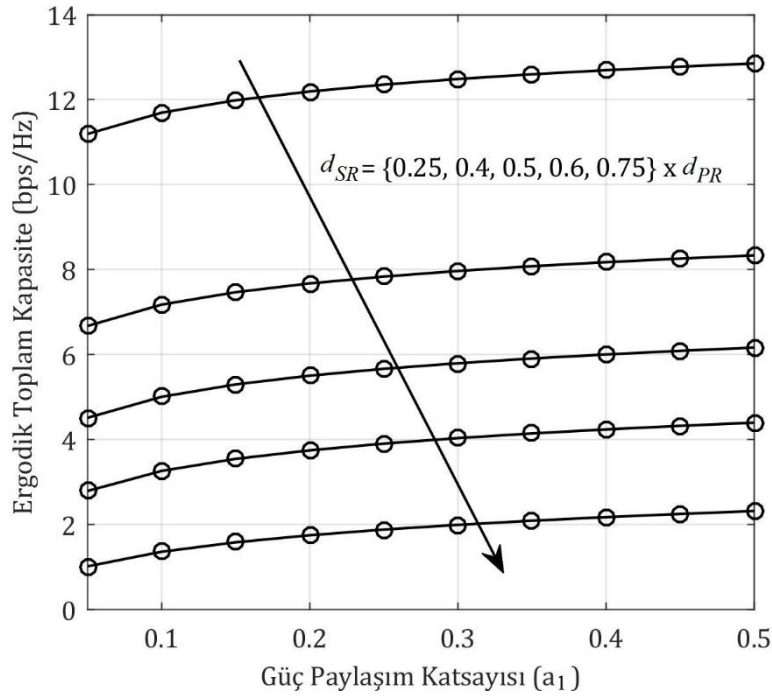
Bu bölümde, röle yardımlı aşağı yönlü NOMA sistemlerinin BR ağlarda önerilen modelinde, yakın ve uzak kullanıcılar için elde edilen ergodik toplam kapasite analizine ait analitik çıkarımlara ilişkin, performans incelemesi sunulmaktadır. Farklı sistem parametreleri kullanılarak elde edilen nümerik sonuçlarda yol kaybı üssü $\tau = 2.7$, gürültü varyansı $\sigma_n^2 = 1$, iletim güçleri $P_P = P_S = P_R = 1/3$ ve tekrarlamaya sayısı 10^6 olarak alınmıştır.

Hem rölede, hem de hedef düğümlerde SIC gerçekleşmesi durumunda, (22) ve (23) yardımıyla, yakın ve uzak kullanıcı için ergodik toplam kapasitenin SNR ile değişimi Şekil 2’de verilmektedir. Burada, güç paylaşım katsayısı $a_1 = 0.4$ alındığında ve kullanıcı düğümleri arasındaki mesafeler $d_{PR} = 2.25d_1 = 2.25d_{SR}$ şeklinde kullanıldığında, sistem başarımı analiz edilmektedir. Şekilden, işaret gürültü oranı arttığında ergodik toplam kapasitenin de arttığı dolayısıyla sistem performansının iyileştiği görülmektedir. Öte yandan, yakın kullanıcı için tam olarak hesaplanan ergodik toplam kapasite başarımının, yaklaşık olarak hesaplanan ergodik toplam kapasite performansı ile örtüşmesi, ancak yüksek SNR bölgesinde mümkün olmaktadır. Bu durumun, küçük x değerleri için yapılan $Ei(-x) \approx E_c + \ln(x)$ ve $e^x \approx 1 + x$ yaklaşıklıklarından kaynaklandığı ve dolayısıyla büyük SNR değerleri için geçerli olduğu gözlenmektedir.

Şekil 3’te CU_1 için ergodik toplam kapasitenin güç paylaşım katsayısı (a_1) ile değişimi, $d_{PR} = 4d_1$ ve SNR=20 dB iken sunulmaktadır. Burada d_{SR} ’nin d_{PR} ’ye göre sırasıyla 0.25, 0.4, 0.5, 0.6 ve 0.75 kat büyük olması senaryolarında sistem performansı incelenmektedir. Yakın kullanıcıya atanan güç tahsisinin artması, sistem performansını da iyileştirmektedir. Öte yandan, rölenin PU_{Tx} ’e göre kaynaktan uzaklaşmasının (d_{SR} ’nin d_{PR} ’ye kıyasla artmasının) ergodik toplam kapasiteyi olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bu durum, İA olarak kurgulanan aşağı yönlü NOMA sisteminin, ortak kanal girişimi olarak etki gösteren BA ile aynı frekans bandını kullanmasının etkisi olarak değerlendirilmektedir.

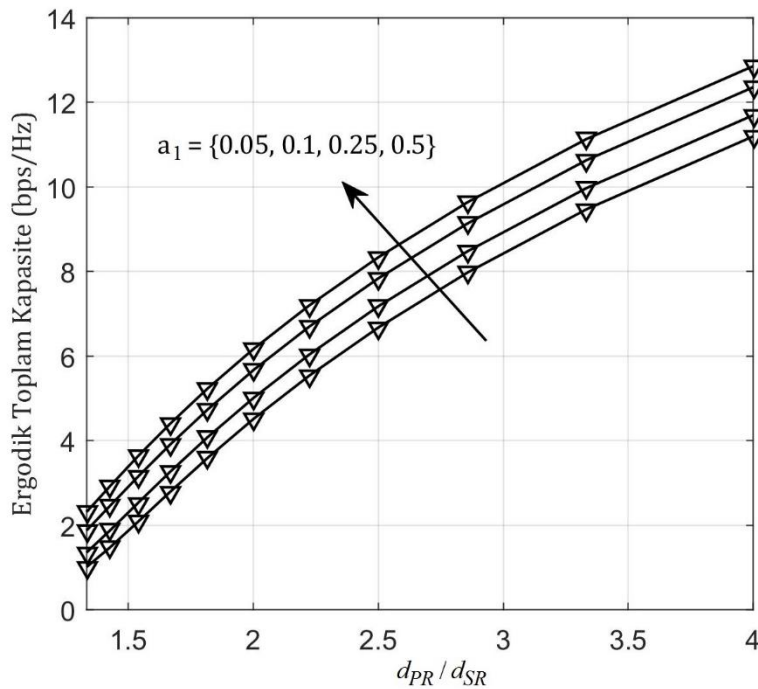


Şekil 2. CU_1 ve CU_2 yakın ve uzak kullanıcıları için ergodik toplam kapasitenin SNR ile değişimi (The variation of ergodic total capacity with SNR for the CU_1 and CU_2 near and far users)



Şekil 3. Ergodik toplam kapasitenin a_1 ile değişimi (The variation of ergodic total capacity with a_1)

Şekil 4, d_{PR}/d_{SR} değişiminin CU_1 için ergodik toplam kapasite üzerindeki performansını analiz etmektedir. Burada, $d_{PR}=4d_1$ ve SNR=20 dB alınarak, farklı güç paylaşım katsayısı $a_1 = \{0.05, 0.1, 0.25, 0.5\}$ için yapılan incelemelerde, PU_{Tx} 'in röleden uzaklaşmasının ergodik toplam kapasitenin artışı desteklediği gözlenmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, CU_1 için güç paylaşım katsayısı a_1 'in artışının, sistem performansını olumlu yönde etkilediği değerlendirilmektedir.



Şekil 4. Ergodik toplam kapasitenin, farklı a_1 değerleri için d_{PR}/d_{SR} ile değişimi (The variation of ergodic total capacity with d_{PR}/d_{SR} for different a_1 values)

5. Sonuçlar ve Yorumlar (Conclusions and Comments)

Bu çalışmada, röle yardımlı aşağı yönlü NOMA sistemlerinin BR ağlardaki ergodik toplam kapasite performansı incelenmiştir. Hem rölede, hem de hedef düğümlerde SIC gerçekleşmesi durumunda, uzak ve yakın kullanıcı için elde edilen ergodik toplam kapasite analitik çıkarımları üstel dağılımlı kanal altında türetilmiştir. Ayrıca önerilen sistem modelinde, uçtan uca tam ve yaklaşık ergodik kapasite için de kapalı form matematiksel denklemlerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Sistem başarımı, düğümler arası mesafe, güç paylaşım katsayısı, iletim gücü, işaret gürültü oranı ve üstel dağılım parametreleri dikkate alınarak 10^6 tekrarlı Monte Carlo benzetimleri ile değerlendirilmiştir. İkincil ağdaki rölenin birincil ağ vericisine göre kaynaktan uzaklaşması durumunda sistem performansının kötüleştiği, öte yandan yakın kullanıcıya atanan güç tahsisindeki artışın ise ergodik toplam kapasiteyi olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma 1649B022001412 başvurusu numarası ile TÜBİTAK 2210-C öncelikli alanlara yönelik yurt içi yüksek lisans burs programı kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Ek-A

$$Z = \gamma_{R,2} = \frac{\frac{P_S}{d_{SR}^\alpha} a_2 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2}{\frac{P_S}{d_{SR}^\alpha} a_1 |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{SR}|^2 + P_R |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{H}_{SI} \mathbf{w}_t|^2 + \frac{P_P}{d_{PR}^\alpha} |\mathbf{w}_r^\dagger \mathbf{h}_{PR}|^2 + \sigma_n^2} = \frac{X}{\frac{a_1}{a_2} X + Y + 1} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} F_Z(Z) &= P(Z \leq z) = P\left\{ \frac{X}{\frac{a_1}{a_2} X + Y + 1} \leq z \right\} = P\left\{ X \leq \frac{z(Y+1)}{1 - \frac{a_1}{a_2} z} \right\} \\ &= \int_{y=0}^{\infty} \int_{x=0}^{1 - \frac{a_1}{a_2} z} \lambda_{SR} \lambda_{PR} e^{-\lambda_{SR} x} e^{-\lambda_{PR} y} dx dy \\ &= \lambda_{PR} \int_{y=0}^{\infty} e^{-\lambda_{PR} y} [1 - e^{-\lambda_{SR} \frac{z(Y+1)}{1 - \frac{a_1}{a_2} z}}] dy \\ &= \lambda_{PR} \int_{y=0}^{\infty} e^{-\lambda_{PR} y} - e^{-\lambda_{PR} y - \frac{a_2 \lambda_{SR} z y + a_2 \lambda_{SR} z}{a_2 - a_1 z}} dy \\ F_Z(Z) &= 1 - \frac{\lambda_{PR} (a_2 - a_1 z) e^{-\frac{a_2 \lambda_{SR} z}{a_2 - a_1 z}}}{\lambda_{PR} (a_2 - a_1 z) + a_2 \lambda_{SR} z} \end{aligned} \quad (25)$$

Ek-B

$$\bar{C}_{x_1} = \frac{1}{2 \ln 2} \int_0^{\infty} (1+k)^{-1} \left(\frac{A}{Bk+A} e^{-kn} \right) dk \quad (26)$$

ifadesi Mathematica yardımıyla, aşağıda (27)'deki forma kavuşur.

$$\bar{C}_{x_1} = \frac{1}{2 \ln 2} \left[\frac{1}{A-B} A \left(e^n \text{Gamma}[0, n] - e^{\frac{An}{B}} \left(\text{Gamma}\left[0, \frac{An}{B}\right] + \log\left[\frac{B}{A}\right] - \log[n] + \log\left[\frac{An}{B}\right] \right) \right) \right] \quad (27)$$

Buradan (Gradshteyn ve Ryzhik, 2007) kullanılarak,

$$\text{Gamma}[0, n] = \int_n^{\infty} t^{-1} \times e^{-t} dt = -\text{Ei}[-n] \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{Gamma}\left[0, \frac{An}{B}\right] &= \int_{\frac{An}{B}}^{\infty} t^{-1} \times e^{-t} dt \\ &= -\text{Ei}\left[-\frac{An}{B}\right] \end{aligned} \quad (29)$$

(30) elde edilir. Gamma [. , .] tamamlanmamış (incomplete) Gamma fonksiyonunu belirtmektedir.

$$\bar{C}_{x_1}^{tam} = \frac{1}{2 \ln 2} \left(\frac{1}{A-B} A \left(-e^n \text{Ei}[-n] - e^{\frac{An}{B}} \left(-\text{Ei} \left[-\frac{An}{B} \right] + \ln \left[\frac{B}{A} \right] - \ln[n] + \ln \left[\frac{An}{B} \right] \right) \right) \right) \quad (30)$$

Kaynaklar (References)

- Arzykulov S., Tsiftsis T. A., Naurzybayev G., and Abdallah M., 2019. Outage Performance of Cooperative Underlay CR-NOMA with Imperfect CSI. *IEEE Communications Letters*, 23(1), 176-179.
- Arzykulov S., Naurzybayev G., Tsiftsis T. A., Maham B., and Abdallah M., 2019. On the Outage of Underlay CR-NOMA Networks with Detect-and-Forward Relaying. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(3), 795-804.
- Bardak, F. K., Namdar, M., and Basgumus, A., 2020. Performance Analysis of NOMA Systems in Relay-Assisted Cognitive Radio Networks. *IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4.
- Dai L., Wang B., Yuan Y., Han S., Chih-Lin I., and Wang Z., 2015. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends. *IEEE Communications Magazine*, 53(9), 74-81.
- Dai L., Wang B., Ding Z., Wang Z., Chen S., and Hanzo L., 2018. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3), 2294-2323.
- Ding Z., Lei X., Karagiannidis G. K., Schober R., Yuan L., and Bhargava V., 2020. A Survey of NOMA: Current Status and Open Research Challenges. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(10), 2181-2195.
- Gradshteyn I. S., and Ryzhik I. M., 2007. *Table of integrals, series and products*, 7th edn. New York: Academic Press.
- Guo H., Ge J., and Ding H., 2011. Symbol Error Probability of Two-Way Amplify-and-Forward Relaying. *IEEE Communications Letter*, 15(1), 22-24.
- Haykin S., 2005. Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(21), 201-220.
- Ho C. Y., Leow C. Y., 2019. Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access with Physical Layer Network Coding. *IEEE Access*, vol. 7, 44894-44902.
- Im G., Lee J. H., 2019. Outage Probability for Cooperative NOMA Systems with Imperfect SIC in Cognitive Radio Networks. *IEEE Communications Letters*, 23(4), 692-695.
- Kader M. F., Shahab M. B., and Shin S. Y., 2017. Exploiting Non-orthogonal Multiple Access in Cooperative Relay Sharing. *IEEE Communications Letters*, 21(5), 1159-1162.
- Kim J. B., and Lee I. H., 2015. Non-Orthogonal Multiple Access in Coordinated Direct and Relay Transmission. *IEEE Communications Letters*, 19(11), 2037-2040.
- Liu Y., Ding Z., Elkashlan M., Yuan L., 2016. Non-orthogonal Multiple Access in Large-Scale Underlay Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(12), 10152-10157.
- Lv L., Chen L., Ni Q., Ding Z., and Liang H. 2018. Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing. *IEEE Communications Magazine*, 56(4), 188-195.
- Mohammadi M., Chalise B. K., Hakimi A., Mobini Z., Suraweera H. A., and Ding Z., 2018. Beamforming Design and Power Allocation for Full-Duplex Non-Orthogonal Multiple Access Cognitive Relaying. *IEEE Transactions on Communications*, 66(12), 5952-5965.
- Namdar M., Ilhan H., 2018. Exact Closed-Form Solution for Detection Probability in Cognitive Radio Networks with Switch-and-Examine Combining Diversity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(9), 8215-8222.
- Sun Q., Han S., Chin-Lin I., and Pan Z., 2015. On the Ergodic Capacity of MIMO NOMA Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(4), 405-408.
- Ucar-Gul M., Namdar M., and Basgumus A., 2020. Performance Analysis of Two-Way AF Relaying System with the Presence of Hardware Impairments over Nakagami-*m* Fading Channels. *IET Communications*, 14(15), 2618-2627.
- Wang H., Lee J., Kim S., and Hong D., 2010. Capacity Enhancement of Secondary Links through Spatial Diversity in Spectrum Sharing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(2), 494-499.
- Wang X., Wang J., He L., and Song J., 2018. Outage Analysis for Downlink NOMA with Statistical Channel State Information. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(2), 142-145.
- Wu W. C., 2019. A novel Code-aided non-orthogonal multiple access in downlink multiuser MIMO System. *IEEE International Conference of Intelligent Applied Systems on Engineering (ICIASE)*, 251-154.
- Yue X., Liu Y., Kang S., Nallanathan A., Chen Y., 2018. Modeling and Analysis of Two-Way Relay Non-Orthogonal Multiple Access Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 66(9), 3784-3796.
- Zhang C., Ge J., Li J., Rui Y., and Guizani M., 2015. A Unified Approach for Calculating the Outage Performance of Two-Way AF Relaying Over Fading Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(3), 1218-1229.
- Zhong C., Zhang Z., 2016. Non-Orthogonal Multiple Access With Cooperative Full-Duplex Relaying. *IEEE Communications Letters*, 20(12), 2478-2481.