



Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA): Gelecek Nesil Radyo Erişim Ağlarında Kitlesel Erişimin ve Spektral Verimliliğin Sağlanması için Çözüm

Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Solution to Massive Connectivity and High Spectral Efficiency for Future Radio Access (FRA) Networks

Ferdi Kara , Hakan Kaya*

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

Öz

Dikgen-Olmayan Çoklu Erişim (Non-orthogonal Multiple Access -NOMA), Gelecek Nesil Radyo Erişim (Future Radio Access -FRA) ağları için önemli istekler olan kitlesel bağlantı ve yüksek spektral verimliliğe cevap verebilme potansiyeline sahiptir. NOMA'daki temel fikir, kullanıcıların işaretlerini güç veya kod ekseninde farklı değerlerle, aynı zaman ve frekans bandında (radyo kaynağı-radio resource) iletişimin sağlanmasıdır. NOMA ayrıca literatürde önerilen diğer 5G fiziksel seviye teknikleri olan MIMO, işbirlikli iletişim, milimetre dalga haberleşmesi, bilişsel radyo vb. tekniklerle beraber de kullanılabilir. Bu çalışmada, güç ekseni (power domain -PD) NOMA'nın temel prensipleri tanımlanarak güncel çalışmaların bir özeti sunulmuştur. PD-NOMA ile geleneksel dikgen Çoklu Erişim (Orthogonal Multiple Access -OMA) tekniklerinin kesinti olasılığı ve kapasite başarımları bakımından karşılaştırılmaları hem aşağı yönlü (downlink) hem de yukarı yönlü iletişim (uplink) için gösterilmiştir. Daha sonra, işbirlikli iletişim ile PD-NOMA'nın birlikte kullanıldığı uygulamalar ele alınarak bu konudaki literatürde yapılan çalışmalar sunulmuştur. PD-NOMA için gelecek çalışmalar ve zorluklar FRA ağları istekleri açısından tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA), Gelecek nesil radyo erişim (FRA) ağları, 5G, İşbirlikli haberleşme

Abstract

Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) has great potential to support massive connectivity and high spectral efficiency which are highly demanded by the Future Radio Access (FRA) Networks. The main idea of NOMA is to transmit signals of the multiple users on the same radio resources such as time slot and frequency band by splitting them into power or code domain. NOMA also supports the interplay with the other proposed 5G physical layer techniques such as, MIMO, cooperative communication, millimeter wave communication, cognitive radio etc. This review provides basic power domain (PD)-NOMA principles and recent PD-NOMA research. The comparison of PD-NOMA with the conventional Orthogonal Multiple Access (OMA) techniques is presented by the means of outage and capacity performances for both uplink and downlink. Then, PD-NOMA and cooperative communication applications are discussed and the existed literature for this special issue is presented. Future research directions and challenges of PD-NOMA are also discussed for the FRA networks.

Keywords: Non-orthogonal multiple access (NOMA), Future radio access (FRA) networks, 5G, Cooperative communication

1. Giriş

Çoklu erişim teknikleri, 1G'den 4G'ye kadar kablosuz haberleşme sistemlerinin tanımlanmasında en büyük etken olmuştur. 1G'de frekans-bölmeli çoklu erişim (frequency division multiple access -FDMA), 2G'de çoğunlukla zaman bölmeli çoklu erişim (time division multiple Access

-TDMA), 3G'de kod bölmeli çoklu erişim (code division multiple access -CDMA) ve son olarak 4G'de dik frekans bölmeli çoklu erişim (orthogonal frequency division multiple access -OFDMA) kullanılan dikgen çoklu erişim (orthogonal multiple access -OMA) teknikleri olmuşturlardır. Kullanılan bu geleneksel çoklu erişim tekniklerinde, farklı kullanıcılar zamanda, frekansta veya kod-bölgesinde birbirine dikgen olan radyo kaynaklarında iletişim sağlamaktadırlar. Böylece kullanıcılar arası girişim çok düşük seviyelerde olmakta ve çoğullama kazancı görece düşük karmaşıklığa sahip alıcılarda sağlanabilmektedir.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hakan.kaya@beun.edu.tr

Ferdi Kara orcid.org/0000-0001-9735-5200

Hakan Kaya orcid.org/0000-0003-4390-5363

5G ve sonrası olarak adlandırılan yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde sistem gereksinimleri oldukça değişkendir. Makineler arası iletişimin (machine-to-machine -M2M) ve nesnelerin interneti (internet of things -IoT) kavramlarının gelişmesiyle birlikte 5. nesil iletişim sistemlerinin kitlesel iletişimi (massive connection) desteklemesi gerekecektir (11). Akıllı cihazlarla birlikte artan kullanıcı hızlarına karşılık verebilmek için çok yüksek hızlarda (very high data rate) iletişiminin desteklenmesi gerekecektir (5). Kritik olarak adlandırılan uygulamaların – sağlık uygulamaları, uzaktan ameliyat, taktik radyo vb.- gerçekleştirilebilmesi için ise çok düşük gecikme (ultra low latency) olması istenmektedir. Ayrıca araçlar arası iletişim (vehicular communication) gibi uygulamalar için yüksek gezginlik (high mobility) sağlanması ve neredeyse %100'e yakın kapsama alanı (coverage) gibi isterler de bulunmaktadır (1,31). Tüm bu isterlerin sadece bir dalga formu ile gerçekleştirilmesi pek mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle bundan sonraki yeni nesil haberleşme sistemlerinin heterojen ağ yapısında olması ve uygulamaya özgü dalga formlarının kullanılması öngörülmektedir (21). Dikey sektör olarak adlandırılan bu uygulama alanlarına özgü isterleri karşılamak adına literatürde bazı fiziksel katman dalga formları önerilmiştir (21). Bunlar kitlesel çoklu giriş çoklu çıkış (multiple input multiple output -massive MIMO) sistemler, milimetre dalga haberleşmesi (milimeterwave communcation), işbirlikli iletişim (cooperative communcation) ve dikgen olmayan çoklu erişim teknikleri (non-orthogonal multiple access -NOMA) olarak öne çıkmaktadırlar (30). Bu çalışmada kitlesel erişimi desteklemesi ve sistem hızını arttırması beklenen NOMA tekniğinin üzerinde durulmuştur. NOMA'da güç ekseninde ya da kod ekseninde çoğullama yapılarak farklı kullanıcıların aynı zaman diliminde aynı frekans bandını kullanmasına izin verilmektedir. NOMA tekniği en genel olarak iki ana kategoride incelenebilir: güç eksenli çoğullama (power domain -PD) ve kod eksenli çoğullama (code domain -CD). Kod eksenli NOMA teknikleri düşük-yoğunluklu yayılım (low density spread -LDS), seyrek kodlu çoklu erişim (sparse code multiple access -SCMA), çok-kullanıcı paylaşımlı erişim (multi user shared access -MUSA) vb. gibi teknikleri içermektedir (13,16). Bu çalışmada güç-eksenli NOMA üzerinde durulduğundan bahsedilen kod-eksenli NOMA teknikleri farklı bir çalışmanın konusudur.

NOMA'nın hücrel sistemler için uygulanması görece yeni bir çalışma konusu olsa da NOMA konsepti bilgi teorisi açısından uzun yıllardır bilinen bir konudur. NOMA için

temel unsurlar olan süperpozisyon kodlaması (superposition coding -SC), ardışık girişim giderici (successive interference canceller -SIC) ve mesaj geçiş algoritması (message passing algorithm -MPA) gibi konular 1990'larda araştırılmıştır (41,43).

Bu çalışmada PD-NOMA ile ilgili olarak yapılan son araştırmaların bir özeti sunularak, Bölüm II'de aşağı yönlü ve yukarı yönlü PD-NOMA tekniğinin incelemesi yapılmıştır. Bölüm III'te İşbirlikli-NOMA konusu ele alınmıştır. Son olarak Bölüm IV'te sonuçlar derlenerek yapılması gereken çalışmalardan bahsedilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde aksi belirtilmediği sürece NOMA ifadesi PD-NOMA yerine kullanılmıştır.

2. NOMA Sistem Modeli

NOMA temelde iki veya daha fazla kullanıcının aynı radyo kaynaklarını (zaman, frekans) kullanması prensibine dayanmaktadır. Klasik dikgen çoklu erişim (OMA) tekniklerinde kullanıcılar zaman ya da frekans ekseninde farklı kaynakları kullanacak şekilde paylaştırılmışlardır. NOMA'da ise bu işlem güç ekseninde kullanıcıların farklı güç bileşenleri ile gönderilmesi ile sağlanmaktadır.

NOMA tekniğinde vericide tüm kullanıcıların sembolleri süperpozisyon kodlaması yöntemi ile farklı güç bileşenleri ile çarpılıp toplanarak gönderilir. Alıcı tarafında ise, her bir kullanıcı kendisinden daha yüksek güç bileşenine sahip olan kullanıcıların verilerini sezdikten sonra elde edilen bu bilgiyi alınan toplam işareten çıkararak kendi sembolüne ulaşır. Yapılan bu işlem ardışık girişim giderici (SIC) olarak adlandırılır.

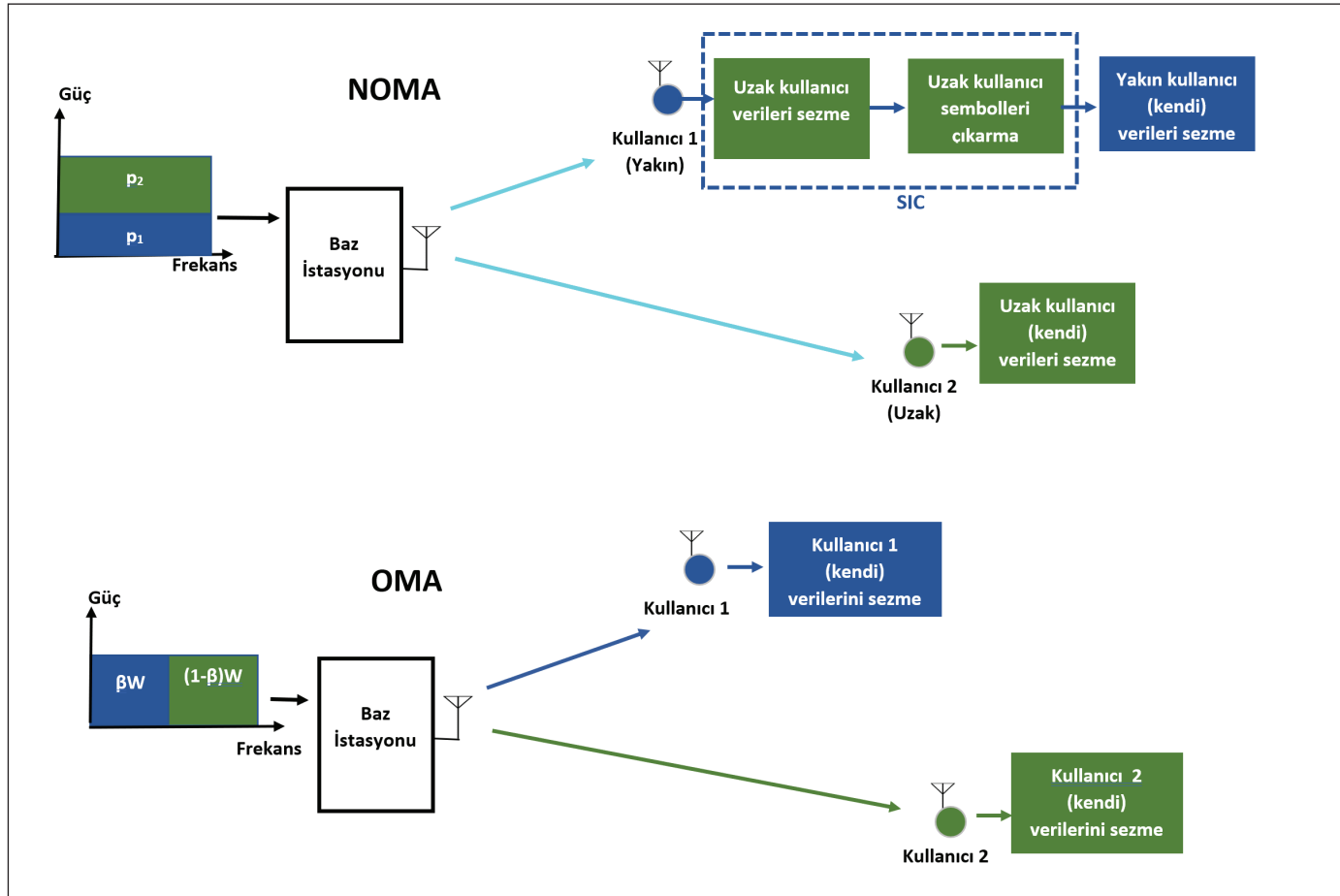
2.1. Aşağı Yönlü İletişim (Downlink)

Bu bölümde NOMA'nın baz istasyonundan gezgin kullanıcılara doğru iletişimin yapıldığı aşağı yönlü iletişimde uygulaması ele alınacaktır. Temel bir sistem modeli olarak iki kullanıcının olduğu senaryo ele alınmıştır. Baz istasyonunda ve kullanıcılarda birer antenin olduğu varsayılmıştır. Aşağı yönlü iletişim NOMA ve OMA sistemleri için Şekil 1'de gösterilmiştir.

Aşağı yönlü iletişimde baz istasyonunda her bir kullanıcıya ait olan s_i ($i = 1, 2$) sembolleri farklı p_i ($i = 1, 2$) güçleri ile iletilecektir. Baz istasyonu tarafından gönderilen işaret ve sembollerinin süperpozisyon kodlanması sonucunda

$$x = \sqrt{p_1} s_1 + \sqrt{p_2} s_2 \quad (1)$$

olarak ifade edilir.



Şekil 1. Aşağı yönlü iletişim için NOMA ve OMA sistem modellerinin gösterimi.

Her bir gezgin kullanıcı tarafından alınan işaret

$$y_i = h_i x + w_i \quad (2)$$

şeklinde verilir (35). Burada h_i baz istasyonu ile i . kullanıcı arasındaki karmaşık kanal katsayısını göstermektedir. w_i ise i . kullanıcıda oluşan hücreler-arası girişimi (inter-cell interference -ICI) da içeren $N_{0,i}/2$ güç spektral yoğunluğuna sahip toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü (additive white Gaussian noise -AWGN) ifade etmektedir.

Aşağı yönlü NOMA'da SIC işlemi gezgin kullanıcı olan alıcıda gerçekleştirilmektedir. Çözme işlemi için optimum sıra (decoding order), kanal katsayısı girişim gürültü oranının (channel gain-to-noise plus inter-cell interference ratio) $|h_i|^2/N_{0,i}$ artan sıralaması şeklindedir. Böylece her bir kullanıcı çözme sıralamasında kendinden önce gelen kullanıcının işaretini çözebilecek ve SIC işlemi ile alınan işaretten çıkarabilecektir.

İki kullanıcılu NOMA sistemi ele alınsın.

$$|h_1|^2/N_{0,1} > |h_2|^2/N_{0,2} \quad (3)$$

olduğu durumda ikinci kullanıcıda bir ardışık girişim gidericiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Çünkü; ikinci kullanıcı çözme sırasında ilk sıradadır. Bu senaryoda ikinci kullanıcı birinci kullanıcının sembolüne gürültü gibi davranacak sezme işlemi gerçekleştirecektir. Birinci kullanıcı ise öncelikle ikinci kullanıcının sembolü olan s_2 sembollerini sezme işlemi gerçekleştirecek ve kendi sembollerini bulabilmek için sezilen \hat{s}_2 sembollerini alınan y_1 işaretinden çıkaracaktır. SIC işlemi en büyük olasılıklı (maximum likelihood -ML) sezici kullanılarak iki aşamada gerçekleştirilir. Öncelikle yakın kullanıcıda alınan y_1 işaretinden,

$$\hat{m} = \arg \min_{1 \leq m \leq M_1} \|y_1 - s_{2,m}\| \quad (4)$$

karar kuralına göre sezilen \hat{s}_2 işaretine karar verilir. Burada $s_{2,m}$, uzak kullanıcı işaret-yıldız kümesindeki olası tüm sembollerini gösterir ve M_1 modülasyon seviyesi olarak tanımlanır (33). Daha sonra sezilen \hat{s}_2 işareti alınan toplam işaretten çıkarılır ve

$$\tilde{y}_1 = y_1 - \sqrt{p_2} h_1 \hat{s}_2 \quad (5)$$

elde edilir. Çıkarma işleminden sonra elde edilen \tilde{y}_1 işaretinden yine ML karar kuralı

$$\hat{m} = \arg \min_{1 \leq m \leq M_2} \|\tilde{y}_1 - s_{1,m}\| \quad (6)$$

göre \hat{s}_1 işaretine karar verilir. Burada ise, $s_{1,m}$ yakın kullanıcı işaret-yıldız kümesindeki tüm sembolleri gösterirken M_2 yakın kullanıcı modülasyon seviyesini ifade eder.

Bu durumda her iki kullanıcı içinde ulaşılabilecek maksimum Shannon hızı (kapasitesi):

$$R_1 = \log_2(1 + p_1 |h_1|^2 / N_{0,1}) \quad (7a)$$

$$R_2 = \log_2\left(1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{(p_1 |h_2|^2 + N_{0,2})}\right) \quad (7b)$$

şeklinde verilebilir [35].

Klasik OMA tekniklerinin kullanıldığı aşağı yönlü iletişimde, birinci kullanıcıya $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ Hz bant genişliğinin, geriye kalan $1 - \beta$ Hz bantın ise ikinci kullanıcıya ayrıldığını düşünelim. Bu durumda kullanıcılar için ulaşabilecek hız (kapasite):

$$R_1 = \beta \log_2(1 + p_{tot} |h_1|^2 / \beta N_{0,1}) \quad (8a)$$

$$R_2 = (1 - \beta) \log_2(1 + p_{tot} |h_2|^2 / (1 - \beta) N_{0,2}) \quad (8b)$$

olarak hesaplanır (36). Burada $p_{tot} = p_1 + p_2$ baz istasyonu tarafından aktarılan toplam güç ifadesidir.

NOMA için güç paylaşımı katsayısı α olmak üzere;

$$p_1 = \alpha p_{tot} \quad (9a)$$

$$p_2 = (1 - \alpha) p_{tot} \quad (9b)$$

$$0 < \alpha \leq 0.5 \quad (9c)$$

olarak tanımlanır (35).

Aşağı yönlü iletişim için OMA ve NOMA için kapasite bölgeleri Şekil 2'de verilmiştir.

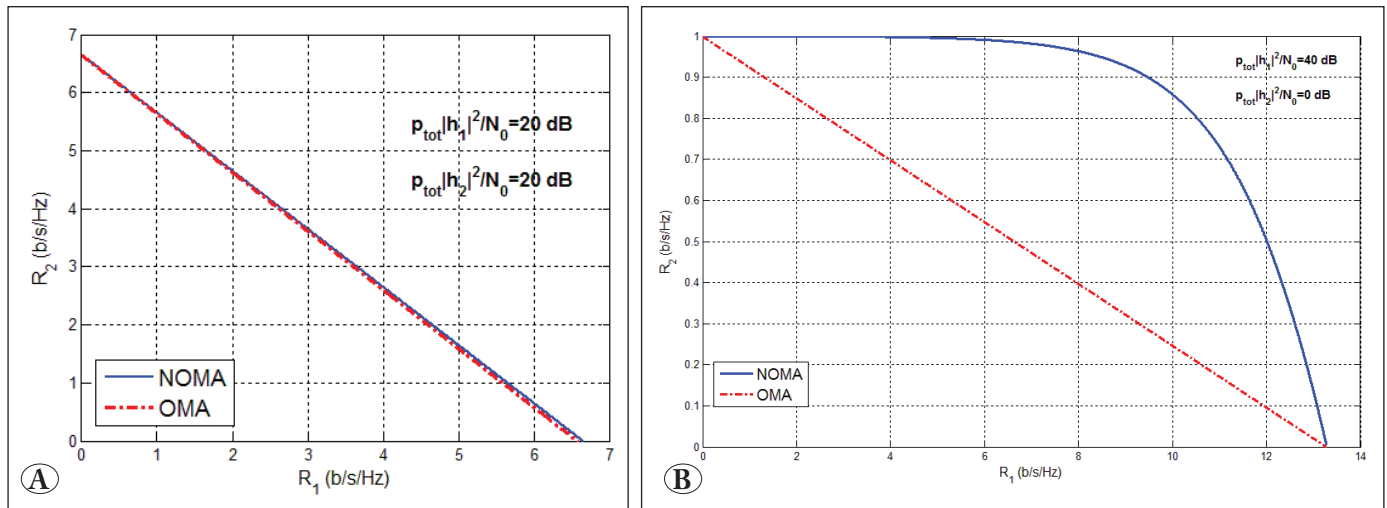
Şekil 2'de görüldüğü gibi, kanal katsayılarının eşit olduğu simetrik kanalda NOMA ile OMA kapasite bakımından aynı performansı göstermektedir. Fakat, kanal katsayılarının farklı olduğu asimetrik kanalda NOMA toplam kapasite performansı açısından OMA'ya üstünlük sağlamaktadır. Örneğin, OMA'da yakın kullanıcı 8 bit/sn/Hz bant verimliliği ile iletişim yapar iken uzak kullanıcının ulaşabileceği maksimum spektral verimlilik 0.398 bit/sn/Hz olmaktadır. Diğer taraftan NOMA'da yakın kullanıcının aynı bant verimliliği ile iletişim sağladığı durumda uzak kullanıcı 0.964 bit/sn/Hz spektral verimliliğine ulaşabilmektedir. Uzak kullanıcı için spektral verimlilik %242 artmıştır. Bu durum her iki kullanıcının da tüm bant genişliğini aynı zaman diliminde kullanmasından kaynaklanmaktadır.

Aşağı yönlü NOMA tekniğinin performansını inceleyen çok sayıda çalışma yapılmıştır (7,10,16,19,24,26,32,34,35,38,39,45). Bu çalışmalarda iki kullanıcı bir NOMA sistemi için sistemin kesinti olasılığı ve toplam kapasitesi araştırılmıştır. Kesinti olasılığı performansı kullanıcıların servis kaliteleri (QoS) isterleri göz önünde bulundurularak elde edilmiştir.

Her bir kullanıcıda istenen kapasite- hız- $\dot{R}_i \dots i = 1, 2$. (hedef hız -QoS isteri-) olmak üzere, belli bir kullanıcının kesintiye uğrama olayı $0(R_i < \dot{R}_i)$ olarak tanımlanmıştır. Buna göre kesinti olasılığı

$$P_{i,out} = P_r(R_i < \dot{R}_i) \quad (10)$$

olarak bulunur (19).



Şekil 2. Aşağı yönlü iletişim için NOMA ve OMA'nın kapasite bölgelerinin karşılaştırılması. A) Simetrik kanal, B) Asimetrik kanal.

Uzak kullanıcı için kesinti olasılığın ifadesi

$$P_{2,out} = P_r(R_2 < \dot{R}_2) \quad (11a)$$

$$P_{2,out} = P_r\left(\log_2\left(1 + \frac{(1-\alpha)p_{tot}|h_2|^2}{(\alpha p_{tot}|h_2|^2 + N_{0,2})}\right) < \dot{R}_2\right) \quad (11b)$$

olarak bulunur. Yakın kullanıcı için kesinti olasılığın ifadesi ise,

$$P_{1,out} = \begin{cases} 1, & \log_2\left(1 + \frac{(1-\alpha)p_{tot}|h_1|^2}{(\alpha p_{tot}|h_1|^2 + N_{0,1})}\right) < \dot{R}_2 \\ P_r\left(\log_2\left(1 + \frac{(1-\alpha)p_{tot}|h_1|^2}{N_{0,1}}\right) < \dot{R}_1\right), \end{cases} \quad (12)$$

olarak ifade edilir (23). Buradaki koşul ifadesi yakın kullanıcıda gerçekleşen SIC işleminden kaynaklanmaktadır. Eğer SIC öncesi yakın kullanıcıda, uzak kullanıcının istenen veri hızı sağlanamıyor ise bu yakın kullanıcının kesintiye uğraması anlamını taşımaktadır (19).

Her bir kullanıcı için ortalama hız

$$\bar{R}_i = E[R_i] \quad (13)$$

olarak ifade edilir. Burada $E[.]$ beklenen değer operatörüdür.

Ortalama toplam hız ise,

$$\bar{S}_R = \sum_{i=1}^M \bar{R}_i \quad (14)$$

olarak ifade edilir (8).

Daha genel bir çalışma olan (19)'da R_D yarıçaplı bir D hücrede rastgele dağılmış olan M adet kullanıcı için aşağı yönlü NOMA tekniğın ele alınmıştır. NOMA'nın hem kesinti olasılığın hem de ortalama toplam hız performansı açısından OMA'ya göre daha üstün olduğu gösterilmiştir. [40]'da kullanıcılar arası eşitsizlik durumuna dikkat çekilerek M kullanıcı için aşağı yönlü NOMA'da uygun güç paylaşım katsayılarının elde edilmesi için algoritmalar önerilmiştir. Ayrıca M adet kullanıcı bulunan bir NOMA sistemi için kullanıcıların gruplanarak kendi aralarında NOMA kullanması ve her bir grubun dikgen kaynaklara atanması durumunda toplam kapasite performansları araştırılmıştır (4). (32)'de ise iki kullanıcı için aşağı yönlü NOMA tekniğında güç paylaşım katsayısının ne olması gerektiğın kesinti olasılığın açısından ele alınmıştır. Güç paylaşım katsayısı olan için kanal katsayılarına bağılı olarak bir alt sınır ve üst sınır ifadesi teorik olarak türetilmiştir.

Kanal durum bilgisinin (channel state information -CSI) verici tarafında bilinmesi için gerekli olan işaretleşmenin azaltılması adına bazı araştırmacılar vericide kısmi CSI

bulunması durumunda aşağı yönlü NOMA tekniğının performans analizlerini yapmışlardır (12,37,47). Özellikle de aşağı yönlü NOMA için kesinti olasılığın performansı mükemmel olmayan CSI ve ikinci dereceden istatistiksel tabanlı CSI durumları için elde edilmiştir (37). (49)'da aşağı yönlü NOMA tekniğında kullanıcıların farklı veri hızları istemleri şartı altında enerji verimliliğın açısından optimizasyonu araştırılmıştır. NOMA'nın enerji verimliliğın açısından da OMA'ya üstünlük sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca aşağı yönlü NOMA'nın sistem seviyesi performanslarını inceleyen çalışmalar da yapılmıştır (6,34). Sistem seviyesi simülasyonlarında performans ölçütü olarak sistemin toplam hızının toplam dağılım fonksiyonunu ele alınmıştır. Bu performans ölçütü altında da NOMA'nın OMA'ya üstünlük sağladığı gözlenmiştir.

Şekil 3'te aşağı yönlü iletişim için iki kullanıcı için NOMA tekniğinin kesinti olasılığın performansları verilmiştir. Kanal katsayıları yol kaybını da içeren Rayleigh sönümlenmeli olarak alınmıştır. Yakın ve uzak kullanıcı için ortalama kanal güçleri sırasıyla $\Omega_1 = -6dB$ ve $\Omega_2 = -10dB$ kabul edilmiştir. Güç paylaşım katsayısı $\alpha = 0.2$ alınmıştır. Şekil 3(a)'da kullanıcılar için hedef/istenen hız (QoS istemleri) sırasıyla $R_1 = 0.5BPCU$ (birim kanal başına bit sayısı) ve $R_2 = 0.1BPCU$ olacak şekilde seçilmiştir. NOMA tekniğinin geleneksel OMA tekniklerine göre daha iyi bir kesinti olasılığın performansına sahip olduğu açıkça gözükmektedir. NOMA kullanıcıları arasında ise, düşük işaret gürültü oranı (signal-to-noise ratio -SNR) bölgelerinde uzak kullanıcı ile yakın kullanıcı aynı kesinti olasılığın performansına sahipken, yüksek SNR bölgelerinde yakın kullanıcının daha iyi performansa sahip olduğu gözükmektedir. Bu durum düşük SNR'de yakın kullanıcıda uzak kullanıcıya ait QoS istemlerinin sağlanamaması sonucu yakın kullanıcının da SIC sonrasında kesintiye uğramasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3(b)'de ise farklı QoS istemleri için kesinti olasılığın performansları gösterilmiştir. Bazı senaryolarda NOMA'da her iki kullanıcı için de kesinti olasılığının tüm SNR bölgelerinde 1 olduğu gözükmektedir. Bu durum seçilen güç paylaşım katsayısı ile NOMA'nın istemleri karşılayamamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle güç paylaşım katsayılarının ve QoS istemlerine göre doğru seçilmesi son derece önemlidir.

2.2. Yukarı Yönlü İletişim (Uplink)

Yukarı yönlü iletişimde her bir i kullanıcı için iletmek istediğın s_i işaretini p_i gücü ile baz istasyonuna gönderecektir. Yukarı yönlü iletişim için iki kullanıcının bulunduğu NOMA ve OMA sistemleri Şekil 4'te gösterilmiştir.

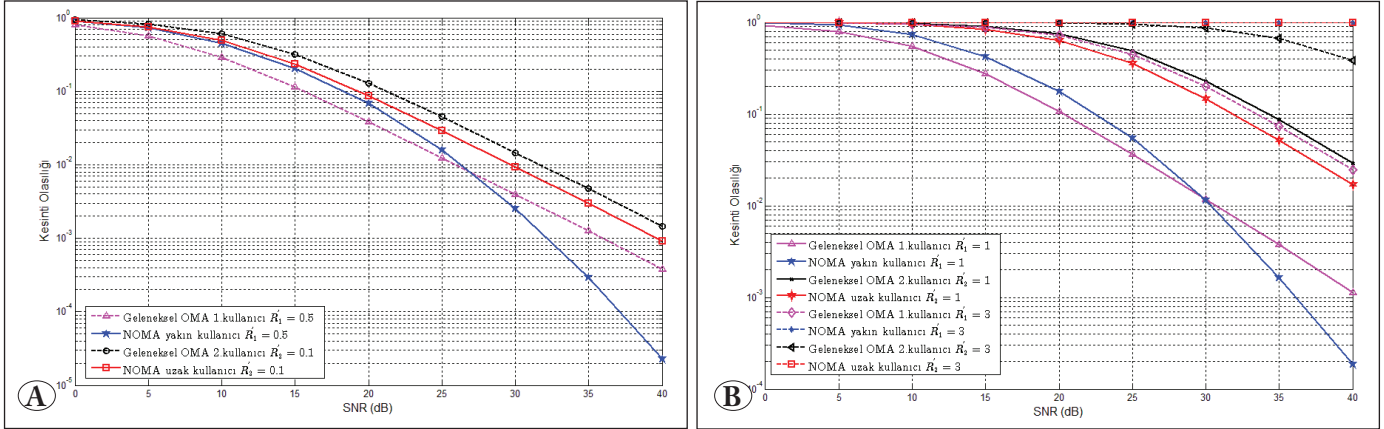
İki kullanıcılu bir yukarı yönlü NOMA sistemi ele alırsanız baz istasyonunda alınan işaret,

$$y = \sqrt{p_1}h_1s_1 + \sqrt{p_2}h_2s_2 + w \quad (15)$$

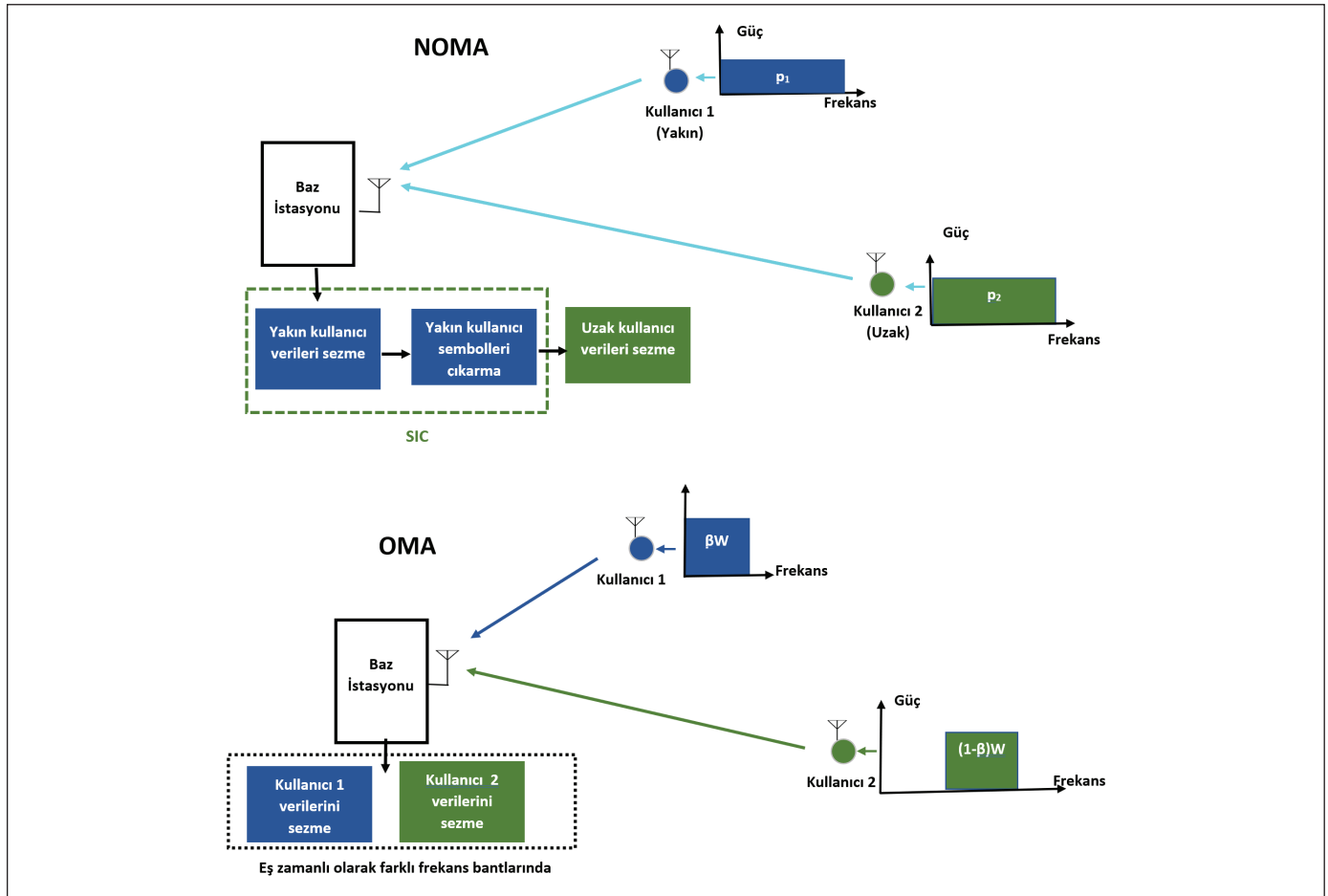
şeklinde olacaktır (2). Burada w hücreler arası girişimi da

içeren Gauss gürültüsüdür; w için güç spektral yoğunluğu $N_0/2$ olarak verilir.

NOMA'da s_1 ve s_2 aynı frekans bandı üzerinden iletil-



Şekil 3. Aşağı yönlü iletişim için NOMA ve OMA'nın kesinti başarımlarının karşılaştırılması A) $\dot{R}_1 = 0.5BPCU$ ve $\dot{R}_2 = 0.1BPCU$ B) $\dot{R}_1 = \dot{R}_2 = 1BPCU$ ve $\dot{R}_1 = \dot{R}_2 = 3BPCU$.



Şekil 4. Yukarı yönlü iletişim için NOMA ve OMA sistem modellerinin gösterimi.

diğinden birbirlerine girişim yapacaklardır. Yukarı yönlü iletişimde SIC, alıcı olan baz istasyonunda gerçekleştirilecektir. SIC kullanılarak gerçekleştirilen alıcıda s_1 ve s_2 iki aşamada elde edilecektir. Öncelikle, alıcı s_2 'ye Gauss gürültüsü gibi davranacak ve s_1 işareti sezilecektir. s_1 işareti doğru bir şekilde sezildikten sonra ise alıcıya gelen y toplam işaretenin sezilen s_1 işareti çıkarılarak s_2 işaretinin sezimi yapılacaktır. İki kullanıcılu bir NOMA sistemi için ulaşılabilecek maksimum hız -kapasite- aşağıdaki gibi verilir (23):

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{(p_2 |h_2|^2 + N_0)} \right) \quad (16a)$$

$$R_2 = \log_2 (1 + p_2 |h_2|^2 / N_0). \quad (16b)$$

İki kullanıcılu yukarı yönlü iletişimde aynı kapasiteler OMA için aşağıdaki gibi verilir (36):

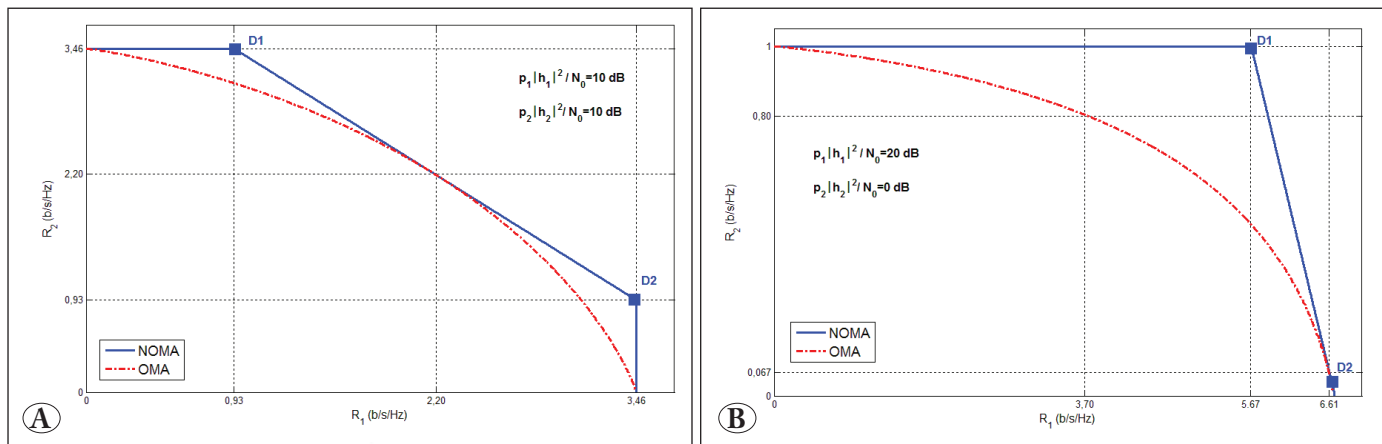
$$R_1 = \beta \log_2 (1 + p_1 |h_1|^2 / \beta N_0) \quad (17a)$$

$$R_2 = (1 - \beta) \log_2 \left(1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{(1 - \beta) N_0} \right). \quad (17b)$$

Şekil 5'te simetrik ve asimetrik kanallar için kapasite bölgeleri verilmiştir. Kanal katsayılarının eşit olduğu simetrik kanalda NOMA için kapasite bölgesi incelendiğinde D1 noktası öncelikli olarak 1. kullanıcının sezildiği noktayı, D2 noktası ise öncelikli olarak 2. kullanıcının verisinin sezme işlemine tabi tutulduğu noktaları göstermektedir. D1-D2 doğrusu NOMA için ulaşılabilecek maksimum spektral verimliliği göstermektedir. Simetrik kanalda OMA için de bu maksimum spektral verimlilik noktasına ulaşıldığı gözükse de bu yalnızca tek bir nokta için mümkün olmaktadır. Asimetrik kanaldaki kapasite bölgeleri incelendiğinde ise NOMA'nın yine OMA'ya göre daha iyi bir toplam spektral verimlilik sağladığı açıkça gözükmektedir. OMA tekniğinin maksimum spektral verimliliğe ulaştığı noktada kullanıcılar

arasındaki hız dağılımı oldukça adaletsiz (unfair) olmaktadır. OMA'nın toplam olarak maksimum spektral verimliliğe ulaştığı noktada OMA tekniğindeki uzak kullanıcı spektral verimliliğinin, NOMA için toplam maksimum spektral noktadaki uzak kullanıcı spektral verimliliğine göre 15 kat daha az olduğu görülmektedir. Bu durum OMA'da maksimum spektral verimliliğe ulaşabilmek için radyo kaynağının -zaman veya bant- büyük bir çoğunluğunun yakın kullanıcıya ayrılmasından kaynaklanmaktadır. NOMA'da tüm radyo kaynakları her iki kullanıcı tarafından da kullanıldığı için bu durum ortaya çıkmamaktadır. Buradan NOMA tekniğinin özellikle hücre kenarı (uzak) kullanıcılar için daha adil bir hız paylaşımı vadettiği sonucuna varılabilmektedir.

Yukarı yönlü iletişimde NOMA kullanımını araştıran çalışmalar görece aşağı yönlü iletişime göre daha az sayıda yapılmıştır (2,3,9,14,18,23,42,46,48). (23)'te yazarlar yukarı yönlü iletişimde NOMA için kapasite bölgelerini hem simetrik kanallarda hem de asimetrik kanallarda tanımlamışlardır. Kanal durumlarındaki fark arttıkça NOMA'nın OMA'ya göre avantajının arttığını göstermişlerdir. (2)'de yazarlar klasik OFDMA için yeni bir NOMA şeması önermişlerdir. Önerilen NOMA yönteminin geleneksel OMA'ya göre hem spektral verimlilik hem de kullanıcılar arası eşitlik bakımından daha iyi bir performans gösterdiği gözlenmiştir. (3)'te ise [2]'de ek olarak yeni bir çok kullanıcılu tekrarlamalı sezici (multiuser iterative detector) önerilmiştir. Gerçeklenme karmaşıklığını azaltmak için de yazarlar kullanıcı gruplama algoritması kullanmışlardır. (22)'de yazarlar asenkron yukarı yönlü NOMA için Bit Hata Oranı (BHO) ifadelerini göstermişlerdir. (2)'de ise kodlamasız ve kodlamalı yukarı yönlü NOMA için BHO performansları için benzetim sonuçları sunulmuştur.



Şekil 5. Yukarı yönlü iletişim için NOMA ve OMA kapasite bölgelerinin karşılaştırılması. A) Simetrik kanal, B) Asimetrik kanal.

Şekil 6'da iki kullanıcılu yukarı yönlü NOMA için kullanıcıların kesinti olasılığı performansları kullanıcıların verici SNR'sine göre sunulmuştur. Kesinti olayı aşağı yönlü iletişimde olduğu gibi kullanıcıların QoS isterlerinin karşılanmadığı durum (Denklem (10)) olarak ifade edilir. Benzetim sonuçları yol kaybını da içeren Rayleigh sönümlenmeli kanal modeli için verilmiştir. Yakın ve uzak kullanıcı için ortalama kanal güçleri sırasıyla $\Omega_1 = 0dB$ ve $\Omega_2 = -10dB$ olarak alınmıştır. Yakın kullanıcı için QoS isterlerinin $\dot{R}_1 = 1.2BPCU$, uzak kullanıcının ise $\dot{R}_2 = 0.5, 1BPCU$ olarak belirlendiği durumlar için sonuçlar verilmiştir. NOMA'nın kesinti olasılığı açısından OMA'ya göre daha iyi bir performansa sahip olduğu gözükmektedir. Fakat, QoS isterlerinin yüksek olduğu durumlarda ($\dot{R}_1 = 2BPCU$ ve $\dot{R}_2 = 1BPCU$) NOMA'nın kullanıcılar arası girişimden kaynaklı olarak bu isterleri sağlayamadığı ve kesinti olasılığının 1'e yaklaştığı gözükmektedir.

(42)'de iki kullanıcılu bir yukarı yönlü NOMA iletişimde her iki kullanıcının da QPSK kullandığı durumda kullanıcıların bit hata oranı performansı araştırılmıştır. Kanal katsayılarının sabit kabul edildiği bu senaryoda AWGN kanalda BHO için kapalı form ifadeler türetilmiştir.

Şekil 7'de yakın kullanıcı işaret gürültü oranı (SNR1)'nin 12dB ve 15dB olduğu durumlarda artan SNR2 değerine göre her iki kullanıcının da BHO performansları verilmiştir. SNR2 değeri arttıkça yakın kullanıcının hata performansı kötüleşmektedir. Bu da gürültü olarak eklenen uzak kullanıcı verisinin gücünün artmasından kaynaklı olarak beklenen bir sonuçtur. Ayrıca SNR1'in olduğu durumda SNR2'nin yaklaşık değerinden sonra SNR1in olduğu durumda ise SNR2'nin yaklaşık değerinden sonra uzak kullanıcının performans eğrisinin tekrar kötüleştiği gözükmektedir. Bu da gerçekleştirilen SIC'da öncelikli sezilen yakın kullanıcı verilerinin hatalı sezilmesinde kaynaklı olarak beklenen bir sonuçtur. Bu durum SIC işleminde hata yayılımı olarak adlandırılabilir.

3. NOMA ve İşbirlikli İletişim

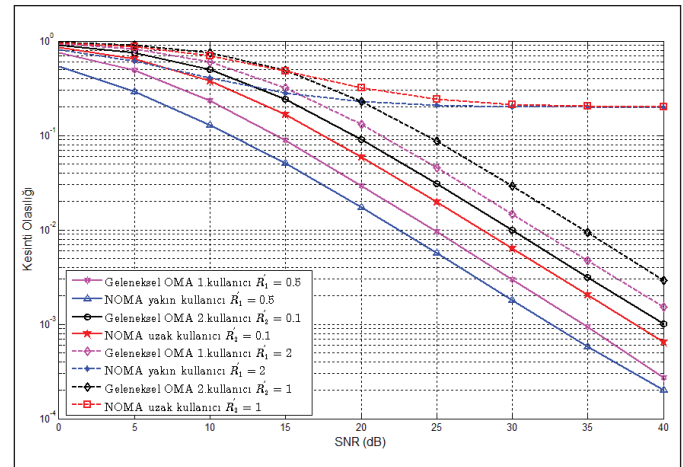
Bu bölümde, İşbirlikli-NOMA sistemi ele alınacaktır. İşbirlikli-NOMA iki ana grupta incelenebilir.

3.1. NOMA Kullanıcıları Arasında İşbirliği

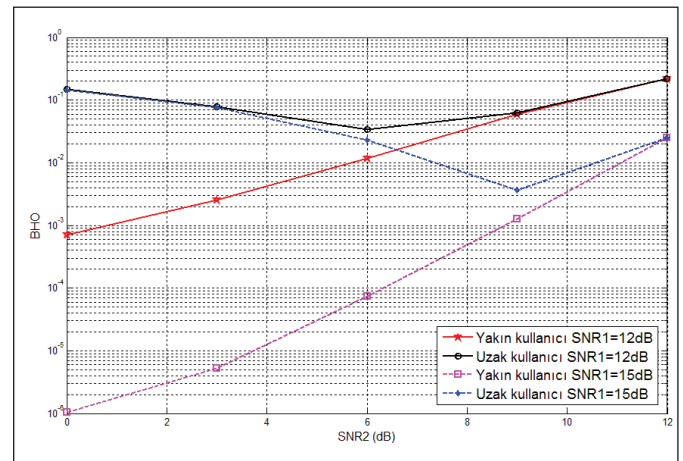
Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA fikri yüksek kanal katsayısına sahip kullanıcılarda gerçekleştirilen SIC'in olağan bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. İki kullanıcılu bir NOMA sisteminde, vericiye yakın kullanıcıda kullanılan SIC öncelikli olarak

uzak kullanıcının verisini sezecek ve toplam sembolden bunu çıkararak kendisine ait sembolü bulabilecektir. Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA tekniğinde yakın kullanıcıda öncelikli olarak sezilen bu uzak kullanıcı verisi, yakın kullanıcı vasıtasıyla uzak kullanıcıya gönderilmektedir (17). Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA sistemi Şekil 8'de gösterilmiştir.

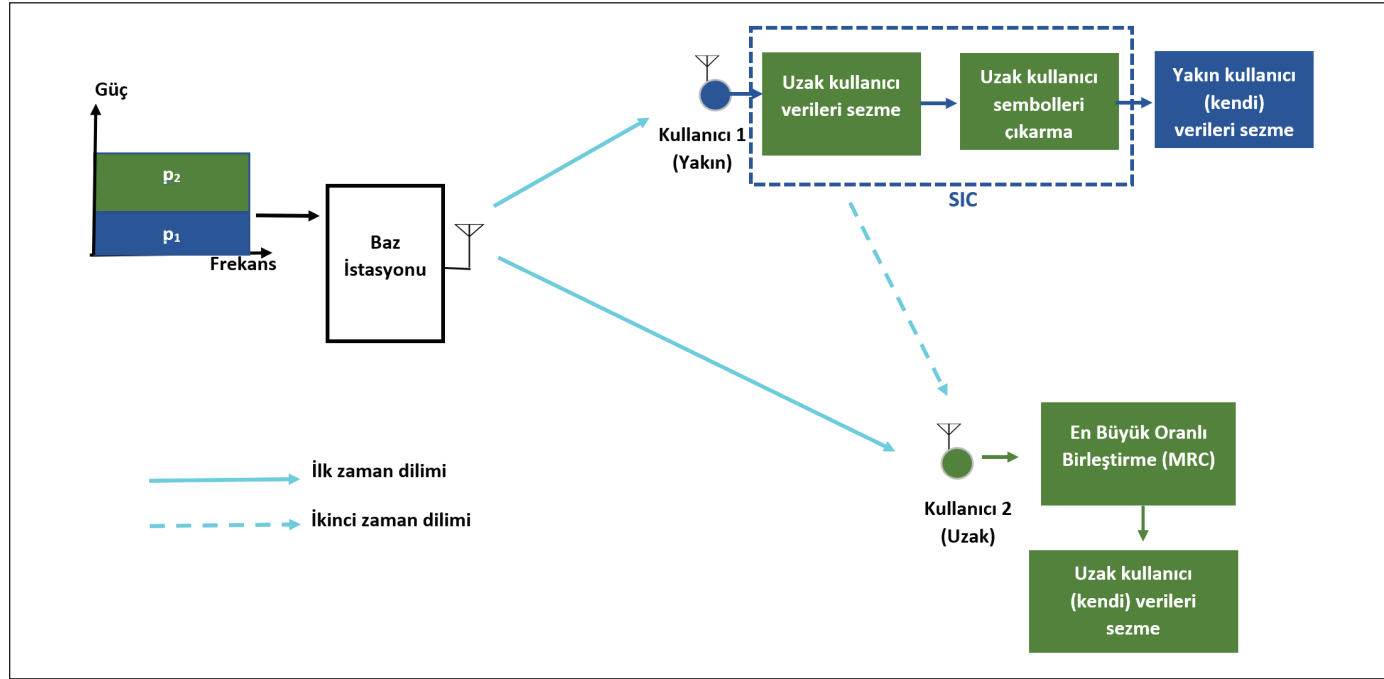
Burada ilk zaman diliminde klasik PD-NOMA tekniği uygulanmakta ve her iki kullanıcıya ait veriler süperpozisyona uğramış biçimde alıcılardan alınmaktadır. Birinci zaman diliminde her iki kullanıcı da kendisine ait veriye ulaşabilmek için gerekli sezme işlemlerini yapmaktadırlar. İkinci zaman diliminde ise yakın kullanıcıda birinci zaman diliminde elde edilen uzak kullanıcı sembolü uzak kullanıcıya gönderilmektedir. İkinci zaman diliminde ise uzak kullanıcı ilk zaman diliminde kendisinin sezdiği sembol ile ikinci zaman diliminde yakın kullanıcıdan gelen



Şekil 6. Yukarı yönlü iletişim için NOMA ve OMA'nın kesinti başarımlarının karşılaştırılması.



Şekil 7. Yukarı yönlü iletişim için kullanıcıların BHO başarımları.



Şekil 8. Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA sistem modelinin gösterimi.

sembolü en büyük oranlı birleştirme (maximum ratio combining -MRC) uygulayarak birleştirmekte ve alınan veriye karar vermektedir.

İlk zaman diliminde kullanıcılarda alınan işaretler,

$$y_1 = \sqrt{\alpha P_s} h_{s,1} x_1 + \sqrt{(1-\alpha) P_s} h_{s,1} x_2 + w_{s,1} \quad (18.a)$$

$$y_{s,2} = \sqrt{\alpha P_s} h_{s,2} x_1 + \sqrt{(1-\alpha) P_s} h_{s,2} x_2 + w_{s,2} \quad (18.b)$$

ve ikinci zaman diliminde uzak kullanıcıda alınan işaret

$$y_{r,2} = \sqrt{P_r} h_{r,2} \tilde{x}_2 + w_{r,2} \quad (19)$$

olarak ifade edilir (17,25,27). Burada P_s kaynak (verici) toplam gücünü, P_r ise röle olarak kullanılan yakın kullanıcının gücünü ifade etmektedir. $h_{s,1}$, $h_{s,2}$ ve $h_{r,2}$ sırasıyla verici ile yakın kullanıcı, verici ile uzak kullanıcı ve röle olarak kullanılan yakın kullanıcı ile uzak kullanıcı arasındaki yol katsayılarını ifade etmektedir. \tilde{x}_2 yakın kullanıcıda sezilen uzak kullanıcı sembollerini göstermektedir. w 'lar ise $N_0/2$ güç spektral yoğunluğuna sahip toplamsal Gauss gürültülerini ifade etmektedir.

MRC sonucunda uzak kullanıcıda alınan toplam işaret,

$$y_2 = h_{s,2} * y_{s,2} + h_{r,2} * y_{r,2} \quad (20)$$

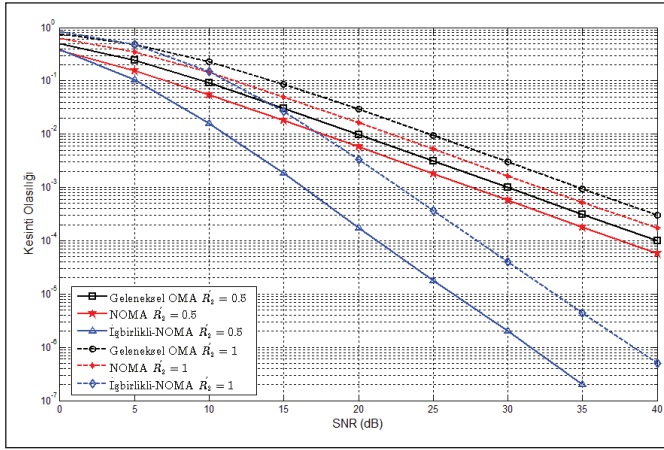
biçimindedir (17). Burada $*$ kompleks eşlenik işlemini göstermektedir.

(17)'de NOMA kullanıcıları arasında işbirliği sistemi önerilmiştir. Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA sisteminin uzak

kullanıcı için iki zaman dilimine ihtiyaç duymasına rağmen İşbirlikli-OMA sistemlerine göre daha iyi bir kapasite performansı sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA sisteminin klasik NOMA sistemlerine göre hücre kenarı kullanıcı için daha iyi bir kesinti olasılığı performansına sahip olduğu gözlenmiştir. Sistemin çeşitlilik derecesi de 2 olacaktır.

Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA'da kullanılan iki zaman diliminden kaynaklı kapasitede performans kaybına çözüm için yakın kullanıcıda tam çift yönlü iletişim önerilmiştir (50,52). Böylece işbirlikli iletişim için ayrılan zaman diliminin getirdiği dezavantajın önüne geçilmiş olacaktır. Bu sistemde yakın kullanıcı baz istasyonundan kendisine ait verileri sezerken aynı zaman diliminde uzak kullanıcı için röle görevini yerine getirecektir.

Şekil 9'da kullanıcılar arasında NOMA kullanılması durumunda kesinti olasılığı performansı sonuçları verilmiştir. Güç paylaşım katsayıları yakın ve uzak kullanıcı için (0,2, 0,8) olarak seçilmiştir. Tüm ekipmanların tek antenli olduğu durum ele alınmış ve düğümler arasındaki kanalların yol kaybını da içeren Rayleigh sönümlenmeli olduğu varsayılmıştır. Baz istasyonu ile yakın kullanıcı, baz istasyonu ile uzak kullanıcı ve yakın kullanıcı ile uzak kullanıcı arasındaki ortalama kanal güçleri sırasıyla $\Omega_{s,1} = 3dB$, $\Omega_{s,2} = 0dB$ ve $\Omega_{1,2} = 3dB$ olarak alınmıştır. İşbirlikli iletişimin kullanıldığı uzak kullanıcıda her iki QoS



Şekil 9. Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA hata başarımlarının geleneksel OMA ve klasik NOMA sistemleri ile karşılaştırılması.

isteri için de ($R_2 = 0.5BPCU$ ve $R_2 = 1BPCU$) Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA tekniğinin iki zaman dilimi kullanmasına rağmen daha iyi bir kesinti olasılığı performansına sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA için sistemin çeşitlilik derecesi 2'dir. Bu durum ilk zaman diliminde baz istasyonundan ve ikinci zaman diliminde yakın kullanıcıdan gelen verilerin bağımsız yol katsayılarına sahip olmaları ve MRC kullanılarak birleştirilmesinin doğal bir sonucudur. QoS isterlerinin değişmesi tıpkı klasik NOMA sistemlerinde olduğu gibi kesinti olasılığı performansını etkileyecektir. Hedef hızların çok artması durumunda Şekil 3(b)'de verilen klasik NOMA sistemine benzer şekilde kullanıcılar sürekli olarak servis dışı kalacaklardır.

3.2. NOMA Kullanıcıları için Atanmış Röleler

İşbirlikli NOMA sisteminin bir diğer formu ise NOMA kullanıcıları için atanmış rölelerin bulunduğu/röle yardımcı (relay-aided) senaryodur. Bu sistem Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu sistemin önerilmesindeki amaç hücre kenarındaki kullanıcılar için spektral verimliliğin artırılmasıdır. Hücre kenarında bulunan iki kullanıcı ile iletişim yapılmak istendiği varsayımı altında, bu kullanıcılar için atanmış röle yardımıyla iletişim iki zaman diliminde tamamlanacaktır. Birinci zaman diliminde baz istasyonunda röleye gönderilen toplam işaret -süperpozisyon kodlanmış- ikinci zaman diliminde röleden NOMA kullanıcılarına gönderilecektir. İkinci zaman diliminde klasik NOMA prensiplerine göre kullanıcılar kendilerine ait verileri alabileceklerdir. Fakat aynı durumda İşbirlikli-OMA sistemi kullanılmış olsaydı iletişimin gerçekleşmesi için gereken toplam süre 4 zaman dilimi olacaktı. Sağlanan spektral verimlilik iletişim için gerekli olan toplam sürenin 4 zaman diliminden 2 zaman dilimine düşmesinden kaynaklanmaktadır. Röle-Yardımlı-

NOMA sisteminin avantajları araştırılmıştır (29). Ayrıca belirlenen rölenin kullandığı protokole göre sistem performansının nasıl değiştiğini araştıran çalışmalar da mevcuttur (25,28,44,51).

İlk zaman diliminde baz istasyonundan ortamda bulunan vericiye gönderilen işaret,

$$y_r = \sqrt{\alpha P_s} h_{s,r} x_1 + \sqrt{(1-\alpha) P_s} h_{s,r} x_2 + w_{s,r} \quad (21)$$

olarak tanımlanabilir (15). Burada P_s verici gücünü, $h_{s,r}$ verici ile röle arasındaki yol katsayısını ve $w_{s,r}$ toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü göstermektedir. x_1 ve x_2 ise kullanıcılara ait sembollerini ifade etmektedir. Rölede alınan toplam y_r sembolü, rölenin kullandığı protokole göre ya kuvvetlendir aktar (amplify forward -AF) röle ya da çöz aktar (decode forward -DF) röle kullanılarak son kullanıcılara iletilir. AF röle kullanılması durumunda ikinci zaman diliminde kullanıcılarda alınan işaretler,

$$y_1 = \sqrt{P_r} h_{r,1} y_r + w_{r,1} \quad (22.a)$$

$$y_2 = \sqrt{P_r} h_{r,2} y_r + w_{r,2} \quad (22.b)$$

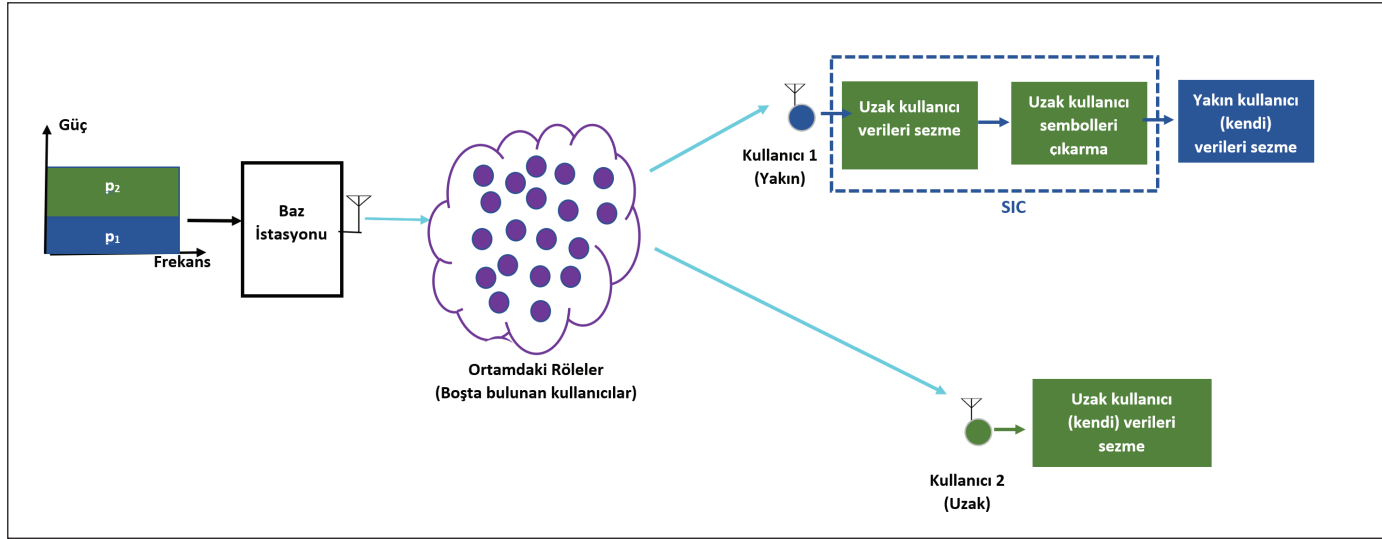
ve DF kullanılması durumunda ise kullanıcılarda alınan işaretler,

$$y_1 = \sqrt{g P_r} h_{r,1} x'_r + \sqrt{(1-g) P_r} h_{r,1} x'_2 + w_{r,1} \quad (23.a)$$

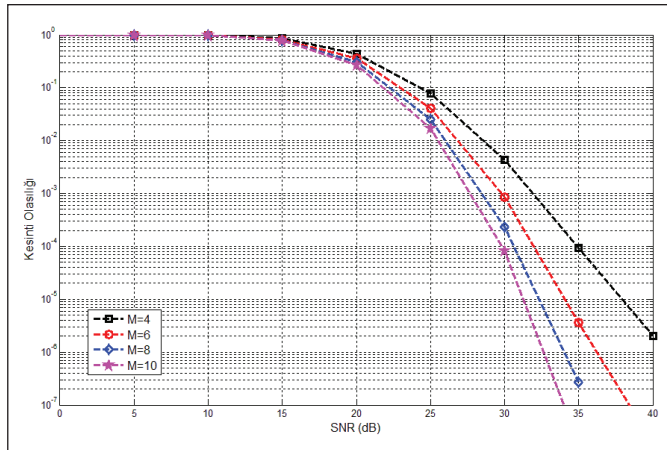
$$y_2 = \sqrt{g P_r} h_{r,2} x'_r + \sqrt{(1-g) P_r} h_{r,2} x'_2 + w_{r,2} \quad (23.b)$$

olarak verilir (20). Burada P_r röledeki toplam iletilen gücü, g rölede gerçekleştirilen güç paylaşım katsayısını, $h_{r,1}$ ve $h_{r,2}$ röle ile kullanıcılar arasındaki kanal katsayısını göstermektedir. x'_1 , x'_2 ise rölede çözülüp tekrar modüle edilen yakın ve uzak kullanıcı sembollerini göstermektedir.

Röle-Yardımlı-NOMA için bir diğer motivasyon ise ortamda boşta (idle) duran kullanıcıların röle olarak kullanılması ile sistem kapsama alanının artırılmasıdır (16). Ortamda çok sayıda boşta kullanıcının bulunması durumunda hangi kullanıcının röle olarak kullanılması gerektiği NOMA için ilk kez (15)'te araştırılmıştır. Bu çalışmanın ilginç bir sonucu ise, klasik işbirlikli sistemler için optimum çözüm olan max-min röle seçim yönteminin Röle-Yardımlı-NOMA için optimum olmadığını ispatlanmasıdır. Bu nedenle yeni bir iki aşamalı röle seçim algoritması önerilmiştir. Bu röle seçim algoritmasında kullanıcılar klasik işbirlikli sistemlerin aksine kanal kalitelerine göre değil QoS isterlerine göre sıralanmaktadır. Birinci aşamada kullanıcıların servis kalitelerini sağlayabilecek olan röleler belirlenir ve gruplanırlar. İkinci aşamada ise QoS kalitesini garanti eden röle grubu içerisinde diğer kullanıcı için maksimum hızı vadeden röle seçilir. Bu röle seçim algoritmasıyla ortalama kesinti olasılığının en düşük olduğu gösterilmiştir.



Şekil 10. Röle-Yardımlı-NOMA sistem modelinin gösterimi.



Şekil 11. Röle-Yardımlı-NOMA sisteminin kesinti başarımı.

Şekil 11'de ortamda bulunan $M = 4, 6, 8, 10$ adet röleden (15)'te belirtilen röle seçim kuralına göre seçilen röle ile gerçekleştirilen Röle-Yardımlı-NOMA için kullanıcıların kesinti olasılığı performansları sunulmuştur. İki kullanıcı için tasarlanan sistemde baz istasyonu ile röle arasındaki ortalama kanal güçleri $\Omega_{s,r} = -7dB$, röle ile yakın kullanıcı arasındaki ortalama kanal güçleri $\Omega_{r,1} = -7dB$ ve röle uzak kullanıcı arasındaki ortalama kanal güçleri $\Omega_{r,2} = -10dB$ olarak alınmıştır. Tüm kanallar Rayleigh sönmülemeli kanallar olarak kabul edilmiştir. Yakın ve uzak kullanıcı için QoS istekleri sırasıyla $1BPCU$ ve $0.5BPCU$ olarak seçilmiştir.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada 5G ve sonrası için kuvvetli bir aday olan NOMA'nın temel prensiplerinin tanıtılarak fiziksel katman performansları ele alınmıştır. Vericide süperpozisyon

kodlaması ve alıcıda ardışık girişim giderici kullanılması temeline dayanan NOMA, tüm frekans bandının aynı anda bütün kullanıcılar tarafından kullanılmasına imkân tanımaktadır. Burada kullanıcılar arasında güç paylaşımı yapılarak yeni bir güç eksenini kazandırılmaktadır. Bunun sonucu olarak, NOMA klasik çoklu erişim tekniklerine göre daha iyi bir spektral verimlilik sunmaktadır. Ayrıca IoT gibi uygulamalarda çok sayıda kullanıcının aynı anda iletişim yapmasına da imkan tanımaktadır. NOMA tekniği için hem aşağı yönlü hem de yukarı yönlü iletişimde fiziksel seviye performansları incelenmiş ve tüm kullanıcılar için klasik OMA'ya göre daha iyi QoS istekleri sunduğu gözlenmiştir. Kesinti olasılığı ve toplam ulaşılabilir hız gibi performans kriterleri göz önüne alındığında da NOMA klasik çoklu erişim tekniklerine üstünlük sağlamaktadır.

NOMA'da kullanıcılar arası güç paylaşımının, zaman ve frekans eksenlerine ek yeni bir eksen olarak tanımlanması, bilinen iletişim teknikleri ile NOMA'nın birlikte kullanılabilir hale gelmesini sağlamaktadır. Örneğin, NOMA tekniğinin OFDM gibi yol gecikmelerine karşı dayanıklı ve spektral verimliliği yüksek olan bir teknikle kullanılması mümkündür. Bununla birlikte, NOMA yeni nesil radyo erişimi için önerilen diğer fiziksel seviye teknikleri ile beraber kullanılması da mümkündür. Bu çalışmada özellikle NOMA'nın işbirlikli iletişim ile birlikte kullanıldığı sistemler üzerinde durulmuştur. Hem NOMA kullanıcıları arasında işbirlikli iletişim sağlandığında hem de ortamda bulunan röleler vasıtasıyla NOMA kullanıcıları için işbirliği yapıldığında sistem başarımları incelenmiştir. Kullanıcı-İşbirlikli-NOMA ve Röle-Yardımlı-NOMA sistemlerinin, klasik OMA ve

NOMA tekniklerine göre daha iyi başarıma sahip olduğu gözlenmiştir.

NOMA, 5G ve sonrası kablosuz iletişim sistemleri için oldukça kuvvetli bir aday olarak öne çıkmaktadır. Fakat, NOMA tekniği için halen araştırılması gereken birçok konu bulunmaktadır. Bunların başında da güvenlik konusu gelmektedir. SIC kullanılarak yakın kullanıcılarda uzak kullanıcılarının verilerinin elde edilmesi güvenlik konusunda endişe yaratmaktadır. Fakat, bu durum fiziksel seviye güvenlik (physical layer security -PLS) teknikleri ile çözülebilir. Bu nedenle NOMA ile PLS tekniklerinin birlikte kullanılması oldukça ilgi çeken bir konu olarak öne çıkmaktadır. NOMA tekniğinde güvenlik için pratik ve düşük karmaşıklığa sahip fiziksel seviye güvenlik ekipmanlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca yakın kullanıcılarda gerçekleşen SIC işleminde hata yapılması durumunda da hata yayılımından kaynaklı olarak yakın kullanıcıların hata performansları düşmektedir. Bu nedenle SIC tasarımı da araştırılması gereken bir konu olarak gözükmektedir. Çok sayıda kullanıcının NOMA ile kullanılması durumunda ise yakın kullanıcılarda gerçekleşmesi gereken iteratif SIC sayısının artması alıcı karmaşıklığını arttırmaktadır. Her ne kadar bu konuda çalışmalar yapılmış olsa da alıcı karmaşıklığını azaltmak için kullanıcı gruplaması ve optimum güç paylaşımı konusu da üzerinde durulması gereken bir alan olarak gözükmektedir.

NOMA tekniğinin 5G sonrası uygulamalarında kullanılması muhtemel kitlesel MIMO, görünür ışık haberleşmesi (VLC), bilişsel radyo (CR) ve milimetre dalga haberleşmesi (mmWave) teknikleri ile kombinasyonu da mümkündür. MIMO-NOMA da verici ile kullanıcılar arasındaki kanal katsayılarının matrisler cinsinden ifade edilmesi NOMA için anahtar rol oynayan kanalların güçlerine göre sıralanmasını zorlaştırmaktadır. Bu da MIMO-NOMA tekniği için araştırmacıları hüzme yönlendirme ya da kullanıcı gruplama çalışmalarına yöneltmiştir. Bu yöntemler ile hüzmedeki kanal katsayılarının skaler hale getirilerek NOMA için elverişli hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Fakat, MIMO-NOMA için birçok konu hala araştırılması gereken konular olarak durmaktadır. Literatürde NOMA'nın VLC, CR ve mmWave haberleşmesi ile beraber kullanılması ile ilgili çalışmalar bulunsa da bu uygulamaların birleştirilmesindeki zorluklar ve başarımlarının nasıl olacağı net olarak ortaya konamamıştır ve gelecekteki araştırmaların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

5. Kaynaklar

1. **Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N. 2016.** Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 18: 1617–1655.
2. **Al-Imari, M., Xiao, P., Imran, MA., Tafazolli, R. 2014.** Uplink Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Wireless Networks. *11th Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, pp: 781–785.
3. **Al-Imari, M., Xiao, P., Imran, MA. 2015.** Receiver and resource allocation optimization for uplink NOMA in 5G wireless networks. *Proc. Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, pp: 151–155.
4. **Ali, M. S., Tabassum, H., Hossain, E. 2016.** Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems. *IEEE Access*, 4: 6325–6343.
5. **Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, ACK., Zhang JC. 2014.** What will 5G be?. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 32: 1065–1082.
6. **Benjebbour, A., Li, A., Kishiyama, Y., Jiang, H., Nakamura, T. 2014.** System-level performance of downlink NOMA combined with SU-MIMO for future LTE enhancements. *IEEE Globecom Work. GC Wkshps*, pp: 706–710.
7. **Benjebbour, A., Saito, K., Li, A., Kishiyama, Y., Nakamura, T. 2015.** Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials. *Int. Conf. Wirel. Networks Mob. Commun. WINCOM*, pp: 1–6.
8. **Benjebbour, A., Saito, Y., Kishiyama, Y., Li, A., Harada, A., Nakamura, T. 2013.** Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access. *ISAPCS - Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst.*, pp. 770–774.
9. **Chen, S., Peng, K., Jin, H. 2015.** A suboptimal scheme for uplink NOMA in 5G systems. *IWCMC - 11th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf.*, pp: 1429–1434.
10. **Choi, J. 2014.** Non-orthogonal multiple access in downlink coordinated two-point systems, *IEEE Commun. Lett.*, 18: 313–316.
11. **Clerckx, B., Lozano, A., Sesia, S., van Rensburg, C., Papadias, C. 2009.** 3GPP LTE and LTE-Advanced. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2009:472124.
12. **Cui, J., Ding, Z., Fan, P. 2016.** A novel power allocation scheme under outage constraints in NOMA systems. *IEEE Signal Process. Lett.*, 23: 1226–1230.
13. **Dai, L., Wang, B., Yuan, Y., Han, S., I, CL., Wang, Z. 2015.** Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Commun. Mag.*, 53: 74–81.

14. **Diamantoulakis, PD., Pappi, KN., Ding, Z., Karagiannidis, GK. 2016.** Wireless-Powered Communications With Non-Orthogonal Multiple Access, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 15: 8422–8436.
15. **Ding, Z., Dai, H., Poor, HV. 2016,** Relay Selection for Cooperative NOMA. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 5: 416–419.
16. **Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, GK., Schober, R., Yuan, J., Bhargava, VK. 2017,** A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 35: 2181–2195.
17. **Ding, Z., Peng, M., Poor, HV. 2015.** Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems. *IEEE Commun. Lett.*, 19: 1462–1465.
18. **Ding, Z., Schober, R., Poor, HV. 2016.** A General MIMO Framework for NOMA Downlink and Uplink Transmission Based on Signal Alignment. *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 15: 4438–4454.
19. **Ding, Z., Yang, Z., Fan, P., Member, S., Poor, HV. 2014.** On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users, *IEEE Signal Process. Lett.*, 21: 1501–1505.
20. **Duan, W., Wen, M., Yan, Y., Xiong, Z., Lee, MH. 2016.** Use of Non-Orthogonal Multiple Access in Dual-hop relaying, *arXivID:1604.01151*.
21. **Foukas, X., Patounas, G., Elmokashfi, A., Marina, MK 2017.** Network Slicing in 5G: Survey and Challenges. *IEEE Commun. Mag.*, 55: 94–100.
22. **Haci, H., Zhu, H., Wang, J. 2017.** Performance of non-orthogonal multiple access with a novel asynchronous interference cancellation technique. *IEEE Trans. Commun.*, 65: 1319–1335.
23. **Higuchi, K., Benjebbour, A. 2015.** Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access. *IEICE Trans. Commun.*, E98-B: 403–414.
24. **Islam, S. M. R., Avazov, N., Dobre, OA., Kwak, KS. 2017.** Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 19: 721–742.
25. **Kim, J.-B., Lee, IH. 2015.** Capacity Analysis of Cooperative Relaying Systems Using Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Commun. Lett.*, 19: 1949–1952.
26. **Liu, F., Mahonen, P., Petrova, M. 2016.** Proportional fairness-based power allocation and user set selection for downlink NOMA systems. *IEEE Int. Conf. Commun. ICC.*
27. **Liu, Y., Ding, Z., ElKashlan, M., Poor, HV. 2016.** Cooperative Non-orthogonal Multiple Access with Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 34: 938–953.
28. **Liu, Y., Pan, G., Zhang, H., Song, M. 2016.** Hybrid Decode-Forward Amplify-Forward Relaying with Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Access*, 4: 4912–4921.
29. **Luo, S., Teh, KC. 2017.** Adaptive transmission for cooperative NOMA system with buffer-aided relaying. *IEEE Commun. Lett.*, 21: 937–940.
30. **Ma, Z., Zhang, Z., Ding, Z., Fan, P., Li, H. 2015.** Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives. *Sci. China Inf. Sci.*, 58: 1–20.
31. **Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., Kusume, K., Marsch, P., Maternia, M., Queseth, O., Schellmann, M., Schotten, H., Toaka, H., Tullberg, H., Uusitalo, M. A., Timus, B., Fallgren, M. 2014.** Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project. *IEEE Commun. Mag.*, 52: 26–35.
32. **Oviedo, JA., Sadjadpour, HR. 2017.** A Fair Power Allocation Approach to NOMA in Multiuser SISO Systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 66: 7974–7985.
33. **Proakis, JG. 2008.** Digital Communications, McGraw-Hill, 5th. edition New York, USA, 1150 pp.
34. **Saito, Y., Benjebbour, A., Kishiyama, Y., Nakamura, T. 2013.** System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA). *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, pp: 611–615.
35. **Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A., Higuchi, K. 2013.** Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access. *IEEE 77th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, pp: 1–5.
36. **Shannon, CE. 1956.** The Zero-Error Capacity of a Noisy Channel. *IRE Trans. Inf. Theory*, 2: 8–19.
37. **Shi, S., Yang, L., Zhu, H. 2016.** Outage Balancing in Downlink Nonorthogonal Multiple Access with Statistical Channel State Information. *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 15:4718–4731.
38. **Shieh, SL., Huang, YC. 2016.** A simple scheme for realizing the promised gains of downlink nonorthogonal multiple access. *IEEE Trans. Commun.*, 64:1624–1635.
39. **Tabassum, H., Ali, MS., Hossain, E., Hossain, MJ., Kim, DI. 2016.** Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in Cellular Uplink and Downlink: Challenges and Enabling Techniques, *arXivID:1608.05783v1*
40. **Timotheou, S., Krikidis, I. 2015.** Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems. *IEEE Signal Process. Lett.*, 22: 1647–1651.
41. **Verdu, S. 1998.** *Multiuser Detection*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 440 pp.

42. Wang, X., Labeau, F., Mei, L. 2017. Closed-Form BER Expressions of QPSK Constellation for Uplink Non-Orthogonal Multiple Access, *IEEE Commun. Lett.*, 21: 2242–2245.
43. Wang, X., Poor, HV. 2004. *Wireless communication systems : advanced techniques for signal reception*, Prentice Hall, 1st edition New Jersey, USA, 704 pp.
44. Xu, M., Ji, F., Wen, M., Duan, W. 2016. Novel Receiver Design for the Cooperative Relaying System with Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Commun. Lett.*, 20: 1679–1682.
45. Yang, M., Hsieh, H. 2015. Moving Towards Non-Orthogonal Multiple Access in Next-Generation Wireless Access Networks, *IEEE Next Gener. Netw. Symp.*, pp: 7262–7267.
46. Yang, Z., Ding, Z., Fan, P., Al-Dhahir, N. 2016. A General Power Allocation Scheme to Guarantee Quality of Service in Downlink and Uplink NOMA Systems. *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 15: 7244–7257.
47. Yang, Z., Ding, Z., Fan, P., Karagiannidis, GK. 2016. On the Performance of Non-orthogonal Multiple Access Systems With Partial Channel Information. *IEEE Trans. Commun.*, 64: 654–667.
48. Zhang, N., Wang, J., Kang, G., Liu, Y. 2016. Uplink Nonorthogonal Multiple Access in 5G Systems. *IEEE Commun. Lett.*, 20: 458–461.
49. Zhang, Y., Wang, HM., Zheng, TX., Yang, Q. 2017. Energy-Efficient Transmission Design in Non-orthogonal Multiple Access. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 66: 2852–2857.
50. Zhang, Z., Ma, Z., Xiao, M., Ding, Z., Fan, P. 2017. Full-duplex device-to-device-aided cooperative nonorthogonal multiple access. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 66: 4467–4471.
51. Zheng, B., Wang, X., Wen, M., Chen, F. 2017. NOMA-Based Multi-Pair Two-Way Relay Networks with Rate Splitting and Group Decoding. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 35: 2328–2341.
52. Zhong, C., Zhang, Z. 2016. Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Full-Duplex Relaying. *IEEE Commun. Lett.*, 20: 2478–2481.