

# Ortam Tabanlı Modülasyon Destekli Dik Olmayan Çoklu Erişim

## Media-Based Modulation Assisted Non-Orthogonal Multiple Access

Mehmet Can, İbrahim Altunbaş  
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
Email: {canmehmet, ibraltunbas}@itu.edu.tr

Ertuğrul Başar  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
Email: ebasar@ku.edu.tr

**Özetçe** —Bu çalışmada, aşağı yönlü iletişim sistemleri için ortam tabanlı modülasyon (MBM) ile dik olmayan çoklu erişim (NOMA) birleştirilerek yüksek bant verimliliğinde daha iyi performans elde edilmesi amaçlanmıştır. Önerilen sistemin ortalama bit hata olasılığı için üst sınır ifadesi kapalı formda elde edilmiştir. Sistemin performansı sabit ve işaret gürültü oranı (SNR) değerlerine göre değişen güç tahsis yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Önerilen sistemin geleneksel NOMA sistemlerine göre özellikle yüksek bant verimliliğinde daha iyi hata performansı sağladığı gösterilmiştir. Elde edilen analitik sonuçlar bilgisayar benzetimleri ile desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—dik olmayan çoklu erişim, ortam tabanlı modülasyon, bit hata oranı.

**Abstract**—In this paper, we aim to obtain better performance at high spectral efficiencies for downlink communication systems by combining media-based modulation (MBM) with non-orthogonal multiple access (NOMA). An union bound for the average bit error probability of the proposed system is derived in closed-form. The performance of the system has been investigated by using power allocation methods, which are constant and vary according to signal-to-noise ratio (SNR) values. It is shown that the proposed system provides better error performance compared to conventional NOMA systems, especially in high spectral efficiency. The accuracy of the theoretical analysis is verified by computer simulations.

**Keywords**—non-orthogonal multiple access, media-based modulation, bit error rate

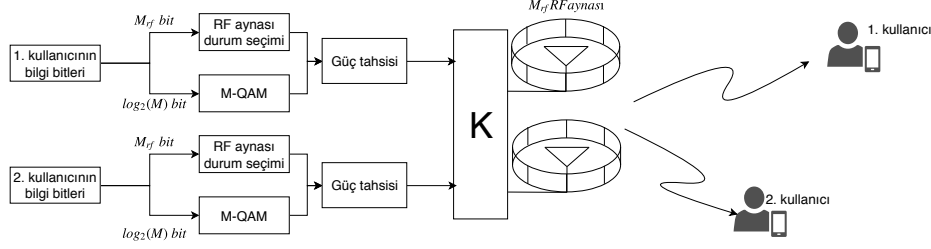
### I. GİRİŞ

Dik olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access, NOMA), sağladığı yüksek bant verimliliği ve yüksek kanal kapasitesi nedeniyle gelecek nesil telsiz iletişim sistemleri için umut verici bir çoklu erişim tekniği olarak öne çıkmaktadır. Klasik dik çoklu erişim (orthogonal multiple access, OMA) tekniklerinde farklı kullanıcılar, girişimden kaçınmak için belirli bir zaman dilimi, frekans bandı veya kod içinde birbirine dik iletişim kaynaklarını kullanabilir. NOMA’da ise temel fikir, kullanıcıların işaretlerinin, aynı zaman ve frekans bandında bir dereceye kadar girişime izin verilerek güç ekseninde farklı

değerlerle çarpılıp süperpozisyon yöntemiyle iletilmesidir. Bu teknikte, güçlü kanal durumuna sahip kullanıcıya düşük, zayıf kanal durumuna sahip kullanıcıya yüksek güç ataması yapılır. Bu sayede OMA’ya göre daha yüksek bir bant verimliliği sağlanır [1]. Alıcıda ardışık girişim giderme (successive interference cancellation, SIC) yöntemi ile daha yüksek güç atanmış kullanıcıların işaretleri tek tek çözülüp alınan toplam işaretten çıkarılarak kullanıcının simgeleri elde edilir.

İndis modülasyonu (index modulation, IM), sayısal iletişim sisteminin ana bileşenlerinin indislerini kullanarak ek bilgi iletilmesini sağlayan yüksek bant ve enerji verimlilikli modülasyon şemalarından biridir. IM’nin en iyi bilinen şekilleri uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) [2] ve uzay kaydırmalı anahtarlama (space shift keying, SSK) [3], bilgi bitlerinin iletiminde çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemlerin verici antenlerinin indislerini kullanarak yüksek bant ve enerji verimliliği sağlamaktadır. IM’nin farklı bir uygulaması olarak yakın zamanda önerilen ortam tabanlı modülasyonda (media-based modulation, MBM) [4], [5] ise RF aynaları (RF mirrors) ya da elektronik anahtarlarla verici antenin karakteristiği bilgi bitlerine göre değiştirilmektedir. RF aynalarının ya da elektronik anahtarların açık veya kapalı olma durumlarına göre antenin ışınma örüntüsü ve polarizasyon gibi parametreleri değiştirilerek çok yönlü sönmüleme kanalının karakteristiği değiştirilmektedir [6]. MBM’de iletimde, karakteristiği bu yollarla değiştirilmiş kanalların indisleri kullanılmaktadır. SM ve SSK, veri hızını arttırmak için önemli miktarda verici antene ihtiyaç duyarken, MBM birden fazla RF aynası veya çoklu elektronik anahtarla donatılmış tek bir verici antenle bile aynı veri hızına ulaşabilir. [4]’te MBM sistemlerin tek-girişli çok-çıkışlı (SIMO) sistemlere göre kanal kapasitesini artırdığı gösterilmiştir. [7]’de MBM ile SM’in sadece anten indisini kullanan biçimi olan uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) teknikleri birleştirilmiştir. [8]’de MBM ve SSK modülasyonları “kanal modülasyonu” adı altında genelleştirilmiş ve Alamouti uzay-zaman blok kodlamalı [9] MBM sistemleri önerilmiştir. Literatürde, NOMA sistemlerinde IM tekniklerinin uygulanması çalışmaları bulunmaktadır. Bant verimliliğini düşürmeden kullanıcılar arasında girişimi önleyen NOMA tabanlı bir SM yapısı [10]’da önerilmiştir. [11]’de, NOMA ile SM teknikleri birleştirilerek alıcı kısımda SIC yöntemini kullanmaya gerek bırakmayan bir yapı önerilmiştir. Bilindiği kadarıyla MBM ve NOMA tekniklerini birleştiren bir çalışma literatürde henüz yer almamaktadır.

Bu çalışma 117E869 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.



Şekil 1: Sistem modeli.

Bu çalışmada aşağı yönlü (downlink, DL) iletişim için NOMA sisteminde MBM tekniğinin kullanılması önerilmektedir. Bu yolla yüksek bant verimlilikleri az sayıda antenler olarak elde edilebilecektir. Ayrıca, bilgi bitlerinin sadece klasik modülasyon ile değil etkin kanal durumlarının indisleri ile de iletilmesiyle kullanıcılar arası girişim azaltılarak yüksek bant verimliliğinde daha iyi hata performansı sağlanması amaçlanmaktadır. Önerilen sistemin ortalama bit hata olasılığı (average bit error probability, ABEP) analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca önerilen sistemin hata performansı geleneksel NOMA sistemiyle karşılaştırılmış ve özellikle yüksek bant verimliliğinde daha iyi hata performansı elde edildiği gösterilmiştir.

## II. SİSTEM MODELİ

Bu çalışmada ele alınan DL NOMA şeması için bir kaynak ve iki kullanıcıdan oluşan sistem modeli Şekil 1'de verilmektedir. Kaynakta (K) iki anten bulunmaktadır ve her anten  $M_{r,f}$  adet RF aynasıyla donatılmıştır. Bu durumda ideal olarak antenlerde  $N = 2^{M_{r,f}}$  farklı kanal gerçekleştirilmesi elde edilebilir. Her kullanıcıda  $N_r$  alıcı anten bulunmaktadır. Bu yapıda her anten bir kullanıcıya ayrılmıştır. Kullanıcıların ilk  $M_{r,f}$  bitlerine göre antenlerdeki RF aynalarının açık ve kapalı durumları ayarlanarak etkin kanal durumu belirlenir. Bilgi bitlerinin  $\log_2(M)$  tanesi de  $M$ -QAM simgesine eşlenerek tahsis edilen güç katsayısıyla ölçeklendirilip belirlenen kanaldan iletilir. Bu durumda her bir kullanıcı için bant verimliliği  $\eta = M_{r,f} + \log_2(M)$  bit/sn/Hz olacaktır. Birinci kullanıcının zayıf, ikinci kullanıcının güçlü kanala sahip olduğu varsayılarak kullanıcılara tahsis edilen güç katsayıları arasında,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  olmak üzere  $\alpha_1 > \alpha_2$  ilişkisi vardır. İncelenen sistemde kullanıcılarda alınan toplam işaret

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_{i,l} \sqrt{P_s \alpha_1} x_q + \mathbf{g}_{i,k} \sqrt{P_s \alpha_2} x_p + \mathbf{n}_i \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\mathbf{h}_{i,l}, \mathbf{g}_{i,k} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ ,  $l, k = 1, 2, \dots, N$  olmak üzere sırasıyla birinci ve ikinci anten ile kullanıcılar arasındaki etkin  $l$ . ve  $k$ . kanal katsayısı vektörleri olup elemanları bağımsız ve aynı parametrelili  $\mathcal{CN}(0, \Omega_i)$  dağılımlıdır. Dolayısıyla kanal katsayılarının zarfı Rayleigh dağılımlıdır.  $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ ,  $\mathcal{CN}(0, 1)$  dağılımına sahip toplamsal Gauss gürültüsü vektörüdür.  $P_s$  toplam verici gücünü göstermektedir.  $x_q$  ve  $x_p$  sırasıyla birinci ve ikinci kullanıcının bilgi bitlerine göre eşlenen  $M$ -QAM simgesidir.

Çözme işlemi sırasında, ikinci kullanıcının işareti gürültü gibi varsayılarak en büyük olabilirlik (maximum likelihood, ML) tekniği ile birinci kullanıcının bilgisine aşağıdaki gibi karar verilir:

$$\hat{l}, x_{\hat{q}} = \arg \min_{l,q} \left\| \mathbf{y}_1 - \mathbf{h}_{1,l} \sqrt{P_s \alpha_1} x_q \right\|^2. \quad (2)$$

İkinci kullanıcının işareti belirlenirken SIC yöntemi kullanılır. İlk olarak birinci kullanıcının bilgisine ML tekniği ile aşağıdaki gibi karar verilir ve karar verilen işaret ikinci kullanıcının işaretinden çıkarılır:

$$\hat{l}, x_{\hat{q}} = \arg \min_{l,q} \left\| \mathbf{y}_2 - \mathbf{h}_{2,l} \sqrt{P_s \alpha_1} x_q \right\|^2. \quad (3)$$

SIC sonucu oluşan işaret

$$\mathbf{y}'_2 = \mathbf{y}_2 - \mathbf{h}_{2,\hat{l}} \sqrt{P_s \alpha_1} x_{\hat{q}} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Son olarak ikinci kullanıcının bilgisi aşağıdaki gibi bulunur:

$$\hat{k}, x_{\hat{p}} = \arg \min_{k,p} \left\| \mathbf{y}'_2 - \mathbf{g}_{2,k} \sqrt{P_s \alpha_2} x_p \right\|^2. \quad (5)$$

## III. ORTALAMA BİT HATA OLASILIĞI ANALİZİ

Bu bölümde MBM destekli NOMA sisteminde her kullanıcı için ABEP ifadesi çiftsel hata olasılığı (pairwise error probability, PEP) yaklaşımı kullanılarak bulunacaktır. Birleşim üst sınırı (union bound) [12] yaklaşımı kullanılarak birinci ve ikinci kullanıcı için ABEP ifadeleri sırasıyla

$$P_{b,1} \leq \sum_{x_{lq}} \sum_{x_{i\hat{q}}} \sum_{x_p} \frac{Pr(x_{lq} \rightarrow x_{i\hat{q}} | x_p) e(x_{lq} \rightarrow x_{i\hat{q}})}{NM^2 \log_2(NM)} \quad (6)$$

$$P_{b,2} \leq \sum_{x_{kp}} \sum_{x_{\hat{k}\hat{p}}} \sum_{x_{lq}} \sum_{x_{i\hat{q}}} \frac{P(x_{kp} \rightarrow x_{\hat{k}\hat{p}} | x_{lq}, x_{i\hat{q}}) P(x_{lq} \rightarrow x_{i\hat{q}} | x_p)}{N^2 M^2 \log_2(NM)} \times e(x_{kp} \rightarrow x_{\hat{k}\hat{p}}) \quad (7)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada  $x_{ij}$ ,  $i$ . etkin kanaldan  $x_j$  simgesinin iletildiği durumu temsil etmektedir.  $Pr(x_{ij} \rightarrow x_{\hat{i}\hat{j}} | x_u)$  ve  $e(x_{ij} \rightarrow x_{\hat{i}\hat{j}})$  sırasıyla belli bir  $x_u$  için  $x_{ij}$  iletildiği durumda yanlışlıkla  $x_{\hat{i}\hat{j}}$  olarak karar verilmesinin çiftsel hata olasılığı ve bu durumda oluşacak bit hata sayısını göstermektedir.

### A. Birinci Kullanıcı İçin Ortalama PEP Hesabı

Birinci kullanıcı için koşullu PEP (conditional PEP, CPEP) ifadesi (2)'den yararlanarak

$$\begin{aligned} Pr(x_{lq} \rightarrow x_{\hat{l}q} | x_p, \mathbf{h}, \mathbf{g}) &= Pr\left\{\left\|\mathbf{y}_1 - \mathbf{h}_{1,l}\sqrt{P_s\alpha_1}x_q\right\|^2\right. \\ &\geq \left\|\mathbf{y}_1 - \mathbf{h}_{1,\hat{l}}\sqrt{P_s\alpha_1}x_{\hat{q}}\right\|^2 \left. \middle| x_p, \mathbf{h}, \mathbf{g}\right\} \\ &= Pr\left\{P_s\alpha_1\left\|\mathbf{h}_{1,l}x_q - \mathbf{h}_{1,\hat{l}}x_{\hat{q}}\right\|^2\right. \\ &\quad \left.- 2\mathcal{R}\{\mathbf{y}_1^H(\mathbf{h}_{1,l}x_q - \mathbf{h}_{1,\hat{l}}x_{\hat{q}})\} \geq 0 \middle| x_p, \mathbf{h}, \mathbf{g}\right\} \\ &= Pr(\xi \geq 0 | x_p, \mathbf{h}, \mathbf{g}) \end{aligned} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir.  $\xi$ 'ye ait beklenen değer ve varyans ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} E[\xi] &= -P_s\alpha_1\|\mathbf{h}_{1,l}x_q - \mathbf{h}_{1,\hat{l}}x_{\hat{q}}\|^2 \\ Var[\xi] &= 2P_s\alpha_1\|\mathbf{h}_{1,l}x_q - \mathbf{h}_{1,\hat{l}}x_{\hat{q}}\|^2 (P_s\alpha_2\|\mathbf{g}_{1,k}\|^2|x_p|^2 + 1). \end{aligned} \quad (9)$$

(9)'daki sonuçlar eşliğinde, (8)'deki CPEP ifadesi,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$  fonksiyonu kullanılarak

$$\begin{aligned} Pr(x_{lq} \rightarrow x_{\hat{l}q} | x_p, \mathbf{h}, \mathbf{g}) &= Q\left(\sqrt{\frac{P_s\alpha_1\|\mathbf{h}_{1,l}x_q - \mathbf{h}_{1,\hat{l}}x_{\hat{q}}\|^2/2}{P_s\alpha_2\|\mathbf{h}_{2,q}x_p\|^2 + 1}}\right) \\ &= Q(\sqrt{\gamma}) \end{aligned} \quad (10)$$

biçiminde yazılabilir. Burada  $\gamma$ ,  $Gamma(N_r, \bar{\gamma})$  dağılımına sahiptir [3] ve  $\bar{\gamma}$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\bar{\gamma} = \begin{cases} \frac{P_s\Omega_1\alpha_1|x_q - x_{\hat{q}}|^2/2}{P_s\Omega_1\alpha_2|x_p|^2 + 1} & l = \hat{l} \\ \frac{P_s\Omega_1\alpha_1|x_q - x_{\hat{q}}|^2/2}{P_s\Omega_1\alpha_2|x_p|^2 + 1} & l \neq \hat{l}. \end{cases} \quad (11)$$

Ayrıca, bilindiği üzere PEP, moment üreten fonksiyon (moment generating function, MGF) [12] yardımıyla

$$Pr(x_{lq} \rightarrow x_{\hat{l}q} | x_p) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_\gamma\left(\frac{1}{2\sin^2(\theta)}\right) d\theta. \quad (12)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $M_\gamma(s)$ ,  $\gamma$ 'nın MGF ifadesidir ve Rayleigh kanal için  $M_\gamma(s) = (1+s\bar{\gamma})^{-N_r}$  biçiminde tanımlıdır [12]. (12)'deki integral [12, 5A.4a] kullanılarak kapalı formda aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$Pr(x_{lq} \rightarrow x_{\hat{l}q} | x_p) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \mu \sum_{j=0}^{N_r-1} \binom{2j}{j} \left(\frac{1-\mu^2}{4}\right)^j \right]. \quad (13)$$

Burada  $\mu = \sqrt{\frac{\bar{\gamma}/2}{1+\bar{\gamma}/2}}$  olarak tanımlıdır.

### B. İkinci Kullanıcı İçin Ortalama PEP Hesabı

İkinci kullanıcı için (8)'deki ifade (5) kullanılarak çözümlerse CPEP

$$\begin{aligned} Pr(x_{kp} \rightarrow x_{\hat{k}\hat{p}} | x_{lq}, x_{\hat{l}q}, \mathbf{h}, \mathbf{g}) \\ = Q\left(\sqrt{\frac{P_s\alpha_2\|\mathbf{g}_{2,k}x_p - \mathbf{g}_{2,\hat{k}}x_{\hat{p}}\|^2/2}{P_s\alpha_1\|\mathbf{h}_{2,l}x_q - \mathbf{h}_{2,\hat{l}}x_{\hat{q}}\|^2 + 1}}\right) = Q(\sqrt{\zeta}) \end{aligned} \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\zeta$ ,  $Gamma(N_r, \bar{\zeta})$  dağılımına sahiptir ve  $\bar{\zeta}$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\bar{\zeta} = \begin{cases} \frac{P_s\Omega_2\alpha_2|x_p - x_{\hat{p}}|^2/2}{P_s\Omega_2\alpha_1|x_q - x_{\hat{q}}|^2 + 1} & k = \hat{k}, l = \hat{l}, \\ \frac{P_s\Omega_2\alpha_2|x_p - x_{\hat{p}}|^2/2}{P_s\Omega_2\alpha_1(|x_q|^2 + |x_{\hat{q}}|^2) + 1} & k = \hat{k}, l \neq \hat{l}, \\ \frac{P_s\Omega_2\alpha_2(|x_p|^2 + |x_{\hat{p}}|^2)/2}{P_s\Omega_2\alpha_1|x_q - x_{\hat{q}}|^2 + 1} & k \neq \hat{k}, l = \hat{l}, \\ \frac{P_s\Omega_2\alpha_2(|x_p|^2 + |x_{\hat{p}}|^2)/2}{P_s\Omega_2\alpha_1(|x_q|^2 + |x_{\hat{q}}|^2) + 1} & k \neq \hat{k}, l \neq \hat{l}. \end{cases} \quad (15)$$

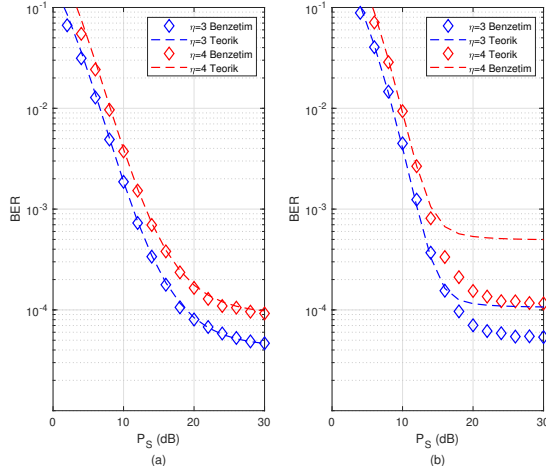
İkinci kullanıcının PEP ifadesi  $\mu = \sqrt{\frac{\bar{\zeta}/2}{1+\bar{\zeta}/2}}$  olmak üzere (13)'teki gibi hesaplanır.

## IV. NÜMERİK SONUÇLAR

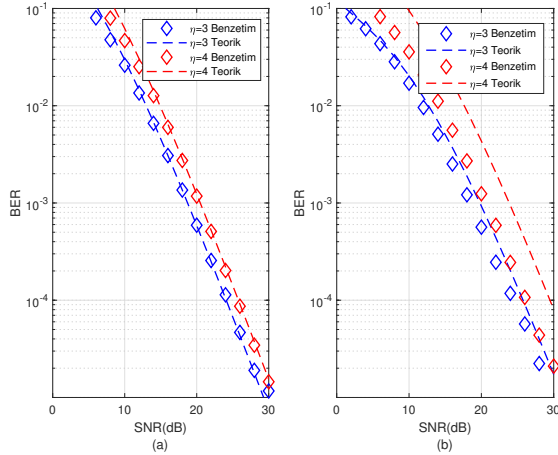
Bu bölümde MBM destekli NOMA sisteminin hata performansının analitik sonuçları ve bilgisayar benzetimleri farklı bant verimliliklerinde verilmiştir. Ayrıca aynı bant verimliliğinde geleneksel NOMA sistemi ile karşılaştırılmıştır.  $\Omega_1 = 0$  dB ve  $\Omega_2 = 10$  dB olarak alınmıştır. Her iki kullanıcının da bant verimliliği aynı alınmıştır.  $\eta = 2, 3, 4$  bit/sn/Hz için MBM destekli NOMA'da bant verimliliği sırasına göre  $M_{rf} = 1, 2, 3$  ve  $M = 2$  olarak seçilmiştir. Geleneksel NOMA sisteminde ise iki kullanıcının işaretleri de bant verimliliği sırasına göre 4-QAM, 8-QAM ve 16-QAM simgelerine eşlenmektedir. İşaret gürlüğü oranı (signal-to-noise ratio, SNR),  $P_s$ 'e eşit olarak tanımlanmıştır.

Şekil 2'de MBM destekli NOMA sistemi için  $N_r = 4$ ,  $\alpha_1 = 0.95$  ve  $\alpha_2 = 0.05$  seçilerek  $\eta = 3$  ve 4 bit/sn/Hz için hata performansı incelenmiştir. Şekil 2'den görüldüğü üzere benzetimler ile teorik sonuçlar uyumludur. Kabaca SNR 15 dB olduğunda, her iki kullanıcının BER performansının hata katına ulaştığı ve SNR'daki artışın BER performansını iyileştirmediği anlaşılmaktadır. Bu durum, yüksek SNR değerlerinde gürlüğün etkisinin azalması ve kullanıcılara SNR değerinden bağımsız sabit güç katsayıları tahsis edilmesiyle işaret girişim gürlüğü oranının (SINR) bu SNR değerlerinde sabitlenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda BER performansı gürlüğüden ziyade girişim sınırlı hale gelmektedir. Hata katını gidermek için farklı SNR değerlerinde farklı güç katsayıları tahsis edilmelidir. [10]'da birinci kullanıcı ile ikinci kullanıcının SIC'den sonraki SNR değerlerinin eşitlenerek kullanıcılar arasında eşit performans sağlanması mantığına dayalı optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Bu durumda  $\alpha_2 = (-1 + \sqrt{P_s + 1})/P_s$  ve  $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$  biçiminde belirlenecektir. Güç katsayıları [10]'da önerildiği gibi seçildiği durumda Şekil 3'te görüldüğü gibi kullanıcıların hata performansının aynı olduğu ve hata katı probleminin giderildiği görülmektedir.

Şekil 4'te ise önerilen MBM destekli NOMA ile geleneksel NOMA sistemi karşılaştırılmıştır. Her iki kullanıcı da  $N_r = 4$  alıcı antene sahiptir. Güç katsayıları  $\alpha_1 = 0.95$  ve  $\alpha_2 = 0.05$  olarak belirlenmiştir. Şekil 4(a) ve Şekil 4(b)'de sırasıyla birinci ve ikinci kullanıcı için karşılaştırmalar verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere  $\eta = 2$  bit/sn/Hz iken geleneksel NOMA, MBM destekli NOMA'ya göre iki kullanıcı için de daha iyi performans sağlamaktadır. Bununla beraber, bant verimliliğinin artmasıyla MBM destekli NOMA, geleneksel NOMA'ya göre daha iyi performans sergilemektedir. Örneğin,



Şekil 2: MBM destekli NOMA sistemi için  $\eta = 3$  ve 4 bit/sn/Hz için BER eğrileri: (a) Birinci kullanıcı (b) İkinci kullanıcı.



Şekil 3:  $\alpha_2 = (-1 + \sqrt{P_s + 1})/P_s$  ve  $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$  iken BER eğrileri: (a) Birinci kullanıcı (b) İkinci kullanıcı.

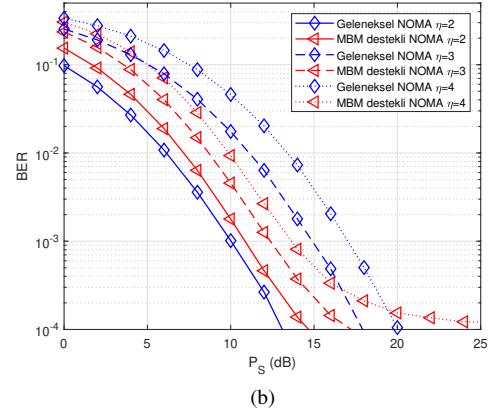
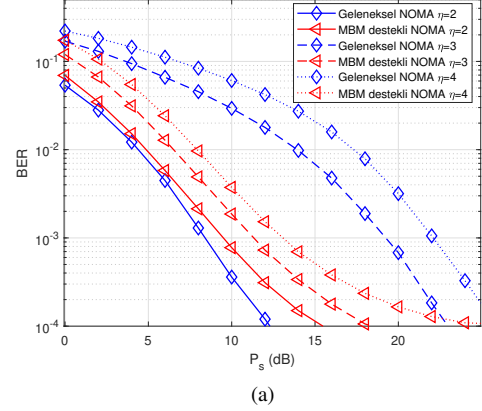
$10^{-3}$  hata oranında önerilen sistem  $\eta = 3$  bit/sn/Hz iken birinci kullanıcı için yaklaşık 7 dB ve ikinci kullanıcı için yaklaşık 2 dB SNR kazancı sağlamaktadır.

## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, MBM ve NOMA teknikleri birleştirilmiş ve elde edilen sistemin BER performansı incelenmiştir. ABEP için birleşim üst sınır ifadesi kapalı formda PEP yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik sonuçlar bilgisayar benzetimi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yüksek bant verimliliğinde MBM destekli NOMA sisteminin geleneksel NOMA sistemlerine göre daha iyi hata performansı sağladığı gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR

[1] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Li, A. Harada and T. Nakamura, "Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access," in *Proc. Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst.*, Nov. 2013, pp. 770-774



Şekil 4: Geleneksel NOMA ile MBM destekli NOMA'nın BER eğrileri: (a) Birinci kullanıcı (b) İkinci kullanıcı.

[2] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn and S. Yun, "Spatial Modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, July 2008.

[3] J. Jeganathan, A. Ghayeb, L. Szczecinski and A. Ceron, "Space shift keying modulation for MIMO channels," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3692-3703, July 2009.

[4] A. K. Khandani, "Media-based modulation: A new approach to wireless transmission," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, Istanbul, 2013, pp. 3050-3054.

[5] E. Basar, "Media-Based Modulation for Future Wireless Systems: A Tutorial," *IEEE Wireless Communications* (to appear), Mart 2019.

[6] R. L. Haupt and M. Lanagan, "Reconfigurable Antennas," *IEEE Antennas and Propag. Mag.*, vol. 55, no. 1, pp. 49-61, Feb. 2013.

[7] Z. Boudia, H. El-Sallabi, A. Ghayeb and K. A. Qaraqe, "Reconfigurable Antenna-Based Space-Shift Keying (SSK) for MIMO Rician Channels," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 446-457, Jan. 2016.

[8] E. Basar and I. Altunbas, "Space-Time Channel Modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 8, pp. 7609-7614, Aug. 2017.

[9] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.

[10] X. Zhu, Z. Wang and J. Cao, "NOMA-Based Spatial Modulation," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3790-3800, 2017.

[11] C. Zhong, X. Hu, X. Chen, D. W. K. Ng and Z. Zhang, "Spatial Modulation Assisted Multi-Antenna Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 61-67, April 2018.

[12] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*. John Wiley & Sons, 2005.