



## Performance analysis of downlink MIMO-NOMA systems in Rayleigh channels with max-max-max and max-min-max antenna selection algorithms

Bircan Demiral<sup>1,2\*</sup>, Özgür Ertuğ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Electronics Engineering, Faculty Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Kahramankazan Vocational School, Başkent University, 06980, Ankara, Türkiye

### Highlights:

- Max-max-max and max-min-max antenna selection algorithm
- Bit error rate (BER) and capacity analysis
- Outage probability analysis

### Keywords:

- 5G
- NOMA
- MIMO
- Antenna selection
- BER

### Article Info:

Research Article

Received: 02.12.2021

Accepted: 04.08.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1031507

### Correspondence:

Author: Bircan Demiral

e-mail:

bircan.demiral@gazi.edu.tr

phone: +90 554 394 0530

### Graphical/Tabular Abstract

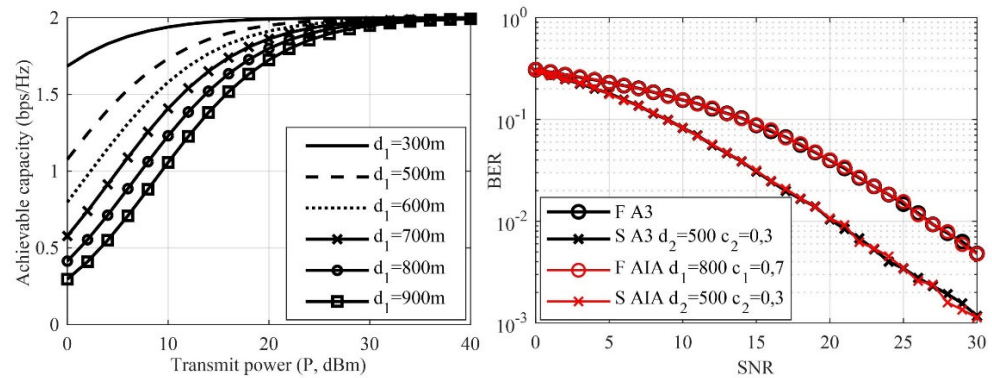


Figure A. Achievable capacity and BER graph

### Purpose:

The non-orthogonal multiple access (NOMA) technique, which has been proposed for 5G next generation communication technology, which has promises such as providing high spectral efficiency, has recently been the key point of research. Due to the heterogeneous nature of the NOMA technique, it can be integrated with the multi-input multiple-output (MIMO) technique, which provides high data rates. Thanks to this structure, the data reaches the receiver less erroneously and faster. However, having more than one antenna creates the need for more than one radio frequency (RF) chain. This means high cost, system complexity and high power consumption. It is aimed to eliminate or minimize the problems mentioned in this study.

### Theory and Methods:

In this study, antenna selection method was preferred to minimize system complexity, power consumption and cost in MIMO-NOMA systems. Max-max-max and max-min-max antenna selection algorithms were used.

### Results:

By using max-max-max and max-min-max antenna selection algorithms, bit error rate (BER), outage probability and capacity analyzes were performed. As seen Figure A, it has been revealed that the distance and the channel coefficient affect the antenna selection and cause differences in performances.

### Conclusion:

After antenna selection process, the simulation studies show that an improvement has been achieved in BER performances and an increase has been ensured in the distance-dependent capacity.



## Aşağı-hat MIMO-NOMA sistemlerinin max-max-max ve max-min-max anten seçim algoritmaları ile Rayleigh kanallarda performans analizi

Bircan Demiral<sup>1,2\*</sup> , Özgür Ertuğ<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Başkent Üniversitesi, Kahramankazan MYO, 06980, Kahramankazan, Ankara, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Max-max-max ve max-min-max anten seçim algoritması
- Bit hata oranı (BER) ve kapasite analizi
- Kesinti olasılık analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.12.2021

Kabul: 04.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1031507

### Anahtar Kelimeler:

5G,  
NOMA,  
MIMO,  
anten seçimi,  
BER

### ÖZ

Yüksek spektral verimlilik sağlamak gibi vaatleri olan 5G yeni nesil haberleşme teknolojisi için ortaya atılmış dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA) tekniği son zamanlarda araştırmaların kilit noktası olmuştur. Heterojen yapıya sahip olan NOMA tekniği yüksek veri hızı sağlayan çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) tekniği ile entegre edilerek yeni bir yapı elde edilmiştir. Bu yapıda birden fazla antenle iletimin sağlanması yüksek maliyet, sistem karmaşıklığı ve fazla güç tüketimi gibi sorunlara neden olmaktadır. Sorunu ortadan kaldırmak veya minimize etmek amacıyla anten seçimi bu makalenin çalışma konusu olmuştur. Bu konuda yapılan literatür çalışmaları sonucunda max-max-max ve max-min-max anten seçim algoritmalarının sıklıkla kullanıldığı farkedilmiştir. Ancak çalışmalarda algoritmaların sadece hız performansları incelenmiş ve diğer parametrelerde değerlendirmeleri yapılmamıştır. Burada algoritmaların BER, kesinti olasılığı, kapasite analizleri ele alınmış ve benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarından baz istasyonuna yakın olan kullanıcının uzak olan kullanıcıya göre BER değerlerinin daha iyi olduğu ve baz istasyonuna olan mesafe azaldıkça BER değerlerinde iyileşme, kapasitede artış ve kesinti olasılığında düşüşün gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

## Performance analysis of downlink MIMO-NOMA systems in Rayleigh channels with max-max-max and max-min-max antenna selection algorithms

### HIGHLIGHTS

- Max-max-max and max-min-max antenna selection algorithm
- Bit error rate (BER) and capacity analysis
- Outage probability analysis

### Article Info

Research Article

Received: 02.12.2021

Accepted: 04.08.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1031507

### Keywords:

5G,  
NOMA,  
MIMO,  
antenna selection,  
BER

### ABSTRACT

The non-orthogonal multiple access (NOMA) technique developed for 5G next generation communication technology which has some promises such as providing high spectral efficiency has been the key point of researches lately. A new structure has been obtained by integrating the heterogeneous NOMA technique with the multiple input multiple output (MIMO) technique, which provides high data rate. Providing transmission with more than one antenna in this structure causes problems such as high cost, system complexity and excessive power consumption. Antenna selection has been the subject of this article in order to eliminate or minimize the problem. As a result of the literature studies on this subject, it has been noticed that the max-max-max and max-min-max antenna selection algorithms are frequently used. However, only the speed performances of the algorithms were examined and other parameters were not evaluated in the studies. Here BER, outage probability, capacity analyzes of algorithms are discussed and simulation studies are carried out using MATLAB/Simulink program. From the results obtained, it was concluded that the BER values of the user who is close to the base station are better than the user who is far away, and as the distance to the base station decreases, the BER values improve, the capacity increases and the outage probability decreases.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*bircan.demiral@gazi.edu.tr, bdemiral@baskent.edu.tr, ertug@gazi.edu.tr /  
Tel: +90 554 394 0530

## 1. Giriş (Introduction)

Mobil ağlar, 1G analog sistemlerle başlayıp 4G uçtan uca dijital sistemlere dönüşmüş yapılardır. Bu sistemlerde kullanılan çoklu erişim şemaları, mobil ağları birbirinden ayırt etmek için belirleyici kilit faktörlerdir. Çoklu erişim şemaları mobil ağların gelişim sırasına göre; frekans bölmeli çoklu erişim (frequency division multiple access-FDMA), zaman bölmeli çoklu erişim (time division multiple access-TDMA), kod bölmeli çoklu erişim (code division multiple access-CDMA) ve dikgen frekans bölmeli çoklu erişim (orthogonal frequency division multiple access-OFDMA) teknikleridir [1]. Dikgen çoklu erişim (orthogonal multiple access-OMA) teknikleri olarak tek bir isim altında toplanan bu teknikler, farklı kullanıcılara zaman, frekans veya kod alanında dikgen kaynaklar tahsis ederek kullanıcılar arası girişimi minimize etmektedir. Sunmuş olduğu kaynaklar sayesinde makul seviyede karmaşıklıkla çoğullama kazancı elde edilmektedir [2]. Buna karşın, nesnelere internetinin (IoT) hızlı gelişimiyle birlikte cihaz sayısının ve çeşitliliğinin artması, buna bağlı olarak yaşanan veri trafiğinin getirmiş olduğu spektral yoğunluk nedeniyle bu geleneksel yöntemler yetersiz kalmıştır. Daha fazla kullanıcıya hitap edebilmek ek olarak yüksek hız, düşük gecikme, maksimum bağlantı ve düşük maliyet gibi taleplere cevap verebilmek için yeni bir mobil ağa ve bu ağda kullanılacak farklı bir teknolojiye ihtiyaç duyulmuştur [3]. Bu ihtiyaç sonucunda yeni nesil 5G haberleşme ağı ve bu ağda beklentileri sorunsuz gerçekleştirebilecek, kolaylıkla sisteme entegre edilebilecek dik olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access-NOMA) teknoloji ortaya atılmıştır [4]. OMA'da kullanıcılardan her birine zaman, frekans veya kod/güç ekseninde dikgen olan kaynakları kullanmasına izin verilirken NOMA'da ise farklı kullanıcılar aynı zaman ve frekans alanında farklı kod/güç değerleriyle iletişim yapabilmektedir [5]. OMA ile NOMA arasındaki bu belirgin fark Şekil 1'de gösterilmektedir.

NOMA'nın farklı kullanıcılara aynı alanı sunması, tükenmeyen buna karşın kısıtlı bir kaynak olan spektrumun en verimli şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [6]. Bu özelliği ile NOMA geleneksel tekniklerden bir adım öne çıkmaktadır. NOMA'da güç veya kod alanında olmak üzere iki çoğullamadan biri yapıldıktan sonra eksen kullanımına izin verilmektedir. Yapılan bu çoğullama işlemine göre NOMA teknikleri Şekil 2'deki gibi kategorize edilebilmektedir. Kod alanında gruplandırılan tekniklere ek olarak desen bölmeli çoklu erişim (pattern division multiple access-PDMA) ve ışın bölmeli çoklu erişim (beam division multiple access-BDMA) gibi çoklu erişim şemaları da önerilmiştir [7]. Güç alanında çoğullamada sistem performansını maksimize etmek için kullanıcılara kanal koşullarına

göre farklı güç seviyeleri tahsis edilmektedir. Ayrıca, bu teknikle kullanıcı sinyalleri arasındaki girişimi önlemeyi sağlayan ardışıl girişim giderici (successive interference cancellation-SIC) yöntemi kullanılarak kullanıcıların sinyallerini kolay elde etmede olanak sağlanmaktadır. Kod alanında çoğullamada ise aynı CDMA teknolojisindeki gibi farklı kullanıcılara farklı kodlar atanarak çoğullama işlemi yapılmaktadır. Bu çoğullama yönteminin güç alanında çoğullama yöntemine göre dezavantajı spektral verimlilik sağlanmasına rağmen yüksek iletim bant genişliğine ihtiyaç duyulmasıdır [3]. Bu nedenle yapmış olduğumuz çalışmada, NOMA'nın güç alanında çoğullama konusu ele alınmıştır.

### 1.1. NOMA Teknikleri (NOMA Techniques)

Bu bölümde literatürde yer alan 5G yeni nesil haberleşme ağı için sunulan NOMA tekniklerine yer verilmiştir.

#### 1.1.1. Güç alanında ardışıl girişim önleyici NOMA

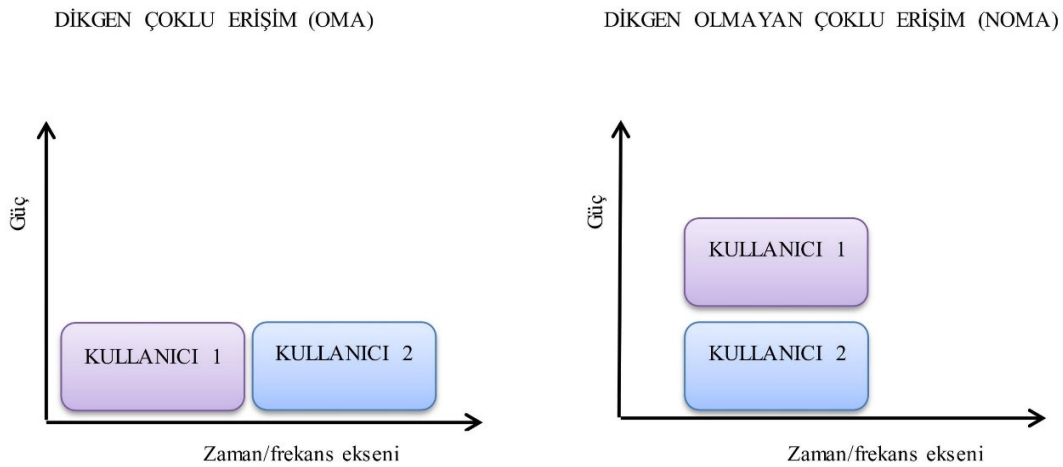
(Successive interference cancellation NOMA in the power domain):

Çoğullama yapılırken kullanıcıların kanal koşulları dikkate alınarak yapılan temel NOMA teknolojisidir. Kanal koşulları en iyi olan kullanıcıya en az güç tahsis edilmekte ve kanal koşulları kötüye gittikçe tahsis edilen güç katsayısı artmaktadır. Vericide kullanıcı hızını ve adaletini dengelemek için kullanıcılara atanan bu katsayılarla çarpılan kullanıcı sinyalleri doğrusal olarak toplanır ve alıcıya gönderilir. Alıcıda çok kullanıcılı algılamayı sağlamak için SIC yöntemi kullanılmaktadır. En kötü kanala sahip kullanıcı kendisine daha fazla güç tahsis edildiği için sinyalini aldığı toplam sinyalden doğrudan çözebilirken daha az güç tahsis edilen kullanıcılar ise SIC yöntem ile diğer kullanıcıların sinyallerini tek tek çözdükten sonra kendi sinyaline ulaşabilmektedir [8, 9]. Alıcı tarafta yapılan bu uygulamalar Şekil 3'de gösterilmiştir. Yakın-uzak etkisi kullanıcıların kanal koşullarını etkileyen en önemli parametredir. Yakın olan kullanıcının kanal koşulları daha iyi iken uzak mesafede olan kullanıcıda bu durum tam tersidir.

#### 1.1.2. Masif MIMO sistemlerinde NOMA

(NOMA in the massive MIMO):

Çoklu giriş çoklu çıkış anten düzeneğiyle çoklu kullanıcı bağlantısına cevap verebilen hüzmleme mantığı ile çalışan NOMA teknolojisidir. Bu teknik Şekil 4'te gösterilmektedir. Vericide her bir hüzmde yukarıda bahsedilen ardışıl girişim önleyici NOMA prensibi kullanılırken



Şekil 1. OMA-NOMA farkı (OMA-NOMA difference)

alıcıda önce hüzmeler arası girişimi önlemek için filtreleme, daha sonra hüzmeye içi girişimi önlemek için SIC kullanılmaktadır. Bu sistem spektral verimlilikte büyük rol oynarken karmaşıklık sıkıntısını da beraberinde getirmektedir.

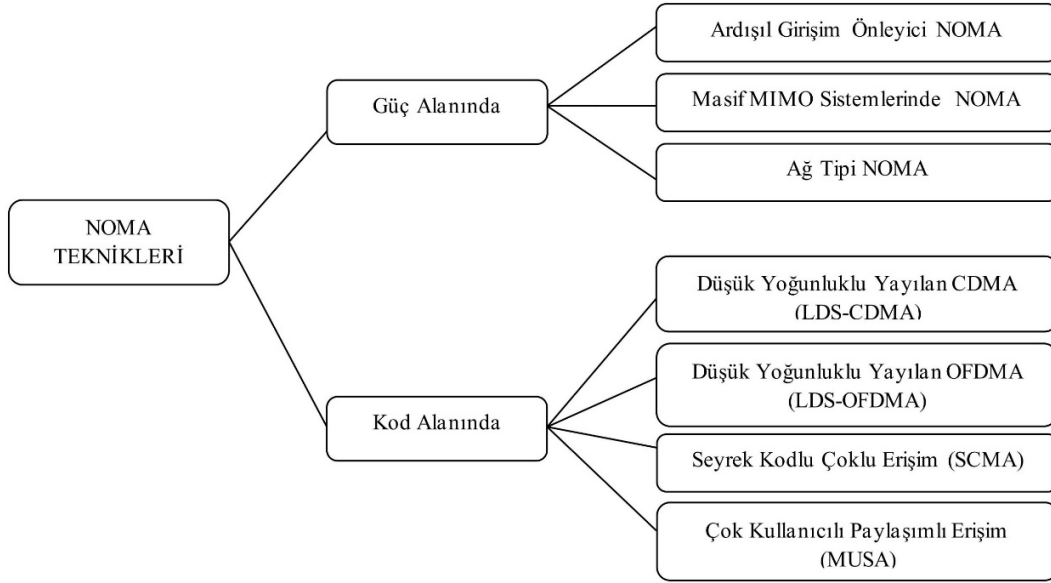
### 1.1.3. Ağ tipi NOMA (Network NOMA):

Şekil 5'te gösterilen ve hücrelerden oluşan NOMA ağ yapısıdır. Sistemdeki kullanıcılar, hücre içi uç noktalarındaki ve komşu hücre uç noktalarındaki kullanıcılar olarak iki kategoride değerlendirilmektedir [10]. Hücre içi uç noktalarda bulunan kullanıcılar, komşu hücrede uç noktada bulunan kullanıcılardan dolayı parazit durumuyla

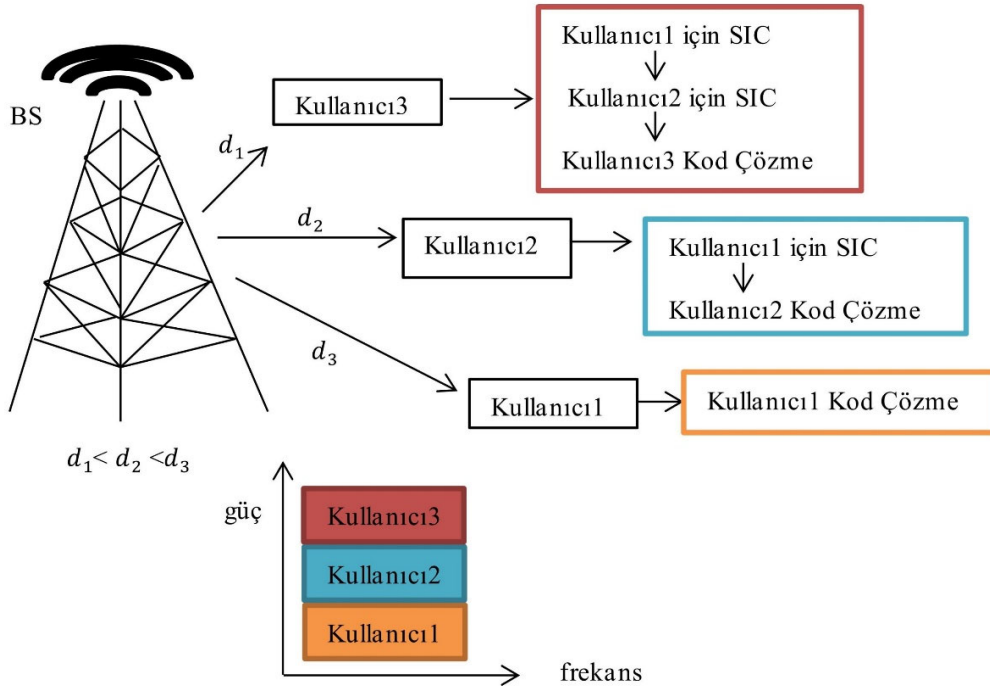
karşılaşmaktadır. Bu girişimi azaltmak için kullanıcı sinyallerine ön kod eklenmekte ve kullanıcı verileri her baz istasyonu tarafından bilinmesi beklenmektedir.

### 1.1.4. Kod alanında düşük yoğunluklu yayılan CDMA (Low density spreading CDMA (LDS-CDMA) in the code space):

Geleneksel CDMA tekniğini benimseyen ancak kullanıcılar arası girişimi azaltmak için yoğun yayılma dizileri yerine seyrek yayılma dizilerini kullanan NOMA şemalarından biridir. Geleneksel CDMA tekniğinde her kullanıcıya belirlenen yoğun yayma dizileri ile semboller yayılmakta ve tüm kullanıcıların sinyalleri üst üste

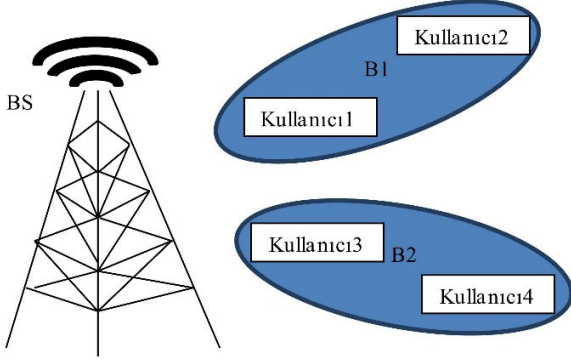


Şekil 2. NOMA teknikleri (NOMA techniques)



Şekil 3. Güç alanında ardışıl girişim önleyici NOMA (Successive interference cancellation NOMA in the power domain)

bindirilmektedir. Bu durumda her bir kullanıcı diğer kullanıcının parazitine maruz kalmaktadır. Oluşan parazitin içinden kullanıcı sinyalleri korelasyon alıcısıyla kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Ancak CDMA sisteminde yalnızca yonga sayısı kadar kullanıcıyı desteklemesi LDS-CDMA'in ortaya atılmasını sağlamıştır. LDS-CDMA'de tüm semboller, az sayıda çip üzerine yayıldığı için her çipte daha az sayıda sinyal olmaktadır. Bu da kullanıcılar arası girişimin azalmasını sağlamaktadır. Alıcıda çok kullanıcılı algılamayı sağlamak için mesaj geçiş algoritması (message passing algorithm-MPA) kullanılmaktadır [11].



**Şekil 4.** Masif MIMO sistemlerinde NOMA (NOMA in the massive MIMO)

#### 1.1.5. Düşük yoğunluklu yayılan OFDM (Low density spreading OFDM (LDS-OFDM))

LDS-CDMA ve OFDM'in harmanlanmış versiyonudur. Bu teknikte semboller önce düşük yoğunluklu yayılma dizileri ile eşlenmekte ve ardından farklı OFDM alt taşıyıcılar üzerinden iletilmektedir. Spektral verimliliği sağlamak için sembollerin sayısı alt taşıyıcılardan fazla olabilmektedir. Bu tekniğin yapısı, kullanılan yayma dizilerinin seyrek olması dışında çok taşıyıcı CDMA (multi carrier code division multiple access-MC-CDMA) tekniği ile benzerlik göstermektedir. Alıcıda LDS-CDMA gibi MPA tabanlı çok kullanıcı algılama (multi user detection-MUD) kullanılmaktadır [12].

#### 1.1.6. Seyrek kod çoklu erişim (Sparse code multiple access-SCMA):

LDS-CDMA tekniğinin geliştirilmiş uyarlamasıdır. Kullanıcı verileri bit-ışaret eşlemesi ile belirlenmiş seyrek kodlar aracılığıyla

iletilmektedir [13]. Her bir kullanıcıya farklı kod kitapları belirlenmekte ve kullanıcılar bu kitaplar aracılığıyla aynı kaynakları kullanabilmektedir. Kod kitapları ve dizilerin seyrekliği ile kullanıcılar arası girişim minimize edilmektedir [14]. Alıcıda kullanıcı sinyalleri MPA tabanlı MUD aracılığıyla ayırt edilmektedir [15]. SCMA'yi LDS-CDMA'den ayıran özellik ise çok boyutlu şekillendirme kazancı sağlayan kod çizelgeleri oluşturması üzerine dayalı bir teknik olmasıdır. SCMA kod çizelgesi tasarımı farklı katmanlar farklı kod çizelgeleri ile çoğullandığından karmaşık bir problem haline almaktadır.

#### 1.1.7. Çok kullanıcılı paylaşımli erişim (Multi-user shared access-MUSA):

Her bir kullanıcının sembollerinin kısa ancak düşük çapraz korelasyona sahip kompleks bir yayılma dizisiyle yayıldığı ve birçok bağlantının desteklendiği bir tekniktir. Yayılma dizisini kullanıcılar birbirinden bağımsız olarak seçebilmektedir. Bu durum verici tarafta koordinasyon problemini çözmektedir. Ayrıca bu diziler alıcıda kullanıcılardan gelen verileri birbirinden ayırmak için kullanılan SIC çözümünü kolaylaştırmak için özel tasarlanmaktadır [16].

Güç ve kod alanında çoğullamaya ek olarak önerilen PDMA ve BDMA teknikleri de vardır.

#### 1.1.8. Desen bölmeli çoklu erişim

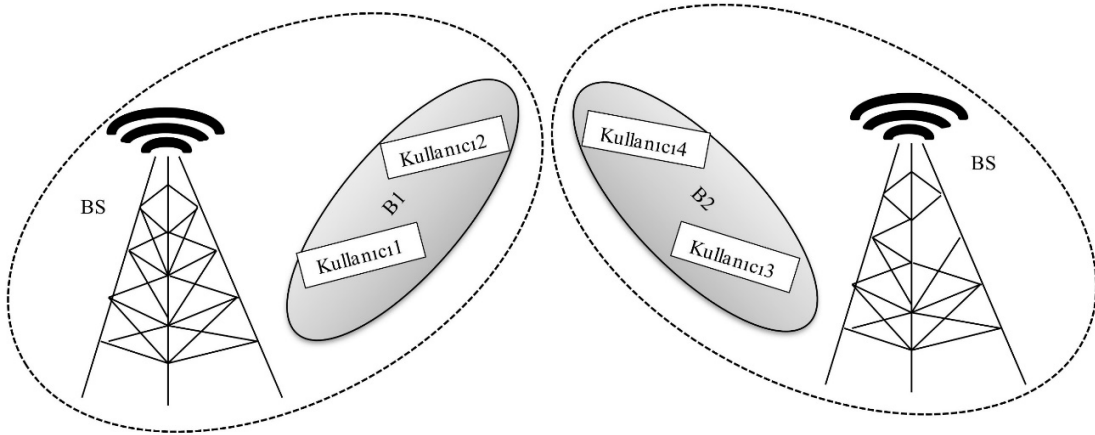
(Pattern division multiple access-PDMA):

NOMA'nın kod çizelge tabanlı şemasıdır [17]. Vericide çeşitliliği maksimize etmek ve kullanıcılar arasındaki çakışmayı minimize etmek için tasarlanmış dikgen olmayan desenler kullanılmaktadır. Ardından çoğullama kod alan veya uzaysal alanda gerçekleştirilmektedir. Kod alanı çoğullamada alıcıda dizi tespiti için mesaj geçiş algoritmasına, uzaysal alandaki çoğullamada baz istasyonunda birden fazla antene ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum çok kullanıcılı MIMO tekniği ile benzerlik gösterse de amacı spektral verimlilikten ziyade çeşitlilik olduğu için ön kodlamaya gerek duymamaktadır.

#### 1.1.9. Bit bölmeli çoklu erişim

(Beam division multiple access-BDMA)

Aşağı-hat NOMA sistem için tasarlanmış bir tekniktir. Bu tekniğin semboller yayma dizileri ile çarpıldıktan sonra yongaların serpiştirilmesi ve çoğullanmış kullanıcıların kaynakları bit seviyesinde bölünmesine dayanan bir çalışma prensibi vardır.



**Şekil 5.** Ağ tipi NOMA (Network NOMA)

## 1.2. MIMO-NOMA

NOMA yapı itibariyle farklı tekniklerle birleşerek sistem performansını iyileştirme görevinde aktif rol oynamaktadır [18]. Literatürde en çok, çoklu giriş çoklu çıkış (multiple input multiple output-MIMO) teknolojisinin NOMA ile bütünleşmesinden elde edilen MIMO-NOMA sistemi tercih edilmektedir. Kapasiteyi artırmada, hata olasılığını minimize etmede ve yüksek veri akışında önemli yere sahip olan MIMO sistemler, beraberinde getirmiş olduğu avantajlar sayesinde kablosuz haberleşme sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır [19]. Bu avantajlardan yararlanmak için araştırmacılar her sistemle uyum sağlayan NOMA tekniğini MIMO ile kombine etmişlerdir. Ancak her sistemde karşılaşılabileceği gibi MIMO sistemlerinde bazı olumsuz durumları bulunmaktadır. Bunlar, birden fazla anten kullanılmasına bağlı olarak yüksek maliyet, fazla güç tüketimi, donanım karmaşıklığı şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Bu olumsuz durumların üstesinden gelmenin en temel yolu, aynı veriyi birden fazla antenle göndermek yerine anten seçimi ile seçilen anten tarafından gönderilmekten geçmektedir [19-21].

Anten seçim yöntemi literatüre girmiş ve çeşitli algoritmaların geliştirildiği çalışmalar ortaya atılmıştır. [22]'de aşağı-hat çok-giriş tek-çıkış (MISO) NOMA sistemde anten seçimi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu seçimde toplam hız kriteri aktif rol almıştır. Toplam hızı yükselten anten seçilerek iletim tamamlanmış ve sistemin hız performansı değerlendirilmiştir. [23]'te MISO-NOMA sistem için iletim anten seçim (TAS) algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmada antenlerin kanal katsayılarına göre seçim yapılmaktadır. Önce baz istasyonundan (BS) uzak kullanıcıya daha sonra kalan antenler arasında BS'den yakın kullanıcıya iletim yapacak antenler seçilmektedir. Bu da iletim süresinde gecikmeye neden olabilmektedir. Yapılan çalışmanın sonucunda da önerilen algoritma ile rasgele anten seçiminin kesinti olasılık performansları karşılaştırılmıştır. [24]'te masif MIMO-NOMA sistemde tek bantlı iki kullanıcı ve çok bantlı çok kullanıcı olmak üzere iki senaryo üretilerek bu senaryolar için anten seçimi gerçekleştirilmiştir. İlk senaryoda aday anten kümesi oluşturularak bu kümeden en yüksek kanal kazancına sahip antenin seçildiği verimli bir algoritma önerilmiştir. İkinci senaryoda ise toplam kanal kazancını en yükseğe çıkartacak anten-kullanıcı çiftinin seçimine dayanan joint AU contribution algoritması önerilmiştir. Farklı bir TAS algoritma sunan [25]'te kanal katsayılarının varyansı hesaplanıp azalan değerlere göre sıralandıktan sonra anten seçimi yapılmıştır. Burada önerilen algoritmanın toplam hız ve kesinti olasılık performansları değerlendirilmiştir. Uplink MIMO-NOMA sistemi ele alan [26]'da optimal joint user clustering-RAS-power allocation, user clustering-RAS-power allocation, user clustering-power allocation-based RAS ve user clustering-power allocation-capacity based RAS olmak üzere dört algoritma önerilmiştir. Yapılan işlemlerin sırasının değişikliğine dayanan bu algoritmaların kapasite sonuçları karşılaştırılmıştır. [27]'de BS, röle ve kullanıcılardan oluşan aktarmalı aşağı-hat MIMO-NOMA sistem tasarlanmıştır. Ancak bu sistemde her iki taraf birden fazla antene sahip olmasına rağmen anten seçimi sadece verici taraf için yapılmakta ve bilgi sinyali röleye gönderilmektedir. Bu sinyali her bir kullanıcı birden fazla antenle almaktadır. Farklı bir çalışma konusunu ele alan [28]'de MIMO-NOMA'da gizlilik performansı incelenmiştir ve güvenliği artırmak için iki yeni TAS algoritma protokolü önerilmiştir. Bu algoritmalar ile önce BS den yakın kullanıcı arası daha sonra uzak kullanıcı arası iletim için anten seçilmektedir. Sistem toplam hızını maksimize etmek için [29]'da max-max-max ve max-min-max anten seçim algoritmaları önerilmiştir. Ancak bu algoritmaların sadece toplam hız performansları incelenmiş ve farklı açılardan değerlendirilmemiştir. [30]'daki çalışmada yukarıda bahsedilen algoritmalarından esinlenerek kesinti olasılığını Nakagami-m sönümlenme üzerinden en aza indirmek için algoritmalara ek yeni bir ortak anten seçim (joint antenna

selection-JAS) algoritması önerilmiştir. Yapılan tüm çalışmalar derinlemesine incelendiğinde anten seçim algoritmalarının hız performansları üzerine durulduğu ve diğer performans değerlendirme kriterleri konusunda açık olduğu farkedilmiştir. Bu amaçla, bu çalışmada, literatürde anten seçim algoritmalarının en başında yer alan max-max-max ve max-min-max anten seçim algoritmalarının BER, kesinti olasılığı ve kapasite analizleri ele alınmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

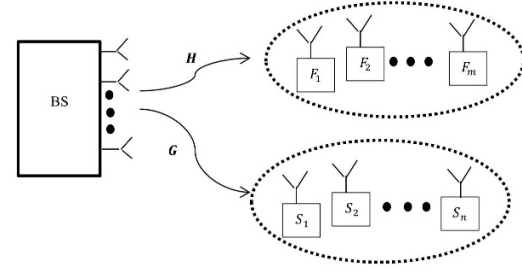
## 2. Sistem Modeli (System Model)

Baz istasyonundan kullanıcılara doğru iletim yapıldığı iki kullanıcı MIMO-NOMA sistemi ele alınmıştır. Bu sistem için baz istasyonunun (BS), birinci kullanıcının (F) ve ikinci kullanıcının (S) sırasıyla  $K$ ,  $M$ ,  $N$  antene sahip olduğu düşünülmüştür. Şekil 6'da gösterilen bu sistemde BS ile F arasındaki kanal katsayıların oluşturduğu set  $\mathbf{H}$  ve S ile oluşturduğu set ise  $\mathbf{G}$  ile temsil edilmektedir [28].

$$\mathbf{H}=[h_1 \ h_2 \ h_3 \ \dots \ h_k]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{G}=[g_1 \ g_2 \ g_3 \ \dots \ g_k]^T \quad (2)$$

Burada  $T$  transpoze simgesi olup  $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3} \ \dots \ h_{im}]$  ve  $g_i = [g_{i1} \ g_{i2} \ g_{i3} \ \dots \ g_{in}]$  sırasıyla  $\mathbf{H}$  ve  $\mathbf{G}$ 'nin eleman vektörleridir.



Şekil 6. Aşağı-hat MIMO-NOMA sistem (Downlink MIMO-NOMA system)

Verilen denklemlerden de anlaşılacağı üzere  $\mathbf{H}$ ,  $K \times M$  ve  $\mathbf{G}$ ,  $K \times N$  boyutundadır. Bu kanallar düz Rayleigh sönümlenmeli olduğu kabul edilmiştir. Bundan dolayı bu kanalların girişi  $\bar{h}_{km}$  ve  $\bar{g}_{kn}$  Gauss rastgele değişkenler olarak tanımlanabilmektedir.  $\bar{h}_{km}$  ( $\bar{g}_{kn}$ ) BS'nin  $k$ . anteni ile F (S)'nin  $m$ . ( $n$ ). anteni arasındaki kompleks kanal katsayısıdır.

$$h_{km} = |\bar{h}_{km}|^2 \quad (3)$$

$$g_{kn} = |\bar{g}_{kn}|^2 \quad (4)$$

Kullanıcıların birbirinden farklı uzaklıkta olduğu ve BS tarafından kanal durum bilgisinin (channel state information-CSI) çok iyi bilindiği varsayılmıştır. Kullanıcılara buldukları uzaklık kriteri olacak şekilde güç tahsis edilmektedir. Bu tahsis işlemi sonucunda kullanıcıların sembolleri kendilerine atanan güç katsayıları ile çarpılmakta ardından toplanarak tek sinyal elde edilmektedir. Verici tarafta yapılan bu süperpozisyon yöntemi sonucunda iletilmek üzere gönderilecek sinyal şu şekildedir:

$$S = \sum_{j=1}^L \sqrt{c_j} X_j \quad (5)$$

Burada  $X$  ve  $L$  sırasıyla kullanıcı sinyali ve kullanıcı sayısıdır.  $c$  ise güç katsayısı olup  $\sum_{j=1}^L c_j=1$  şartını sağlaması gerekmektedir. Toplanan sinyaller alıcı antenlerden şu şekilde alınır [20]:

$$Y_j = \bar{h}_{km}(\bar{g}_{kn})(\sum_{j=1}^L \sqrt{P_s c_j} X_j) + \sum_{j=1}^L w_i \quad (6)$$

Dolayısıyla;

$$Y_1 = \bar{h}_{km} (\sqrt{P_s c_1} X_1 + \sqrt{P_s c_2} X_2) + w_1 \quad (7)$$

$$Y_2 = \bar{g}_{kn} (\sqrt{P_s c_1} X_1 + \sqrt{P_s c_2} X_2) + w_1 \quad (8)$$

Burada  $P_s$ , iletim gücüdür ve  $w_i$  complex additive white Gaussian noise (AWGN) dir.

$d_1 < d_2$  yani F kullanıcısı S kullanıcısına göre BS ye daha yakın ise  $h_{km} > g_{kn}$  dir. Dolayısıyla kanal katsayısı büyük olan kullanıcıya (yakın kullanıcı) küçük güç tahsis edilmektedir ve  $c_1 < c_2$  dir. Ters durumda kanal katsayısı küçük olan kullanıcıya (uzak kullanıcı) büyük güç tahsis edilmektedir. Daha fazla güç tahsis edilen uzak kullanıcılar sinyallerini aldıkları yüksek güçten dolayı zayıflamaya veya kaybolmaya uğramadan kolaylıkla çözebilmektedirler. Daha az güç tahsis edilen yakın kullanıcı ise önce diğer kullanıcıların sinyallerini sezir toplam sinyalden çıkarttıktan sonra kendi sinyaline ulaşabilmektedir.

### 2.1. SINR Analizi ve Toplam Hız (SINR Analysis and Sum Rate)

Sinyal çözmek için kullanılan SIC yönteminde sinyal-girişim-gürültü oranı (signal-interference-noise-rate-SINR) önem arz etmektedir. Burada F kullanıcısının BS e uzak olduğunu ve diğer kullanıcıya göre daha fazla güç tahsis edildiği düşünülürse bu durumda [1]:

$$SINR^1 = \frac{Phc_1}{Phc_2 + \sigma_1^2} \quad (9)$$

S kullanıcı kendi sinyaline ulaşmadan önce F kullanıcısının sinyalini çözerken alınan SINR:

$$SINR^{2 \rightarrow 1} = \frac{Pg c_1}{Pg c_2 + \sigma_2^2} \quad (10)$$

S kullanıcısı kendi sinyalini çözerken alınan SINR:

$$SINR^2 = \frac{Pg c_2}{\sigma_2^2} \quad (11)$$

(9) ve (11) deki denklemlere göre sistemin toplam hızı:

$$R_{sum} = \sum_{i=1}^L \log g_2 (1 + SINR^i) \quad (12)$$

### 3. Anten Seçim Algoritması (Antenna Selection Algorithm)

Bu bölümde, [29]'da önerilen toplam sistem hızını artırmayı amaçlayan max-max-max ve max-min-max anten seçim algoritmaları incelenmiştir.

#### 3.1. Max-max-max Anten Seçim Algoritması (Max-max-max Antenna Selection Algorithm)

Kanal katsayı değerlerine göre seçim yapan max-max-max anten seçim algoritmasının gerçekleştirme aşamaları aşağıdaki gibidir.

Adım 1:  $\mathbf{H}$  ve  $\mathbf{G}$  matrislerinin her satırındaki maksimum eleman belirlenmiştir.

$$h_k^{max} = \max (h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{km}) \quad (13)$$

$$g_k^{max} = \max (g_{k1}, g_{k2}, \dots, g_{kn}) \quad (14)$$

Max elemanlardan bir dizi oluşturulmuştur.

$$\beta = \{(h_1^{max}, g_1^{max}), \dots, (h_k^{max}, g_k^{max})\} \quad (15)$$

Adım 2:  $\beta$  dizisinin her bir elemanın maksimum değeri bulunmuştur.

$$\alpha_i = \max (\beta_i) \quad (16)$$

Adım 3:  $\alpha$  değerleri içinde maksimum değere sahip olan  $\alpha$  nın indeksleri belirlenmiştir.

Bu maksimum  $\alpha$  değerinin indeksleri sayesinde baz istasyonunun ve kullanıcılardan birinin hangi antenle veri iletimi yapacağı bulunmuştur. Diğer kullanıcının anteni iste  $\beta$  dizisinden yararlanılarak bulunmaktadır.

#### 3.2. Max-min-max Anten Seçim Algoritması (Max-min-max Antenna Selection Algorithm)

Bu algoritmada max-max-max anten seçim algoritmasında olduğu gibi kanal katsayısı kriter olarak alınmıştır. Gerçekleşme adımları:

Adım1:  $\mathbf{H}$  ve  $\mathbf{G}$  matrislerinin her satırındaki maksimum eleman belirlenmiştir.

$$h_k^{max} = \max (h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{km}) \quad (17)$$

$$g_k^{max} = \max (g_{k1}, g_{k2}, \dots, g_{kn}) \quad (18)$$

Max elemanlardan bir dizi oluşturulmuştur.

$$T = \{\min(h_1^{max}, g_1^{max}), \dots, \min(h_k^{max}, g_k^{max})\} \quad (19)$$

Adım2:  $T$  dizisinin her bir elemanın minimum değeri bulunmuştur.

$$\delta_i = \max (T_i) \quad (20)$$

Adım3:  $\delta$  değerleri içinde maksimum değere sahip olan  $\delta$  nın indeksleri belirlenmiştir.

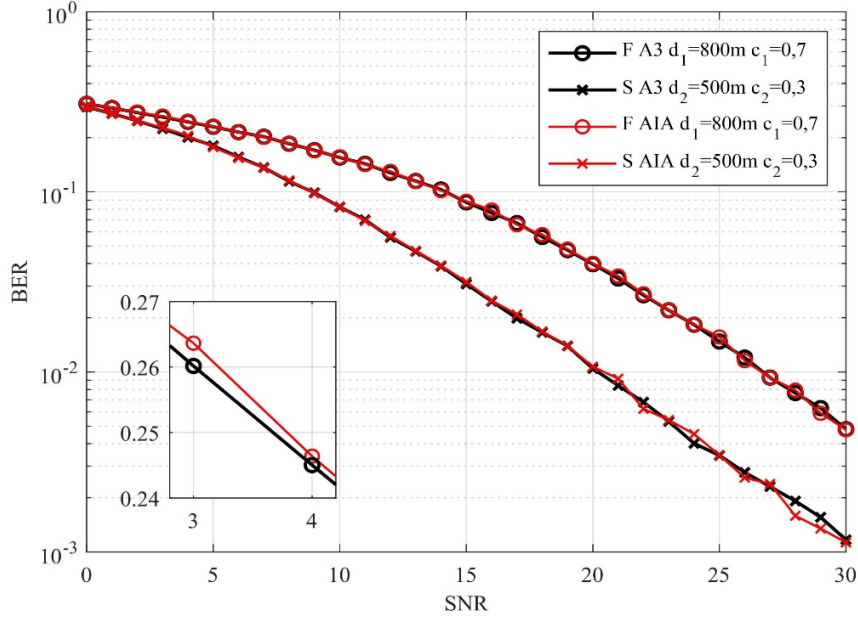
Bu maksimum  $\delta$  değerinin indeksleri sayesinde baz istasyonunun ve kullanıcılardan birinin hangi antenle veri iletimi yapacağı bulunmuştur. Diğer kullanıcının anteni iste  $T$  dizisinden yararlanılarak bulunmaktadır.

### 4. Simülasyon Sonuçları ve Tartışma (Simulation Results and Discussion)

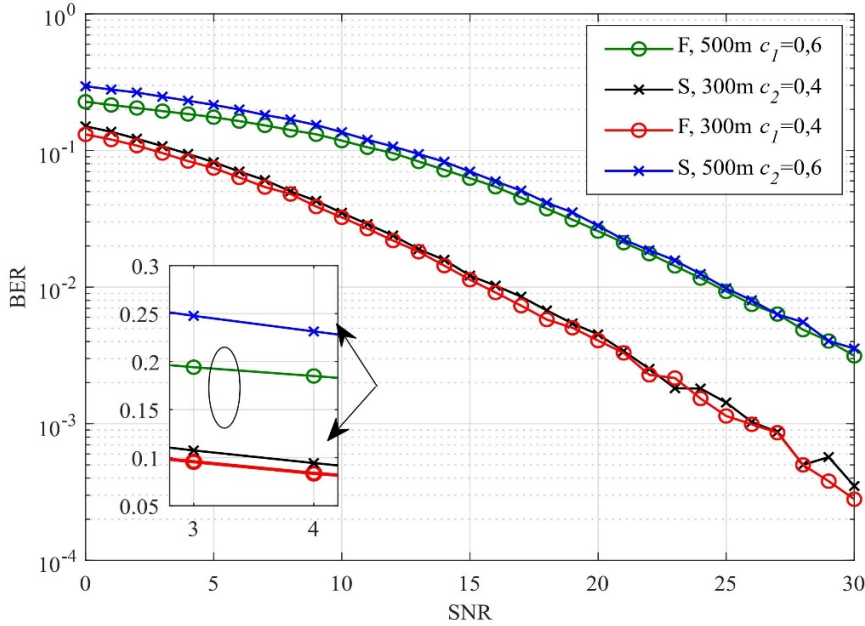
Bu bölümde iki kullanıcı MIMO-NOMA sistemine uygulanan max-max-max (A3) ve max-min-max (AIA) anten seçim algoritmaları karşılaştırılmış, BER, kesinti olasılığı ve kapasite performansları için sayısal sonuçlar sunulmuştur.  $d_1$ , BS ile F arasındaki mesafeyi  $d_2$  ise BS ile S arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. F ve S kullanıcılarına atanan güç katsayıları sırasıyla  $c_1$  ve  $c_2$  olarak gösterilmektedir.

Şekil 7'de A3 ve AIA algoritmalarının hata oranları karşılaştırılmıştır. Her iki algoritmanın neredeyse aşamalarının aynı olması elde edilen BER değerlerinde de benzerlik göstermesine neden olmuştur. Bu sebeple bundan sonraki grafiklerde A3 algoritmasının sonuçları gösterilmektedir.

A3 algoritması kullanılarak yapılan seçime bağlı performansın yer aldığı Şekil 8'de ilk olarak BS'e göre F 500 m, S ise 300 m'e alınarak simülasyon çalışması yapılmıştır. F kullanıcısının uzakta olmasından kaynaklı daha kötü performans elde edilmiştir. Bu kez de ters durum



Şekil 7. A3 ve AIA algoritmalarının SNR/BER karşılaştırılması (SNR/BER comparison of A3 and AIA algorithms)



Şekil 8. Kullanıcıların SNR/BER karşılaştırılması (SNR/BER comparison of user)

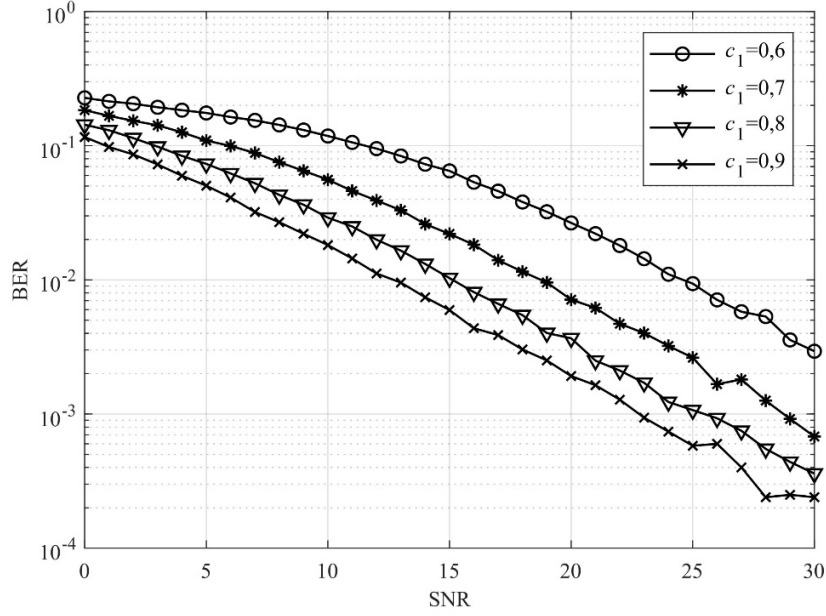
düşünüldüğü F 300 m'e, S 500 m'e alınmıştır. Yine elde edilen sonuçlar uzakta olan S kullanıcısının performansının kötü olduğunu kanıtlamıştır. Örneğin 25 dBm'de 500 m'deki kullanıcıların BER değeri yaklaşık olarak  $15 \times 10^{-3}$  iken 300 m'deki kullanıcıların  $3,5 \times 10^{-3}$ 'tür.  $11,5 \times 10^{-3}$  farkla yakındaki S kullanıcısının uzaktaki F kullanıcısına göre BER değerinde performans üstünlüğü görülmektedir.

Şekil 9'da F ve S kullanıcısının sırasıyla 600 m ve 400 m de olduğu düşünülerek F kullanıcısına S kullanıcısından daha fazla olacak şekilde farklı güç katsayıları tahsis edilmiştir. Bunu yaparken toplam değerin 1'i aşmamasına özen gösterilmiştir. Örneğin  $c_1=0,6$  iken  $c_2=0,4$  tür. Elde edilen sonuçlar tahsis edilen güç değeri arttıkça

sinyalde oluşacak BER değerinde azalma olduğunu göstermektedir. Örneğin, 20 dBm'de güç katsayısı 0,6'dan 0,9'a doğru giderken BER değerlerinde sırasıyla  $47 \times 10^{-3}$ ,  $14 \times 10^{-3}$ ,  $7 \times 10^{-3}$  ve  $4 \times 10^{-3}$  azalma gerçekleşmektedir. Elde edilen değerler Tablo 1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Kullanıcılara tahsis edilen güç katsayıları ( $c_1 = 0,6$ ,  $c_1 = 0,4$ ) ve S kullanıcısının BS e olan uzaklığı ( $d_2 = 300$  m) sabit tutularak F kullanıcısının bulunduğu konumun değiştirilmesi sonucu elde edilen performans Şekil 10'da verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere uzaklık arttıkça aynı güç tahsis edilmesinden dolayı sinyalde alınacak olan hata oranları artmaktadır. Örneğin, 25 dBm'de uzaklık 400 m'den 900 m'e doğru arttıkça hata oranları sırasıyla  $3,8 \times 10^{-3}$ ,

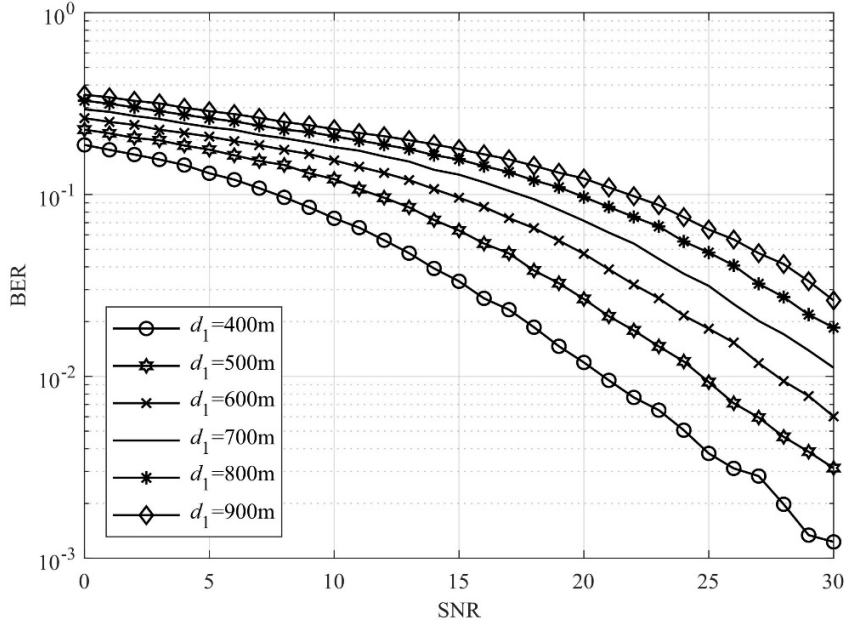




Şekil 9. Farklı güç katsayılarına göre SNR-BER grafiği (SNR-BER graph according to different power coefficients)

Tablo 1. Şekil 9'un sayısal sonuçları (Numeric result of Figure 9)

	0	5	10	15	20	25	30
$c_1=0,6$	0,265	0,21	0,155	0,096	0,047	0,017	0,006
$c_1=0,7$	0,23	0,156	0,09	0,04	0,014	0,0054	0,0015
$c_1=0,8$	0,198	0,115	0,055	0,021	0,007	0,002	0,00082
$c_1=0,9$	0,17	0,09	0,036	0,0125	0,004	0,0012	0,00032



Şekil 10. F kullanıcısının konumuna göre SNR-BER grafiği (SNR-BER graph according to location of user F)

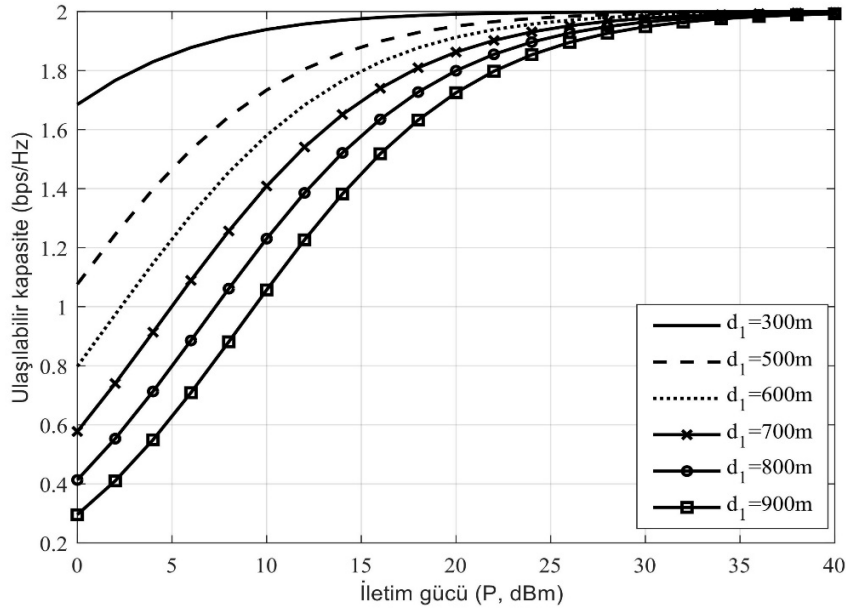
$9,3 \times 10^{-3}$ ,  $18 \times 10^{-3}$ ,  $31 \times 10^{-3}$ ,  $48 \times 10^{-3}$  ve  $64 \times 10^{-3}$  şeklinde artmaktadır. Elde edilen değerler Tablo 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 11'de uzaklığa göre ulaşılabilir kapasite performansı gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere kullanıcının baz istasyonuna olan uzaklığı arttıkça kapasite başarımı azalmaktadır. Örneğin, iletim gücü 10 dBm iken mesafe artışına göre sırasıyla

yaklaşık olarak 1,94, 1,74, 1,58, 1,41, 1,24 ve 1,06 bps/Hz spektral verimlilikleri elde edilmiştir. Elde edilen diğer değerler Tablo 3'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Şekil 12'de farklı hedef/istenilen hız (QoS isterleri) değerleri için kesinti olasılığı performansları gösterilmiştir. Bazı senaryolarda

**Tablo 2.** Şekil 10'un sayısal sonuçları (Numeric result of Figure 10)

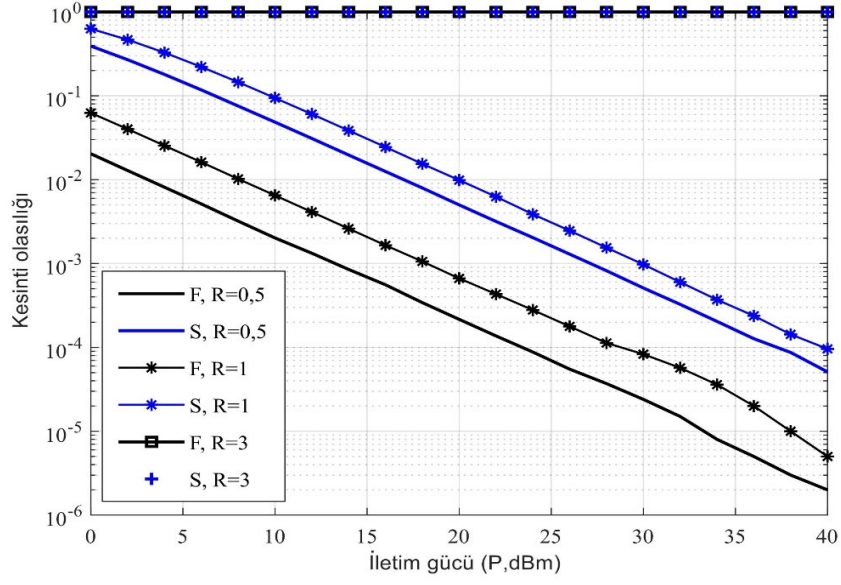
	0	5	10	15	20	25	30
$d_1=400$	0,188	0,131	0,074	0,033	0,011	0,0038	0,001
$d_1=500$	0,227	0,176	0,122	0,063	0,026	0,0093	0,003
$d_1=600$	0,263	0,208	0,154	0,096	0,047	0,018	0,006
$d_1=700$	0,295	0,234	0,182	0,128	0,072	0,031	0,011
$d_1=800$	0,33	0,262	0,209	0,156	0,097	0,048	0,018
$d_1=900$	0,35	0,288	0,228	0,178	0,122	0,064	0,026

**Şekil 11.** Fariklı uzaklıktaki F kullanıcılarının ulaşılabilir kapasite performansları (Achievable capacity performance of F user at different distance)**Tablo 3.** Şekil 11'in sayısal sonuçları (Numeric result of Figure 11)

	0	5	10	15	20	25	30
$d_1=400$	1,68	1,85	1,94	1,97	1,98	1,99	1,99
$d_1=500$	1,07	1,47	1,74	1,88	1,95	1,98	1,99
$d_1=600$	0,79	1,24	1,58	1,80	1,91	1,96	1,98
$d_1=700$	0,57	1,00	1,41	1,70	1,86	1,94	1,97
$d_1=800$	0,41	0,80	1,24	1,58	1,8	1,91	1,96
$d_1=900$	0,29	0,63	1,06	1,45	1,73	1,87	1,94

NOMA'da her iki kullanıcı için de kesinti olasılığının 1 olduğu gözükmektedir. Bu durum seçilen güç paylaşım katsayısı ile NOMA'nın isterleri karşılayamamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle güç paylaşım katsayılarının ve QoS isterlerine göre doğru seçilmesi son derece önemlidir. Ayrıca, ister değerleri arttıkça her kullanıcının kendi içinde kesinti olasılığı artmaktadır. Örneğin, 30 dBm'de S kullanıcısının ister değeri 0,5 ve 1 iken kesinti olasılığı değerleri sırasıyla  $5,2 \times 10^{-4}$  ve  $10 \times 10^{-4}$ 'tür. Aynı durum F kullanıcısı içinde geçerli olup yine 30 dBm'de ister değerleri 0,5 ve 1 iken kesinti olasılığı değerleri sırasıyla  $2,5 \times 10^{-5}$  ve  $6,5 \times 10^{-5}$ 'tür. Elde edilen diğer değerler Tablo 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

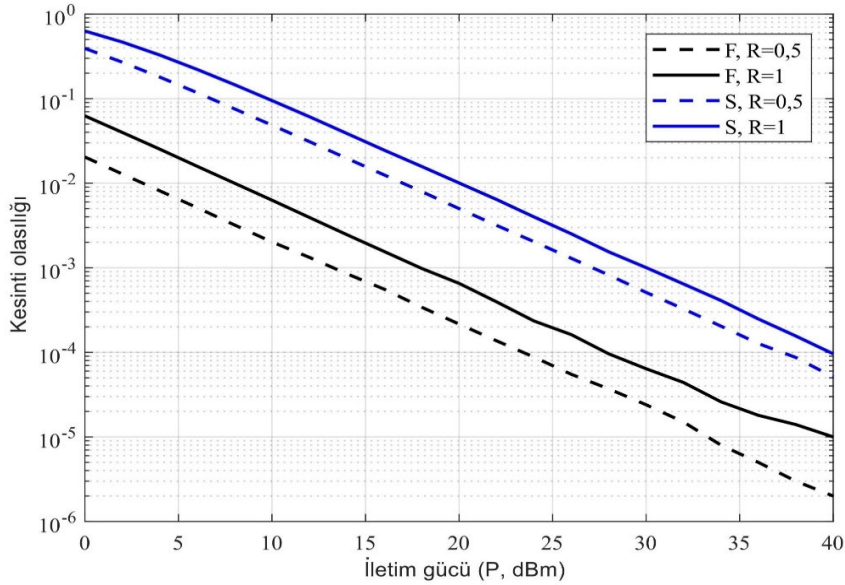
Şekil 13'te kullanıcılar için QoS isterleri  $R=0,5$  BPCU ve  $R=1$  BPCU olacak şekilde seçilerek kesinti olasılığı performansı gösterilmiştir. 300 ve 500 m'ye konumlandırılmış F ve S kullanıcılardan yakın kullanıcının uzak kullanıcıya göre kesinti olasılığı performansının daha iyi olduğu açıkça gözükmektedir. Örneğin, 20 dBm'de  $R=0,5$  BPCU iken F ve S kullanıcısının kesinti olasılığı değerleri sırasıyla  $2,2 \times 10^{-4}$  ve  $5 \times 10^{-3}$ 'tür.  $R=1$  BPCU iken F ve S kullanıcısının kesinti olasılığı değerleri sırasıyla  $6,4 \times 10^{-4}$  ve  $10 \times 10^{-3}$ 'dir. Bu durum yakın kullanıcıda uzak kullanıcıya ait QoS isterlerinin sağlanamaması sonucu yakın kullanıcının da SIC sonrasında kesintiye uğramasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen diğer değerler Tablo 5'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 12. Kesinti olasılığı (Outage probability)

Tablo 4. Şekil 12'nin sayısal sonuçları (Numeric result of Figure 12)

	0	5	10	15	20	25	30	35	40
F R=0,5	$2 \times 10^{-2}$	$6,410^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$6,5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$
S R=0,5	$4 \times 10^{-1}$	$14 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	$16 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$16 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$
F R=1	$6 \times 10^{-2}$	$20 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$6,6 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
S R=1	$6 \times 10^{-1}$	$27 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$31 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$	$31 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
F R=3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F R=3	1	1	1	1	1	1	1	1	1



Şekil 13. Kesinti olasılığı (Outage probability)

**Tablo 5.** Şekil 13'ün sayısal sonuçları (Numeric result of Figure 13)

	0	5	10	15	20	25	30	35	40
F R=0,5	$2 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$0,65 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$
S R=0,5	$39 \times 10^{-2}$	$15,5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	$16 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-5}$
F R=1	$6,3 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$19 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-5}$	$2,15 \times 10^{-5}$	$10 \times 10^{-6}$
S R=1	$63 \times 10^{-2}$	$27 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^{-2}$	$31 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-5}$

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu makalede iki kullanıcıya aşağı-hat MIMO-NOMA sistem için aynı anda hem verici hemde alıcı tarafta anten seçimi yapılmasına bağlı BER, kesinti olasılığı ve kapasite performansları incelenmiştir. Burada literatürde yer edinmiş max-max (A3) ve max-min-max (A1A) anten seçim algoritmaları kullanılmıştır. Maksimum kanal katsayısına göre seçim yapan bu algoritmalar için kullanıcının uzaklığı da kanal katsayısı kadar öneme sahiptir. BS e göre yakında olan kullanıcıların kanal katsayısı daha iyi iken uzakta olan kullanıcı için durum tam tersidir. Bu durumda baz istasyonuna yakın olan kullanıcının uzak olan kullanıcıya göre BER performansının daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir. Baz istasyonuna olan mesafe azaldıkça BER değerlerinde iyileşme, kapasitede artış ve kesinti olasılığında düşüşün gerçekleşmiştir. Ayrıca kullanıcıların kanal katsayısı, onlara tahsis edilecek güç katsayısını belirlemede rol oynamaktadır. Kanal katsayısı yüksek olana düşük güç, düşük olana yüksek güç tahsis edilmektedir. Baz istasyonuna uzak olan kullanıcının kanal katsayısı daha kötü olacağından bu kullanıcıya diğer kullanıcıdan az olmamak koşuluyla farklı değerlerde güç tahsis edildiğinde BER performansının güç katsayısındaki artışa göre olumlu yönde etkilendiği ortaya konulmuştur.

## Kaynaklar (References)

- Kızılımak R. Ç., Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks, Towards 5G Wireless Networks-A Physical Layer Perspective, Editör: Hossein Khaleghi Bizaki, InTech, Rijeka, 83-98, 2016.
- Dai L., Wang B., Yuan Y., Han S., Chih-Lin I., Wang Z., Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends, IEEE Communications Magazine, 53 (9), 74-81, 2015.
- Kara F., Kaya H., Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA): Gelecek Nesil Radyo Erişim Ağlarında Kitlesel Erişimin ve Spektral Verimliliğin Sağlanması için Çözüm, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 9 (1), 152-165, 2019.
- Aldababsa M., Toka M., Gökçeli S., Kurt G. K., Kucur O., A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond, Wireless Communications and Mobile Computing, 2018, 24, 2018.
- Maatouk A., Assaad M., Ephremides A., Minimizing The Age of Information: NOMA or OMA?, IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Paris-France, 102-108, 29 April-2 May, 2019.
- Ding Z., Liu Y., Choi J., Sun Q., ElKashlan M., Chih-Lin I., Vincent H., Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks, IEEE Communications Magazine, 55 (2), 185-191, 2017.
- Dai L., Wang B., Ding Z., Wang Z., Chen S., Hanzo L., A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20 (3), 2294 – 2323, 2018.
- Saito Y., Kishiyama Y., Benjebbour A., Nakamura T., Li A., Higuchi K., Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access, IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Dresden-Germany, 1-5, 2-5 Haziran, 2013.
- Ding Z., Peng M., Poor H. V., Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems, IEEE Communications Letters, 19 (8), 1462-1465, 2015.
- Sun Y., Ding Z., Dai X., Karagiannidis G., A Novel Network NOMA Scheme for Downlink Coordinated Three-Point Systems, arXiv:1708.06498 [cs.IT], [Online]. <https://arxiv.org/pdf/1708.06498.pdf>, Dec 2017.
- Islam R. S. M., Zeng M., Dobre O. A., Kwak K. S., Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): How It Meets 5G and Beyond, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.
- Liu Y., Qin Z., ElKashlan M., Ding Z., Nallanathan A., Hanzo L., Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond, Proceedings of the IEEE, 105 (12), 2347 – 2381, 2017.
- Wang B., Wang K., Lu Z., Xie T., Quan J., Comparison Study of Non-Orthogonal Multiple Access Schemes for 5G, 2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Ghent-Belgium, 1-5, 17-19 Haziran, 2015.
- Durak M. H., Ertuğ Ö., Compressed Sensing Based Multiuser Detection for Sparse Code Multiple Access, 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Sivas-Türkiye, 1-4, 24-26 April, 2019.
- Tuna E. B., Karaerik K., Yaşar S., Sinop H., Tek Y. İ., Özen A., Investigation of the Effects of Different Codebooks on the Performance of Code Domain NOMA Systems, 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Online, 1-4, 5-7 October, 2020.
- Yuan Z., Yu G., Li W., Yuan Y., Wang X., Xu J., Multi-User Shared Access for Internet of Things, IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing-China, 1-5, 15-18 May, 2016.
- Gökten Ç., Yılmaz A., Dizdar O., Evaluation of 5G New Radio Non-orthogonal Multiple Access Methods for Military Applications, arXiv preprint arXiv:1805.01125, 2018.
- Kara F., Kaya H., The Error Performance Analysis of the Decode-Forward Relay-Aided-NOMA Systems and A Power Allocation Scheme for User Fairness, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 97-108, 2020.
- Molish A. F., Win M. Z., MIMO Systems with Antenna Selection, IEEE Microwave Magazine, 5 (1), 46-56, 2004.
- Wang Q., Ge J., Li Q., Bu Q., Performance Analysis of NOMA for Multiple-Antenna Relaying Networks with Energy Harvesting over Nakagami-m Fading Channels, IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Qingdao-China, 1-5, 22-24 October, 2017.
- Yu Y., Chen H., Li Y., Ding Z., Zhuo L., Antenna Selection in MIMO Cognitive Radio-Inspired NOMA Systems, IEEE Communications Letters, 21 (12), 2658 – 2661, 2017.
- Shrestha A. P., Han T., Bai Z., Kim J. M., Kwak K. S., Performance of Transmit Antenna Selection in Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Systems, 8th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Vienna-Avusturya, 1031-1034, 5-8 July, 2016.
- Do N. T., Costa D. B., Duong T. Q., An B., Transmit Antenna Selection Schemes for MISO-NOMA Cooperative Downlink Transmissions with Hybrid SWIPT Protocol, IEEE International Conference on Communications in China (ICC), Paris-France, 1-6, 21-25 May, 2017.
- Liu X., Wang X., Efficient Antenna Selection and User Scheduling in 5G Massive MIMO-NOMA System, IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing-China, 1-5, 15-18 May, 2016.
- Guowei L., Sunqing S., Antenna Selection for Non-orthogonal Multiple Access with Space Time Block Codes, 8th International Conference on Information, Communication and Networks (ICIN), Xi'an-China, 141 – 145, 22-25 August, 2020.
- Al-Hussaibi W. A., Ali F. H., Efficient User Clustering, Receive Antenna Selection, and Power Allocation Algorithms for Massive MIMO-NOMA Systems, IEEE Access, 7, 1865 – 31882, 2019.
- Aldababsa M., Kucur O., Outage Performance of NOMA with TAS/MRC in Dual Hop AF Relaying Networks, 2017 Advances in

- Wireless and Optical Communications (RTUWO), Riga-Letonya, 137-141, 2-3 November, 2017.
28. Tran D. D., Tran H. V., Ha D. B., Kaddoum G., Secure Transmit Antenna Selection Protocol for MIMO NOMA Networks Over Nakagami-m Channels, *IEEE Systems Journal*, 14 (1), 253-264, 2020.
  29. Yu Y., Chen H., Li Y., Ding Z., Song L., Vucetic B., Antenna Selection for MIMO Nonorthogonal Multiple Access Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (4), 3158-3171, 2018.
  30. Li Q., Ge J., Wang Q., Bu Q., Joint Antenna Selection for MIMO-NOMA Networks Over Nakagami-m Fading Channels, *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Qingdao-China, 1-6, 22-24 October, 2017.

