

# **GELECEK NESİL RADYO ERİŞİM AĞLARINDA DİNAMİK KAYNAK YÖNETİMİ**

## **DYNAMIC RESOURCE MANAGEMENT IN FUTURE RADIO ACCESS NETWORKS**

**ÖMER HALİLOĞLU**

**Doç. Dr. Cenk Toker**  
**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

Bu tez kapsamındaki alışmalar Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından yurt dışı doktora sırası araştırma burs programı (2214-A) ve doktora burs programı (2211-A) kapsamında, ve 112E024 numaralı EVRENA-1010 projesi ile desteklenmiştir.

## ÖZET

# GELECEK NESİL RADYO ERİŞİM AĞLARINDA DİNAMİK KAYNAK YÖNETİMİ

ÖMER HALİLOĞLU

Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk Toker

Eylül 2018, 231 sayfa

Bu tez kapsamında, aşağı yönlü, çok hücreli ve çok taşıyıcılı hücresele dağıtık anten sisteminde (distributed antenna system, DAS) radyo kaynak tahsisi problemleri ele alınmaktadır. Bu problemlerde, 5G ve ötesinde kullanılması öngörülen, çok taşıyıcılı dikgen olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access, NOMA), çoklu bağlantı (multi-connectivity, MC) ve koordine edilmiş çok noktalı (coordinated multi-point, CoMP) iletim gibi ağ fonksiyonlarının başarımları incelenmektedir. 5G ve ötesinde, farklı radyo erişim ağı (radio access network, RAN) mimarileri kullanılması öngörülmekte ve ağ dilimlendirme konsepti altında, kullanım amacına göre bazı ağ fonksiyonları merkezi bazıları ise dağıtık olarak kullanılabilir. RRM (radio resource management, radyo kaynak yönetimi), NOMA, MC ve CoMP gibi ağ fonksiyonları hem merkezi hem de dağıtık olarak kullanılabilir. Bu bağlamda, bazı ağ fonksiyonlarının (örn., RRM) merkezi olarak, bazılarının (örn., CoMP) ise dağıtık olarak kullanıldığı DD-RAN (dinamik dağıtık RAN) mimarisinde cRRM (merkezi RRM) başarımları incelenmektedir. Daha sonra dağıtık RAN (D-RAN) mimarisinde, hücrelerarası koordinasyonun azaldığı ve her hücrede RRM'in dağıtık (dRRM) ve merkezi olmayan (decRRM) bir şekilde yapıldığı durumlarda başarımlar irdelenmektedir. Bununla birlikte, bulut RAN (C-RAN) mimarisi ile ağ fonksiyonlarının merkezi olarak kullanıldığı, merkezi sinyal işleme sayesinde kazanılan çeşitleme kazancı ve enbüyük koordinasyon seviyesi ile elde edilen başarımlar incelenmektedir.

Bütün bu mimari yapılarda ve farklı koordinasyon seviyelerinde, JT-CoMP-NOMA'nın

(ortak iletim CoMP ve NOMA) başarımları, MC'nin aktif olduğu ve olmadığı durumlarda incelenerek dikgen çoklu erişim (OMA) kullanıldığı durumlarla karşılaştırılmaktadır. NOMA ve MC'nin beraber kullanımının sistem başarımını en çok artırdığı gözlemlenmiş, ancak kullanıcının kodçözümünde artırdığı karmaşık sebebiyle NOMA'nın kullanılmasının yerine MC kullanımının avantaj ve dezavantajları değerlendirilmektedir.

Her hücrede coğrafi olarak dağıtılmış uzak radyo başlıkları (remote radio head, RRH) ve rasgele olarak yerleştirilmiş düşük güç tüketimli erişim noktaları mevcuttur. Basitten karmaşığa doğru çeşitli senaryolarda ve uygun kısıtlar altında (örn., enküçük veri hızı, azami güç, adalet), çeşitli maliyet işlevleri için ortak güç kontrolü ve kaynak tahsisi problemleri eniyilenmekte, hangi erişim noktasının hangi kullanıcıya hangi kaynak bloğu (resource block, RB) içinde ne kadar güçle iletim yapacağı belirlenmektedir. Eniyileme sonucunda elde edilen enerji verimliliği (EE), izgesel verimlilik ve izgesel enerji verimliliği başarımları ve kullanılan iletim güçleri irdelenmektedir. Problemlerinin çözümünde dışbükey eniyileme (convex optimization) kullanılmaktadır. Problemler dışbükey biçiminde olmadığı için elde edilen sonuçlar eniyiye yakın olabilmektedirler.

Enbüyük sistem başarımı, en yüksek serbestlik derecesine sahip olan C-RAN mimarisinde cRRM uygulandığı durumda elde edilmekte, daha sonra DD-RAN mimarisi gelmektedir. Önerilen dRRM algoritması ile yeteri kadar iyi başarımlar alınamamakta ve decRRM ile benzer sonuçlar elde edilmektedir. Burada, BS'ler (base station, baz istasyon) arasındaki bilgi paylaşımı ve koordinasyonun, cRRM'in başarımı için önemi gösterilmektedir.

Literatürden farklı olarak JT-NOMA-CoMP ağlarında DAS yapısı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kullanıcı eşlemesi yapılmadan, farklı kullanıcılar bütün RB'leri aynı anda kullanabilmektedirler. Veri hızı ve AP iletim gücü kısıtlarının yanında kullanıcılar arası adalet kısıtı eklenmekte, karmaşık sinyal ve ağ modeli (ağır girişim altında) ile eniyileme problemi çözülmektedir. Ayrıca toplam veri hızının enbüyütülmesi ile toplam iletim gücünün enküçültülmesi arasında bir ödünleşim oluşturularak, sistemin çalışma bölgeleri incelenmektedir. JT-NOMA-CoMP ağları çeşitli mimari yapılar ve RRM koordinasyon seviyelerinde MC ile birlikte incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** 5G, NOMA, CoMP, Çoklu-Bağlantı, DAS, dağıtık anten sistemi, HetNets, güç kontrolü, kaynak tahsisi, enerji verimliliği, enerji izgesel verimlilik, CRAN, Bulut RAN, DRAN, Dağıtık RAN, cRRM, merkezi RRM, dRRM, dağıtık RRM, dışbükey eniyileme.

# **ABSTRACT**

## **DYNAMIC RESOURCE MANAGEMENT IN FUTURE RADIO ACCESS NETWORKS**

**ÖMER HALILOĞLU**

**Doctor of Philosophy, Department of  
Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cenk Toker**

**September 2018, 231 pages**

In this thesis, radio resource allocation in a downlink multi-cell and multi-carrier distributed antenna system (DAS) are discussed. In these problems, performances of non-orthogonal multiple access (NOMA), multi-connectivity (MC) and joint transmission (JT) mode of coordinated multipoint (CoMP) are investigated. It is envisioned to use different radio access network (RAN) architectures for 5G and beyond. As network slicing impinges, some of the network functions will be centralized and some will be used in a distributed manner. Network functions such as RRM, NOMA, MC and CoMP can be either centralized or distributed. In this context, cRRM (centralized RRM) is examined in DD-RAN (dynamic distributed RAN) architecture in which some network functions (e.g., RRM) are centralized and some (e.g., CoMP) are distributed. Then, in the distributed RAN (D-RAN) architecture, the coordination among base stations (BS) is reduced and the performance is investigated in the case where RRM is performed in distributed (dRRM) and decentralized (decRRM) manner in each cell. However, the performance achieved through the utilization of cloud RAN (C-RAN) architecture as network functions are centralized, the diversity gain through centralized processing and the highest level of coordination is examined.

With all these architectural structures and at different levels of coordination among cells, the performance of JT-CoMP-NOMA is compared with scenarios where orthogonal multiple access (OMA) is employed for both situations whether MC is active or not. The combination of NOMA and MC has been observed to maximize system

performance, but the pros-and-cons of using MC instead of using NOMA are assessed because of the increase in decoding complexity due to the utilization of NOMA. In each cell there are geographically distributed remote radio heads (RRH) and randomly deployed low-power nodes. Joint power control and resource allocation problems are being optimized in various scenarios from simple to complex, for various cost functions and under appropriate constraints (e.g., minimum data rate, maximum power limit, fairness), resulting in how much transmit power should be used by access points for each user in each cell and resource block (RB). Energy efficiency (EE), spectral efficiency and spectral energy efficiency performances and transmission power are examined as a result of the optimization. Convex optimization is used to solve these non-convex problems, thus, the results obtained can be suboptimal. Maximum system performance is obtained when cRRM is applied in C-RAN architecture having the highest degrees of freedom, followed by DD-RAN architecture. With the proposed dRRM algorithm, it is not achieved good performance as well as the similar results with decRRM. Here, it can be deduced that information sharing and coordination between BSs are important for the performance increase. In addition to the literature, DAS is employed with JT-NOMA-CoMP studies. Furthermore, users are allowed to utilize all RBs, simultaneously, without matching users. Moreover, fairness constraint is added into optimization problem involving complex signal and network model. Additionally, a trade-off between maximizing sum-rate and minimizing output power offering different EE operation regions is investigated. More than that, JT-NOMA-CoMP is studied with different RAN architectures and coordination levels including MC framework.

**Keywords:** 5G, NOMA, CoMP, Multi-Connectivity, DAS, distributed antenna system, HetNets, power control, resource allocation, energy efficiency, energy spectral efficiency, CRAN, Cloud RAN, DRAN, Distributed RAN, cRRM, centralied RRM, dRRM, distributed RRM, convex optimization.

## TEŞEKKÜR

Akademik hayatım boyunca daha iyi bir araştırmacı olabilmem için bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, en sıkıntılı zamanlarımda, motivasyonumu kaybetmemi sağlayan tez danışmanım Doç. Dr. Cenk Toker'e ne kadar teşekkür etsem azdır. Kendisinden öğrendiklerim, araştırma ve geliştirme karakterimin oluşmasında doğrudan bir etkiye sahiptir. Kendisiyle çalıştığım yıllar için kendimi oldukça şanslı hissediyorum.

Bu kariyeri düşünmem konusunda beni bilgilendirdiği için Prof. Dr. Adnan Köksal'a, bu süreçte yorulduğum her an yanımda olan ve farkında olmasalar da bana rol model olan Prof. Dr. Feza Arıkan ve Prof. Dr. Atila Yılmaz'a, sonradan tanıma fırsatı bulduğum ve bu dönemde hiç esirgemediği arkadaşlığı ve desteği ile Dr. Dinçer Gökçen'e, ve bölümümüzün bütün öğretim üyelerine bu süre boyunca bana olan katkıları ve destekleri için teşekkür ederim. Tezimin hazırlanış süresi boyunca yakınlıkları ve yardımları ile desteklerini hiç esirgemeyen başta Dr. Barış Yüksekaya ve Mehmet Hakan Akşit olmak üzere bütün çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Annem, babam ve kardeşimin, benim için yaptığı her şey için ne kadar minnettar olduğumu kelimelerle anlatmak çok zor. Ne olursa olsun sizi koşulsuz destekleyen, her zaman güvenebileceğiniz, mutlu olmanız için her şeyi yapan bir aileye, onlara sahip olduğum için oldukça şanslı olduğumu itiraf etmeliyim. Beni ben yapan her şeyde onların izi vardır. Eğer bugüne kadar bir şeyler başarabildiysem, bunun mimarı ailemdir. Onlar olmadan, bu seviyeye gelemezdim. Bana karşı hiçbir zaman kaybetmedikleri inançları benim temel kazancımdır. Onların güvenlerini devam ettirmek de en büyük başarımları olacaktır. Hayallerimin peşinden koşmamı, büyük hedefler kurmamı, ama zor durumda olanı asla unutmamamı öğrettiğiniz için; hiçbir zaman vazgeçmemem gerektiğini ihtiyacım olduğu her an hatırlattığınız için, hatalarımdan, başarısızlıklarımıdan ders almamda ve sürekli üretme amacı güden bir insan olmamda bana kattıklarınız için, ayrı şehirlerde olmamıza rağmen hiçbir zaman eksikliğinizi hissettirmedığınız için, bugüne kadar benim için yaptığınız her şey için, yakınlığınız, sevginiz, ilginiz ve desteğiniz için sizlere minnettarım. Ayrıca üniversite tercihleri sırasında doktor olmamı çok isteyen annemin isteğini, farklı bir yol izleyerek ve gecikmeli de olsa yerine getirmiş olmanın mutluluğu içindeyim.



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER .....	x
ÇİZELGELER .....	xxxviii
SİMGELER VE TANIMLAR .....	xxxix
KISALTMALAR .....	xlii
TÜRKÇE-İNGİLİZCE SÖZLÜK .....	xlv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. 5G YENİ RADYO .....	2
1.1.1. 5G Gereksinimleri ve Yetenekleri .....	2
1.1.2. 5G Radyo Erişimi .....	5
1.1.3. 5G Sistem Mimarisi .....	5
1.1.3.1. Fonksiyonel Tasarım Görüşleri .....	6
1.1.3.2. Fiziksel Mimari .....	9
1.1.4. 5G Radyo Kaynak Yönetimi Çerçevesi .....	14
1.1.4.1. Radyo Kaynak Yönetimi ve Girişim Yönetimi Koordinasyon Dereceleri .....	15
1.1.5. Kullanılan 5G Etkinleştirici Teknolojiler ve Ağ Fonksiyonları .....	16
1.1.5.1. Koordine Edilmiş Çok Noktalı Haberleşme (CoMP) .....	16
1.1.5.2. Çoklu Bağlantı .....	19
1.1.5.3. Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA) .....	19
1.1.6. Yeşil Radyo .....	23
1.1.6.1. BS Güç Tüketimi .....	25
1.2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR .....	26
1.2.1. Klasik Sistemlerde NOMA .....	29
1.2.2. Aşağı Yönlü CoMP Sistemlerinde NOMA .....	31

1.2.2.1. CoMP-NOMA Sistemlerinde Enerji Verimliliği .....	33
1.3. TEZİN KATTIĞI DEĞERLER VE YENİLİKLER .....	34
1.4. TEZ KAPSAMI ve ORGANİZASYONU .....	35
1.4.1. Ağ Modeli .....	40
<b>2. DİNAMİK DAĞITIK RAN (DD-RAN) MİMARİSİ .....</b>	<b>42</b>
2.1. SİSTEM MODELİ .....	43
2.2. BENZETİM MODELİ .....	47
2.3. ENİYİLEME PROBLEMLERİ ve BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ .....	49
2.3.1. Homojen Ağlar .....	49
2.3.1.1. Tek Taşıyıcılı ve Hücre Başına Tek Kullanıcılı Senaryo .....	49
2.3.1.2. Tek Taşıyıcılı ve Hücre Başına Çok Kullanıcılı Senaryo .....	65
2.3.1.3. Çok Taşıyıcılı ve Hücre Başına Çok Kullanıcılı Senaryo .....	77
2.3.2. Heterojen Ağlar .....	91
2.3.2.1. Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi .....	91
2.4. SONUÇLAR .....	113
<b>3. DAĞITIK RAN (D-RAN) MİMARİSİ .....</b>	<b>119</b>
3.1. SİSTEM MODELİ .....	119
3.2. BENZETİM MODELİ .....	125
3.3. ENİYİLEME PROBLEMİ ve BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ .....	126
3.3.1. Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi .....	127
3.3.1.1. Merkezi olmayan RRM .....	127
3.3.1.2. Dağıtık RRM .....	128
3.4. SONUÇLAR .....	173
<b>4. BULUT RAN (C-RAN) MİMARİSİ .....</b>	<b>176</b>
4.1. SİSTEM MODELİ .....	176
4.2. BENZETİM MODELİ .....	181
4.3. ENİYİLEME PROBLEMİ ve BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ .....	182
4.3.1. Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi .....	182
4.4. SONUÇLAR .....	197

<b>5. RAN MİMARİLERİ VE RRM KOORDİNASYON SEVİYELERİNİN BAŞARIM KARŞILAŞTIRMALARI</b> .....	199
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLEN ÇALIŞMALAR</b> .....	212
6.1. SONUÇLAR .....	212
6.2. ÖNERİLEN EK ÇALIŞMALAR .....	222
KAYNAKLAR .....	224
ÖZGEÇMİŞ .....	232

## ŞEKİLLER

### Sayfa

Şekil 1.1. Koordine Edilmiş Çok Noktalı İletişim (CoMP) Yöntemleri: (a) Koordine edilmiş hüzmeye oluşturma (CB-CoMP), (b) Dinamik erişim noktası seçimi (DPS-CoMP), (c) Eş zamanlı iletim (JT-CoMP).	18
Şekil 1.2. İki kullanıcılu sistem için NOMA ve OMA başarımlarını karşılaştırması [1]	22
Şekil 1.3. (a) Dikgen Çoklu Erişim (OMA), (b) Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA) .....	23
Şekil 1.4. DD-RAN mimarisinde, Uzak Radyo Başlıklarından Oluşan Dağıtık Anten Sistemi .....	37
Şekil 1.5. D-RAN mimarisinde, Uzak Radyo Başlıklarından Oluşan Dağıtık Anten Sistemi .....	39
Şekil 1.6. C-RAN mimarisinde, Uzak Radyo Başlıklarından Oluşan Dağıtık Anten Sistemi .....	40
Şekil 2.1. $M = 2$ hücreli, hücre başına $K = 1$ kullanıcı ve $N = 1$ taşıyıcı sistemde, sadece azami güç kısıtı ile, topaktaki en küçük veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen sistem başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Sistem genelindeki en küçük veri hızının $P_{max}$ ile değişimi. (b) Sistem genelindeki toplam veri hızının $P_{max}$ ile değişimi. (c) Sistem genelinde harcanan toplam iletim gücünün ( $P_{out}$ ) $P_{max}$ ile değişimi. ....	51
Şekil 2.2. $M = 2$ hücreli, hücre başına $K = 1$ kullanıcı ve $N = 1$ taşıyıcı sistemde, azami güç ve farklı en küçük veri hızı ( $r_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen toplam veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için toplam veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. ....	54

- Şekil 2.3.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve farklı enküçük veri hızı ( $r_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen topaktaki enküçük veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için enküçük veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. . . . . . 55
- Şekil 2.4.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve farklı enküçük veri hızı ( $r_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen harcanan iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için harcanan iletim gücü başarımı. (b) BPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. (c) CPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. . . . . 56
- Şekil 2.5.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen toplam veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için toplam veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. . . . . . 58
- Şekil 2.6.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen topaktaki enküçük veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için enküçük veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. . . . . . 59

- Şekil 2.7.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen harcanan iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için harcanan iletim gücü başarımı. (b) BPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. (c) CPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. . . . . . 60
- Şekil 2.8.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen toplam veri hızı başarımının farklı azami iletim gücü ( $P_{max}$ ) değerleri için, Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için toplam veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. . . . . . 62
- Şekil 2.9.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen topaktaki enküçük veri hızı başarımının farklı azami iletim gücü ( $P_{max}$ ) değerleri için, Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için enküçük veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. . . . . . 63
- Şekil 2.10.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen harcanan iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımının farklı azami iletim gücü ( $P_{max}$ ) değerleri için, Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için harcanan iletim gücü başarımı. (b) BPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. (c) CPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. . . . . . 64

- Şekil 2.11.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç kısıtı ile, topaktaki enküçük veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen farklı  $P_{max}$  değerleri için sistem başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Topaktaki enküçük veri hızı başarımı. (b) Topaktaki toplam veri hızı başarımı. (c) Topakta harcanan toplam iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımı. . . . . . 67
- Şekil 2.12.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle farklı  $P_{max}$  değerleri için elde edilen sistem başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı. . . . . . 70
- Şekil 2.13.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve enküçük veri hızı ( $r_0$  Mbps) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle  $P_{max} = 43$  dBm için elde edilen sistem başarımının farklı hücre başına kullanıcı sayıları ( $K$ ) için enküçük veri hızı kısıtına ( $r_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı. . . . . . 71
- Şekil 2.14.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen sistem başarımının farklı  $P_{max}$  değerleri için hücre başına kullanıcı sayısı ( $K$ ) ile değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı. . . . . . 75
- Şekil 2.15.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle  $P_{max} = 43$  dBm için elde edilen sistem başarımının farklı hücre başına kullanıcı sayıları ( $K$ ) için Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı. . . . . . 76

Şekil 2.16.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 5$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı  $P_{max}$  değerleri için elde edilen enküçük veri hızı başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ . . . . . 81

Şekil 2.17.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 5$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı  $P_{max}$  değerleri için elde edilen toplam veri hızı başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ . . . . . 82

Şekil 2.18.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile,  $P_{max} = 43$  dBm için topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enküçük veri hızı başarımının RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ . . . . . 83

Şekil 2.19.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile,  $P_{max} = 43$  dBm için topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen toplam veri hızı başarımının RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ . . . . . 84

Şekil 2.20.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı ( $N$ ) sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$  dBm) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enerji verimliliğinin  $P_{max}$  ile değişimi incelenmektedir: (a)  $N = 1$ , (b)  $N = 2$ , (c)  $N = 3$ , (d)  $N = 4$ , (e)  $N = 5$ . . . . . 86



Şekil 2.21.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli  $P_{\max}$  değerleri için topaktaki enerji verimliliği enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enerji verimliliğinin RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $P_{\max} = 43$  dBm, (b)  $P_{\max} = 37$  dBm, (c)  $P_{\max} = 31$  dBm, (d)  $NP_{\max} = 25$  dBm, (e)  $P_{\max} = 19$  dBm. .... 87

Şekil 2.22.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli  $P_{\max}$  değerleri için topaktaki klasik EE (Eşitlik (2.18))'de tanımlanan  $\mu_{EE}$  ve ödünleşimli EE (Eşitlik (2.45))'te tanımlanan  $\mu_c$  enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enerji verimliliğinin ödünleşim parametresine ( $c$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) NOMA, (b) OMA. .... 89

Şekil 2.23.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli  $P_{\max}$  değerleri için topaktaki toplam veri hızı (Eşitlik (2.12))'de tanımlanan  $R$  ve ödünleşimli EE (Eşitlik (2.45))'te tanımlanan  $\mu_c$  enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen sistem başarımının ödünleşim parametresine ( $c$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) NOMA, (b) OMA. .... 90

Şekil 2.24.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,\max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,\max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,\max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,\max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,\max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,\max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,\max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,\max} = 21$  dBm. .... 94

Şekil 2.25.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA kullanılmaktadır; ancak MC fonksiyonu aktif değildir: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm. . . . . 95

Şekil 2.26.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA kullanılmamaktadır; ancak MC fonksiyonu aktiftir: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm. . . . . 96

Şekil 2.27.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA ve MC fonksiyonları kullanılmamaktadır: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm. . . . . 97

Şekil 2.28.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, farklı RRH ve LPN güç sınırları ( $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$ ) için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda, enerji verimliliğinin ( $\mu_{EE}$ ) hücre başına LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (c)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm, (d)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm. .... 100

Şekil 2.29.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, farklı RRH ve LPN güç sınırları ( $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$ ) için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda, topakta tüketilen toplam RRH iletim gücünün ( $P_{r,out}$ ) hücre başına LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (c)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm, (d)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm. 101

Şekil 2.30.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, farklı RRH ve LPN güç sınırları ( $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$ ) için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda, topakta tüketilen toplam LPN iletim gücünün ( $P_{f,out}$ ) hücre başına LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (c)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm, (d)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm. .... 102

Şekil 2.31.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda enküçük veri hızına ( $r_{min}$ ) sahip kullanıcının servis kesintisine uğramama olasılığının,  $\Pr(r(\alpha) \geq r_{min})$ , LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . 104

Şekil 2.32.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Enküçük veri hızına ( $r_{min}$ ) sahip kullanıcının servis kesintisine uğramama olasılığının,  $\Pr(r(\alpha) \geq r_{min})$ , NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda çeşitli LPN sayıları için incelenmektedir. (a)  $L_f = 0$ , (b)  $L_f = 1$ , (c)  $L_f = 2$ , (d)  $L_f = 3$ . . . . . 105

Şekil 2.33.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . . 107

Şekil 2.34.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . . 108

Şekil 2.35.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA'nın kullanıldığı, MC fonksiyonunun aktif olup olmadığı iki ayrı durum için izgesel verimliliğin, her hücrede RB başına düşen kullanıcı sayısına ( $K/N$ ) göre değişimi incelenmektedir. . . . . . 109

Şekil 2.36.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . . . 110

Şekil 2.37.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . . . 111

Şekil 2.38.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 112

Şekil 3.1.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), hücre başına LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . .... 132

Şekil 3.2.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, hücre başına LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . .... 133

Şekil 3.3.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, hücre başına LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . .... 134

Şekil 3.4.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcıli sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 137

Şekil 3.5.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcıli sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 138

Şekil 3.6.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcıli sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 139

- Şekil 3.7.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 140
- Şekil 3.8.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 141
- Şekil 3.9.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f = 1$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda topaktaki enerji verimliliğinin (EE), maruz kalındığı varsayılan hücrelerarası girişim değerine ( $I_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . .... 143



Şekil 3.10.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f = 1$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, maruz kalındığı varsayılan hücrelerarası girişim değerine ( $I_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . . . . . 144

Şekil 3.11.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f = 1$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, maruz kalındığı varsayılan hücrelerarası girişim değerine ( $I_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . . . . . 145

Şekil 3.12.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . . 148

Şekil 3.13.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 149

Şekil 3.14.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 150

Şekil 3.15.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 151

Şekil 3.16.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 152

Şekil 3.17.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 153

Şekil 3.18.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 154

Şekil 3.19.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 155

Şekil 3.20.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 156

Şekil 3.21.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 157

Şekil 3.22.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 158

Şekil 3.23.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 159

Şekil 3.24.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 160

Şekil 3.25.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 161

Şekil 3.26.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 162

Şekil 3.27.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 163

Şekil 3.28.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 164

Şekil 3.29.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 165

Şekil 3.30.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 166

Şekil 3.31.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 167

Şekil 3.32.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 168

Şekil 3.33.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 169



Şekil 3.34.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 170

Şekil 3.35.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 171

Şekil 3.36.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 172

- Şekil 4.1. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda enerji verimliliğinin (EE) LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . ..... 186
- Şekil 4.2. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda kullanılan RRH iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . ..... 187
- Şekil 4.3. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda kullanılan LPN iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ . ..... 188

Şekil 4.4. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 191

Şekil 4.5. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 192

Şekil 4.6. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. .... 193

Şekil 4.7. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA'nın kullanıldığı, MC fonksiyonunun aktif olup olmadığı iki ayrı durum için izgesel verimliliğin (SE) ve enerji izgesel verimliliğin (ESE), her hücrede RB başına düşen kullanıcı sayısına ( $K/N$ ) göre değişimi incelenmektedir. . . . 194

Şekil 4.8. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . . 195

Şekil 4.9. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . . 196

Şekil 5.1.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı,  $N = 3$  RB ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı farklı durumlarda enerji verimliliğinin (EE) LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 201

Şekil 5.2.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı,  $N = 3$  RB ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı farklı durumlarda kullanılan RRH iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 202

Şekil 5.3.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı,  $N = 3$  RB ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı farklı durumlarda kullanılan LPN iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 203

Şekil 5.4.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 205

Şekil 5.5.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 206

Şekil 5.6.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 207

Şekil 5.7.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 208

Şekil 5.8.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA. . . . 209

Şekil 5.9.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE) ve enerji izgesel verimliliğinin (ESE), her hücrede RB başına düşen kullanıcı sayısına ( $K/N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) İzgesel Verimliliği (SE), (b) Enerji İzgesel Verimlilik (ESE). . . . . 211

## ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Ağ Fonksiyonları .....	8
Çizelge 1.2. Farklı BS çeşitleri için güç modeli parametreleri .....	26
Çizelge 2.1. Benzetim Modeli Özellikleri .....	48
Çizelge 3.1. Benzetim Modeli Özellikleri .....	126
Çizelge 4.1. Benzetim Modeli Özellikleri .....	181



## SİMGELER VE TANIMLAR

Tez boyunca, sayıl değişkenler normal küçük harflerle, sütun vektörleri ve matrisler ise sırasıyla küçük ve büyük olmak üzere kalın harflerle gösterilmiştir.

### Simgeler

$(\cdot)^*$	Karmaşık eşlenik operatörü
$(\cdot)^T$	Devriklik operatörü
$(\cdot)^H$	Hermit devriklik operatörü
$\mathbb{R}$	Gerçek sayılar kümesi
$\mathbb{R}_+$	Pozitif gerçek sayılar kümesi
$\mathbb{N}_+$	Pozitif doğal sayılar kümesi
$\mathbb{R}^N$	$N \times 1$ boyutunda gerçek sayılar kümesi
$\mathbb{C}$	Karmaşık sayılar kümesi
$\in$	Elemanıdır operatörü
$\Re(\cdot)$	Karmaşık bir argümanın gerçek bileşeni
$E\{\cdot\}$	Beklenen değer operatörü
$\mathcal{N}(\cdot)$	Gerçek ve karmaşık Gauss dağılımları
$\mathcal{CN}(\cdot)$	Karmaşık Gauss dağılımları
$\mathbf{I}_N$	$N \times N$ boyutunda birim matris
$\mathbf{0}_N$	$N \times N$ boyutunda sıfır matrisi
$\mathbf{1}_N$	$N \times 1$ boyutunda elemanları 1 olan sütun vektörü
$[\mathbf{z}]_q$	Herhangi bir $\mathbf{z}$ vektörünün $q$ 'uncu girdisi
$\mathbf{S}_N^j$	$N \times N$ boyutunda, $(j, j)$ 'inci girdisinin 1, diğerlerinin 0 olduğu tek girdi matrisi
$\delta_{mn}$	Delta fonksiyonu
$\circ$	Hadamard çarpımı
$\oplus$	Doğrudan toplam operatörü
$\otimes$	Kronecker çarpım operatörü
$\ominus$	Yatay birleştirme operatörü
$\cup$	Küme birleşim operatörü

Delta fonksiyonu

$$\delta_{(m-n)(k-j)} = \begin{cases} 1, & m = n \text{ ve } k = j \text{ iken} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (1)$$

ve

$$\delta_{j>k} = \begin{cases} 1, & j > k \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (2)$$

olarak tanımlanır.

Hadamard çarpımı aynı boyutlardaki  $\mathbf{A}$  ve  $\mathbf{B}$  matrisleri için,  $[\mathbf{A} \circ \mathbf{B}]_{ij} = A_{ij}B_{ij}$  olarak tanımlanmıştır.

$\oplus$ ,  $\otimes$ , ve  $\ominus$  operatörleri sırasıyla doğrudan toplam, Kronecker çarpımı ve yatay birleştirme işlemlerini yapmaktadırlar [2].  $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times N}$  ve  $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{P \times Q}$  matrisleri için,

$\oplus$  operatörü,

$$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{(M+P) \times (N+Q)} \quad (3)$$

matrisini oluşturacak şekilde  $\mathbf{A}$  ve  $\mathbf{B}$  matrislerini köşegenlerde birleştirir, ve

$$\bigoplus_{i=1}^N \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & & & \mathbf{0} \\ & \mathbf{A}_2 & & \\ & & \dots & \\ \mathbf{0} & & & \mathbf{A}_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

olarak genelleştirilebilir.

$\otimes$  Kronecker çarpımı ile  $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} \in \mathbb{C}^{MP \times NQ}$  blok matrisi elde edilir, öyle ki  $ij$ 'inci bloğu  $a_{ij}B$  matrisidir, burada,

$$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_{11}B & a_{12}B \\ a_{21}B & a_{22}B \end{bmatrix} \quad (5)$$

olarak tanımlıdır.

$\ominus$  operatörü, eşit satır sayılarına sahip matrisleri yatay ekseninde birleştirir, örneğin,  $M = P$  için  $\mathbf{A} \ominus \mathbf{B} = [\mathbf{A} \ \mathbf{B}] \in \mathbb{C}^{M \times (N+Q)}$  sonucunu vermektedir ve  $\bigoplus_{i=1}^N \mathbf{A}_i = [\mathbf{A}_1 \ \cdots \ \mathbf{A}_N]$  şeklinde genelleştirilebilir.

## Tanımlar

### Jain Adaletliliği İndeksi:

$\mathbf{x} \in \mathbb{R}_+^N$  vektörü için, Jain adaletliliği indeksi  $J : \mathbb{R}_+^N \rightarrow \mathbb{R}_+$  ilk olarak [3]'te

$$J(\mathbf{x}) = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (6)$$

formülü ile tanımlanmıştır. İndeksin boyutsuzluk, ölçeklendirmeden bağımsız olma ve süreklilik özellikleri doğrulanabilir.  $0 \leq J(\mathbf{x}) \leq 1$  arasında sınırlı olması ile adalet cinsinden ayrıştırmayı kolayca görülebilir. Burada  $J = 0$  en az adil durumu,  $J = 1$  ise en adil durumu göstermektedir.

## KISALTMALAR

5GPPP	: 5G Altyapı Kamu Özel Ortaklığı : (5G Infrastructure Public Private Partnership)
AAA	: Denetleme, Yetkilendirme, Ücretlendirme (Authentication, Authorization, Accounting)
AP	: Erişim Noktası (Access Point )
BBU	: Temelbant Birimi (Baseband Unit)
BPM	: İkili Güç İdaresi (Binary Power Management)
BS	: Baz İstasyon (Base Station)
cRRM	: Merkezi Radyo Kaynak İdaresi : (Central Radio Resource Management)
CA	: Taşıyıcı Yığılı (Carrier Aggregation)
CAPEX	: Sermaye Masrafı (Capital Expenditure )
CN	: Çekirdek Ağ (Core Network)
CoMP	: Koordineli Çok Noktalı İletim (Coordinated Multipoint Transmission)
CP	: Kontrol Düzlemi (Control Plane)
CPM	: Sürekli Güç Yönetimi (Continuous Power Management)
CS/CB	: Koordine edilmiş planlama/hüzme-oluşturma (Coordinated Scheduling/Beamforming)
CU	: Merkezi Birim (Central Unit)
dRRM	: Dağıtık Radyo Kaynak İdaresi : (Distributed Radio Resource Management)
decRRM	: Merkezi Olmayan Radyo Kaynak İdaresi (Decentralized Radio Resource Management)
D2D	: Cihazdan Cihaza (Device-to-Device)
DCS	: Dinamik Hücre Seçimi (Dynamic Cell Selection)
DPS	: Dinamik Erişim Noktası Seçimi (Dynamic Point Selection)
DU	: Dağıtık Birim (Distributed Unit)
EE	: Enerji Verimliliği (Energy Efficiency)
eICIC	: Gelişmiş Hücreler Arası Girişim Giderimi (Enhanced Inter-cell Interference Cancellation)

eMBB	: Gelişmiş Mobil Genişbant (Enhanced Mobile Broadband)
ESE	: Enerji İzgesel Verimlilik (Energy Spectral Efficiency)
HetNets	: Heterojen Ağlar (Heterogenous Networks)
ICI	: Hücrelerarası Girişim (Inter-cell Interference)
IM	: Girişim İdaresi (Interference Management)
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet-of-Things)
JP	: Ortak İşleme (Joint Processing)
JT	: Ortak İletim (Joint Transmission)
KPI	: Anahtar Başarım İndeksi (Key Performance Index)
LPN	: Düşük Güç Tüketimli Düğüm (Low Power Node)
MAC	: Ortama Erişim Kontrol (Medium Access Control)
mMTC	: Yoğun Makinalar Cinsi Haberleşme (Massive Machine-Type Communication)
MC	: Çoklu Bağlantı (Multi-connectivity)
MIMO	: Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multiple Input Multiple Output)
NOMA	: Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-orthogonal Multiple Access)
OMA	: Dikgen Çoklu Erişim (Orthogonal Multiple Access)
OPEX	: İşletme Giderleri (Operating Expenses)
QoE	: Deneyim Kalitesi (Quality of Experience)
QoS	: Servis Kalitesi (Quality of Service)
PDCP	: Paket Veri Yakınsama Protokolü (Packet Data Convergence Protocol)
PHY	: Fiziksel (Physical)
RAN	: Radyo Erişim Ağı (Radio Access Network)
RAT	: Radyo Erişim Teknolojisi (Radio Access Technology)
Rel	: Sürüm (Release)
RM	: Kaynak Yönetimi (Resource Management)
RLC	: Radyo Bağlantı Kontrol (Radio Link Control)
RRC	: Uzak Radyo Kontrolörü (Remote Radio Controller)
RRH	: Uzak Radyo Başlığı (Remote Radio Head)
RRM	: Radyo Kaynak İdaresi (Radio Resource Management)
RRU	: Uzak Radyo Birimi (Remote Radio Unit)

- SE : İzgesel Verimlilik (Spectral Efficiency)
- SIC : Sıralı Girişim Giderimi (Successive Interference Cancellation)
- SINR : Sinyal Girişim Gürültü Oranı (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)
- SISO : Tek Girişli Tek Çıkışlı (Single Input Single Output)
- SNR : Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)
- TRX : Verici-Alıcı (Transceiver)
- UE : Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment )
- UP : Kullanıcı Düzlemi (User Plane)
- uRLLC : Ultra-Güvenli ve Düşük Gecikmeli Haberleşme  
(Ultra-Reliable and Low-Latency Communication)
- VNF : Sanal Ağ Fonksiyonları (Virtual Network Functions)

## TÜRKÇE-İNGİLİZCE SÖZLÜK

Anahtar Başarım İndeksi	: Key Performance Index
Art Taşıyıcı Ağ	: Backhaul
Bağlanırlık	: Connectivity
Beklenti	: Expectation
Birbiçimli	: Uniform
Çapraz Taşıyıcı	: Cross Carrier
Çekirdek Ağ	: Core Network
Çevrimsel Eklenir Beyaz Gauss Gürültü	: Circularly Additive White Gaussian Noise
Cihazdan Cihaza	: Device-to-Device
Çok Girişli Çok Çıkışlı	: Multiple Input Multiple Output
Çoklu Bağlantı	: Multi-connectivity
Dağıtık Birim	: Distributed Unit
Denetleme	: Authentication
Deneyim Kalitesi	: Quality of Experience
Dışbükey Eniyileme	: Convex Optimization
Dikgen Çoklu Erişim	: Orthogonal Multiple Access
Dikgen Olmayan Çoklu Erişim	: Non-orthogonal Multiple Access
Dinamik Erişim Noktası Seçimi	: Dynamic Point Selection
Dinamik Hücre Seçimi	: Dynamic Cell Selection
Doğrudan Toplam	: Direct Sum
Düşük Güç Tüketimli Düğüm	: Low Power Node
Eniyileme	: Optimization
Erişim Noktası	: Access Point
Gelişmiş Mobil GenişBant	: Enhanced Mobile BroadBand
Girişim Yönetimi	: Interference Management
Haberleşme	: Communication
Hareketlilik	: Mobility
Havuzlama Kazancı	: Pooling Gain

Hücrelerarası Girişim	: Inter-cell Interference
İç nokta Yöntemi	: Interior Point Method
İkili Güç Yönetimi	: Binary Power Management
İşletme Giderleri	: Operating Expenses
Kaynak Havuzlama	: Resource Pooling
Kaynak Yönetimi	: Resource Management
Kentsel	: Urban
Kontrol Düzlemi	: Control Plane
Koordine edilmiş planlama/hüzme-oluşturma	: Coordinated Scheduling/Beamforming
Koordineli Çok Noktalı İletim	: Coordinated Multipoint Transmission
Kullanıcı Düzlemi	: User Plane
Merkezi Birim	: Central Unit
Nesnelerin İnterneti	: Internet-of-Things
Numeroloji	: Numerology
Ortak İletim	: Joint Transmission
Ortak İşleme	: Joint Processing
Ön Taşıyıcı Ağ	: Fronthaul
Planlama	: Scheduling
Radyo Erişim Ağı	: Radio Access Network
Radyo Kaynak Yönetimi	: Radio Resource Management
Sanal Ağ Fonksiyonları	: Virtual Network Functions
Sermaye Masrafı	: Capital Expenditure
Servis Kalitesi	: Quality of Service
Sıralı Girişim Gİderimi	: Successive Interference Cancellation
Soyutlama Katmanı	: Abstraction Layer
Sürekli Güç Yönetimi	: Continuous Power Management
Sürüm	: Release
Taşıyıcı Yiğini	: Carrier Aggregation
Tek Girişli Tek Çıkışlı	: Single Input Single Output



TemelBant Birimi	:	Base Band Unit
Topak	:	Cluster
Ultra-Güvenli ve Düşük Gecikmeli	:	Ultra-Reliable and Low-Latency
Uzak Radyo Başlığı	:	Remote Radio Head
Uzak Radyo Birimi	:	Remote Radio Unit
Uzak Radyo Kontrolörü	:	Remote Radio Controllers
Ücretlendirme	:	Accounting
Yeşil Radyo	:	Green Radio
Yetkilendirme	:	Authorization
Yineleme	:	Iteration
Yoğun Makinalar Tipi Haberleşme	:	Massive Machine-Type Communication

# 1. GİRİŞ

5G sadece mobil genişbant ağlarının bir evrimi olmayacak, yeni ağ ve servis yetenekleri getirecek ve kablosuz ağların yeniden tanımlayacaktır. İlk olarak, yüksek hareketlilik, çok yoğun veya seyrek nüfuslu alanlar ve heterojen teknolojilerin kullanıldığı zorlu durumlarda kullanıcı deneyiminin sürekliliğini sağlayacaktır. Buna ek olarak, 5G, çok sayıda sensörün bağlanması, cihazların zorlu enerji ve iletim kısıtlamaları ile bir araya getirilmesi için bir platform sağlayarak Nesnelerin İnterneti için önemli bir sağlayıcı olacaktır. Dahası, özel ağlar, tipik olarak kamu güvenliği tarafından ele alınan çok yüksek güvenilirlik, küresel kapsama ve / veya çok düşük gecikme gerektiren kritik görev hizmetleri, 5G altyapısı tarafından doğal olarak desteklenecektir. Dahası, yüksek güvenilirlik, kapsama ve düşük gecikme süreleri gerektiren görev kritik servisler, 5G altyapısı ile doğrudan destekleneceklerdir.

5G ile ağ, hesaplama ve depolama kaynaklarını tek bir programlanabilir ve birleştirilmiş altyapıya entegre edilecek ve bu sayede, tüm dağıtılmış kaynakların eniyilenmiş bir şekilde daha dinamik bir şekilde kullanılmasına olanak sağlanacaktır. Ayrıca, 5G, çoklu kiracılık modellerini destekleyerek, operatörlerin ve diğer oyuncuların yeni şekillerde işbirliği yapabilmelerini imkan sağlayacaktır.

5G, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir bir teknoloji olarak tasarlanmaktadır. Birincisi, telekom endüstrisi, cihaz sayısı ile artan enerji tüketimi telafi edebilmelidir, bu sebeple enerji verimliliği gelecek nesil kablosuz sistemler için önemli bir özelliktir [4]. Ayrıca, insan görevi otomasyonu ve donanım eniyilemesi yoluyla maliyet azaltma, tüm ICT (Information and Communication Technology) paydaşları için sürdürülebilir iş modelleri sağlanacaktır. Son olarak, 5G teknik ve iş modelleri oluşturma için bir ekosistem yaratmaktadır. 5G altyapıları ağ çözümleri sunarak otomotiv, enerji, gıda, tarım, şehir yönetimi, hükümet, sağlık, üretim, toplu taşıma vb. gibi dikey pazarlarda etkili olacaktır. Bu yeni pazar eğilimleri, araştırmacıları IMT-2020 gibi yeni gereksinimlere sahip yüksek seviyeli hedeflere yönlendirmektedir [5].

## 1.1 5G YENİ RADYO

### 1.1.1 5G Gereksinimleri ve Yetenekleri

Yeni özelliklere sahip ve zorlu gereksinimleri karşılayabilir, çok geniş bir uygulama alanı için bağlanabilirliği mümkün kılmak amacıyla, 5G kablosuz erişimin yetenekleri, önceki nesil mobil haberleşmenin ötesine uzanmalıdır. Bu yetenekler arasında yoğun sistem kapasitesi, her yerde çok yüksek veri hızları, çok düşük gecikme süreleri, ultra yüksek güvenilirlik ve erişebilirlik, çok düşük cihaz maliyeti ve enerji verimli ağlar yer alacaktır.

#### **Yoğun Sistem Kapasitesi**

Önümüzdeki yıllarda mobil haberleşme sistemlerinin trafik taleplerinin dramatik bir şekilde artması öngörülmektedir [6]. Bu trafiği uygun bir maliyetle desteklemek için, 5G ağları, günümüz ağlarına kıyasla bit başına çok daha düşük maliyetle veri sunmalıdır. Ayrıca, mevcut hücresel ağlara göre gönderilen bit başına önemli ölçüde daha düşük enerji tüketmelidir. Makinelerin bağlantısı için gerekli kablosuz olarak bağlanan algılayıcı, eyleyici ve benzer cihazların sayısındaki üssel artış, güvenliği tehlikeye atmadan ağ yönetimindeki yeni paradigmaları desteklemek için ağa zorlu talepler getirecektir. Her bir cihaz, tek tek veya ortak olarak, genel trafik hacmi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olacakları miktarda veri üretecek veya tüketecektir. Bununla birlikte, bağlı cihazların sayısı, ağdaki sinyalleşmeyi ve yönetimi ciddi şekilde zorlamaktadır.

#### **Her Yerde Yüksek Veri Hızları**

Mobil haberleşmenin her nesli, bir önceki nesile kıyasla daha yüksek veri hızlarıyla ilişkilendirilmektedir. Geçmişte, asıl hedef ideal koşullar altında bir radyo erişim teknolojisi tarafından desteklenebilen en yüksek veri hızına ulaşmak olmuştur. Ancak, daha da önemlisi, gerçek koşullara uygun ve farklı senaryolarda sağlanabilecek veri hızlarının yükseltilmesidir. Birkaç örnek vermek gerekirse; 5G, kapalı ve açık alan gibi belirli senaryolarda 10 Gbps'yi aşan veri hızlarını desteklemelidir. Benzer şekilde kentsel ve banliyö ortamlarda genellikle birkaç 100Mbps'lik veri hızları elde edilmelidir. Ayrıca, kırsal alanlar da dahil olmak üzere, en az 10 Mbps'lik veri hızları

hemen hemen her yerde erişilebilir olmalıdır [7].

### **Çok Düşük Gecikme**

Çok düşük gecikme, desteklenecek yeni uygulamalar tarafından yönlendirilecektir. Trafik güvenliği, kritik altyapı ve endüstri süreçlerinin kontrolü gibi bazı tasarlanan 5G kullanım durumları, bugünün mobil haberleşme sistemlerinde mümkün olan gecikme sürelerine kıyasla çok daha düşük olmalıdır. Gecikme-kritik uygulamalarının desteklenmesi için, 5G, bir uygulamanın uçtan uca 1ms veya daha az gecikmesine izin vermelidir. Bu bağlamda, birçok servis, hesaplama kapasitesini ve depolamayı hava arayüzüne yakın olarak dağıtacaktır. Bu, gerçek zamanlı haberleşme için yeni özellikler yaratacak ve eğlenceden endüstriyel süreç kontrolüne kadar çeşitli senaryolarda ultra yüksek hizmet güvenilirliğine olanak tanıyacaktır.

### **Ultra Yüksek Güvenilirlik ve Erişebilirlik**

Çok düşük gecikme süresine ek olarak, 5G, ultra yüksek güvenilirlik ve ultra yüksek erişebilirlik ile bağlantıyı sağlamalıdır. Kritik altyapının kontrolü ve trafik güvenliği gibi kritik servisler için belirlenmiş gecikme süreleri için bağlantı, sadece 'tipik olarak kullanılabilir' olmamalıdır, aksine bağlantı kalitesi ve hizmet kalitesinden sapma aşırı derecede nadir olabilir. Örneğin, bazı endüstriyel uygulamaların, 1 ms içinde %99,9999'dan daha yüksek bir olasılıkla başarılı paket teslimini garanti etmesi gerekebilir.

### **Çok Düşük Cihaz Maliyeti ve Enerji Tüketimi**

Düşük maliyetli, düşük enerjili mobil cihazlar, mobil haberleşmenin ilk günlerinden beri önemli bir pazar gereksinimi olmuştur. Bununla birlikte, milyarlarca sensör, aktüatör ve benzer cihazların kablosuz ağlara bağlanabilmesi için, cihaz maliyeti ve enerji tüketimi açısından yeni adımlar atılmalıdır. Bazı 5G uyumlu cihazların çok düşük maliyetle ve şarj olmaksızın birkaç yıl pil ömrü ile kullanılabilir olması mümkün olmalıdır.

## Enerji Verimli Ağlar

Günümüze kadar cihaz enerji tüketimi ön planda tutulurken, 5G ile ağ tarafındaki enerji verimliliği üç temel nedenden dolayı ek bir KPI (anahtar başarımlı indeks) olarak ortaya çıkmaktadır:

- Enerji verimliliği, özellikle ağların küçülerek daha da sık yerleştirmelere yönelmesiyle işletme maliyetini azaltacak önemli bir bileşendir.
- Enerji verimliliği, güç kaynağı olarak orta büyüklükte güneş panellerine dayanan şebeke dışı ağ dağıtımlarını mümkün kılacaktır, böylelikle kablosuz bağlantının en uzak alanlara bile ulaşmasını sağlar.
- Enerji verimliliği, operatörlerin daha iyi kapsama alanı sağlama konusundaki isteklerini sürdürülebilir ve kaynak açısından daha verimli bir şekilde gerçekleştirmelerini sağlayacaktır. Bu faktörlerin önemi 5G döneminde daha da artacak ve bu nedenle 5G radyo erişiminin tasarımında enerji verimliliği önemli bir gereklilik olacaktır.

5G yeni izge bantlarıyla, yüksek izgesel verimlilikle ve yüksek veri hacmi ile sadece mobil haberleşme ağlarının her zamanki gelişimi olmaktan ziyade, dikey endüstrilerle birlikte yeni gereksinimler ve işbirliği ile yeni servis ve işletme modellerine de olanak sağlayacaktır. Bu dikey sektörlerin ihtiyaçları da dikkate alındığında aşağıdaki 3 temel 5G servisi dikkat çekmektedir:

- Gelişmiş Mobil GenişBant (eMBB): Yüksek veri hızlarını, düşük gecikme sürelerini ve geniş kapsama alanında güvenilir genişbant erişimini hedeflemektedir.
- Yoğun Makineler Tipi Haberleşme (mMTC): Dünya genelinde milyarlarca cihazın kablosuz bağlantırlılığını hedeflemektedir. Hücre başına düşen bağlı cihaz sayısının ölçeklenebilirliği, geniş alan kapsama ve derin kapalı alan penetrasyonu öncelikle gözetilmektedir.
- Ultra-güvenli ve Düşük Gecikmeli Haberleşme (uRLLC): Araçlarla herhangi bir nesnenin haberleşmesi, endüstriyel kontrol uygulamaları, akıllı alan, vb. uygulamalar için geliştirilmesi planlanmaktadır.

Yukarıda bahsedilen her bir 5G hizmeti ayrı ayrı düşünülürse, 5G ağı için farklı radyo erişim ağları tasarımları ve mimarileri gerekli olacaktır. Ancak ekonomik, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir çözümler için bu hizmetleri aynı anda sunabilen ortak bir RAN (radyo erişim ağı, radio access network) yapısına ihtiyaç vardır.

### **1.1.2 5G Radyo Erişimi**

5G teknolojisinin gerçekleşmesi için bir dizi yeni radyo erişim teknolojilerinin şu anda kullanılan teknolojilerle birleştirilmesi planlanmaktadır. Milimetre dalgalar gibi yeni frekans bantlarının kullanılması beklenmektedir. Bu durum şu anki hücre planlamalarını daha da küçük ve yoğun yapacaktır. Ayrıca yoğun MIMO sistemlerinin kullanılması da daha verimli girişim yönetim tasarımlarına ihtiyaç duymaktadır. Koordineli çok noktalı iletim (CoMP) bu teknikler arasında dikkat çekmektedir. Heterojen ağlarda makro- ve küçük hücreler arasındaki girişimin de sıkı bir şekilde koordine edilmesi gerekmektedir. Ağ içinde farklı radyo erişim teknolojilerine aynı anda bağlanabilme fonksiyonu MC (Çoklu Bağlantı, Multi Connectivity) bulunmalıdır. Örneğin, LTE-A ile yeni nesil 5G radyonun da birlikte kullanılabilmesi gerekmektedir.

Bu hedeflere geleneksel dağıtık radyo erişim ağı (D-RAN) sistemleriyle ulaşılabilecek olsa da, merkezi radyo erişim ağı (C-RAN) ayrıca önerilmektedir. C-RAN donanımı merkezleştirerek ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltarak operatörler için CAPEX (sermaye masrafı, capital expenditure) ve OPEX (işletme giderleri, operating expenses) avantajları sunmaktadır. 5G RAN'ın çeşitli senaryolara uyum sağlayabilecek şekilde esnek olması istenmektedir, bu yüzden farklı yerleştirme seçeneklerinin RAN teknolojisinin gelişiminde belirleyici olması beklenmektedir.

### **1.1.3 5G Sistem Mimarisi**

Bu bölümde, 5G RAN'ın bazı mimari özelliklerine, fonksiyonel mimari tasarım görüşlerine, bazı RAN ve çekirdek ağ (CN) fonksiyonlarına, RAN yerleştirme topolojilerine değinilecektir.

### 1.1.3.1 Fonksiyonel Tasarım Görüşleri

5G ağ fonksiyonları önceki hücreyel haberleşme nesillerinden farklı tasarım paradigmalarını takip etmesi düşünülmektedir. 5G için ağ fonksiyonları sadece bağlantı ile ilişkilendirilmenin ötesinde, aynı zamanda ağdaki hesaplama ve depolama için de mevcut olacaktır [8], [9]. Daha açıkça, ağ fonksiyonları filtreleme, iletme, paket denetimi gibi klasik bağlantı servislerini sağlarken, ayrıca 5G ağlarında web-sağlayıcıları ve veri tabanı fonksiyonelliği gibi daha karmaşık fonksiyonlar da sağlanacaktır. 5G için ağ fonksiyonlarında Sanal Ağ Fonksiyonları (VNFs) adında ekstra önemli bir sınıf bulunması öngörülmektedir. Bu sınıf, yüksek hesaplama gücüne sahip platformlarda, veya bulut hesaplama yapılarında çalışan bir veya daha fazla sanal makine ile temsil edilmektedir. Geçmişte çalışma amacına göre özel üretilmiş donanımlarda çalışan ağ fonksiyonları günümüzde bu sanal makinalarda çalıştırılabilmektedir. VNF'lerin çekirdek ağ fonksiyonlarının tasarımında da önemli bir göreve sahip olmaları beklenmektedir.

5G'de ağ fonksiyonları çeşitli kullanım amacına ve servis gereksinimlerine göre tasarlanıp fiziksel mimariye eşleştirilecektir [10]. Belirli servisler için ayrılmış bazı ağ fonksiyonlarının birlikte geçerli kılınmasıyla ve/veya ilgili servisler için parametrize edilebilecek yeni ağ fonksiyonları tanımlanarak çeşitli servisler desteklenecektir. Eski nesil sistemlere kıyasla 5G'de ağ fonksiyonlarının fiziksel mimariden ayrıştırılması kuvvetli olarak planlanmaktadır [11]. Önceki sistemlerde ağ fonksiyonları ağ birimlerinde aralarındaki bağlantılar da göz önüne alınarak gruplandırılır, ve her birim önceden belirlenmiş bu fonksiyon setinden sorumlu olurdu. Dolayısıyla fiziksel ağ birimlerine ağ fonksiyonlarının ataması yapılırken serbestlik derecesi oldukça kısıtlı olmaktadır. Örnek olarak, temelbant birimleri ile radyo birimlerinin aynı yerde bulunduğu geleneksel RAN'lar çeşitli sınırlamalara maruz kalmaktadır: i) yeterince kullanılmamış kaynaklardan kaynaklı yüksek CAPEX ve OPEX, ii) sınırlı ölçeklendirilebilirlik ve esneklik, iii) sınırlı yoğunluk, iv) yüksek yönetim giderleri, ve v) kaynak paylaşımı eksikliğinden kaynaklanan verimsiz enerji yönetimi. Bu sınırlara çözüm olarak Merkezi Radyo Erişim Ağları (C-RAN) önerilmiştir. C-RAN'da dağıtık erişim noktaları olan RRH'ler (uzak radyo başlığı, remote radio head) yüksek bantgenişliği olan an taşıyıcı ağ ile BBU'lara (Temelbant Birimi, Baseband Unit) ve merkezi birime

bağlıdır. Ancak kazançlarına rağmen merkeziyetçilikten doğan sistem karmaşıklığı ile esneklik arasında bir denge gözetilmelidir.

### **Service Uygun Radyo Erişim ve Çekirdek Ağ Fonksiyonları**

Bu bölümde, 5G servislerinin ihtiyaç duyduğu bazı ağ fonksiyonlarından örnekler verilmiştir. Genellikle, protokollerdeki birçok servis aynı fonksiyonları tekrar kullanır, farklılaşma sadece az sayıdaki fonksiyon üzerindedir. Örneğin, farklı kodlama stratejileri, MIMO modları gibi işlevler arasından veri hacmi, gecikme ve güvenilirlik için servis ihtiyacına göre eniyileme yapılarak seçilmektedir. Çizelge 1.1’de radyo erişim ve çekirdek ağ bölmeleriyle alakalı olabilecek servis uyumlandırılmış bazı ağ fonksiyonları verilmiştir.

### **RAN Protokol Mimarisi ve Çoklu-Bağlantı Yaklaşımı**

5G protokol mimarisi ile ilgili çalışmalar genellikle bazı değişikliklerle birlikte LTE mimarisinde şekillenmektedir. Örnek olarak, LTE’de radyo erişim teknolojileri arasında geçiş yapılması olarak tanımlanan dinamik trafik yönlendirmenin, 5G’de servislerin MAC seviyesinde uygun radyo erişim teknolojilerine atanması ve dolayısıyla hızlanması verilebilir.

Farklı servisler ve gereksinimleri, farklı frekans bantları, farklı hücre çeşitleri için çeşitli ağ fonksiyonlarına ihtiyaç duyulmasına rağmen, protokol katmanları arasında kullanılan ağ fonksiyonlarında büyük bir oranda ortaklık olması beklenmektedir. 6 GHz altı ve üstü radyo erişim teknolojileri farklı fiziksel katman ve sinyal işleme yaklaşımlarından faydalansalar bile; yalın standart tanımlamaları, sadeleştirilmiş yapı ve cihaz karmaşıklığı için yüksek protokol katmanlarında ilgili ağ fonksiyonlarının benzer olması gerekmektedir. Bu benzerlik yukarıda bahsedilen ağ fonksiyonlarının, farklı servisleri, frekans bantları ve hücre çeşitlerini destekleyecek şekilde parametrize edilerek bloklar halinde tekrar kullanılması ile elde edilebilir.

Çoklu hücreler veya çoklu frekans bantları arasında çoklu bağlantı biçiminde kullanıcı düzlemi kümelenmesinin veya kontrol düzlemi birleşiminin desteklenmesi için genel protokol katmanı belirtimi bir önkoşuldur. Bu bağlamda aşağıdaki seçenekler düşünülmüştür.



Çizelge 1.1. Ağ Fonksiyonları

Ağ Fonksiyonu Çeşidi		Olası Servise Özel Nitelikler
Genel Bağlanırlık	Bağlanırlık Modeli	Taşıyıcı tabanlı (yüksek veri hacmi servisleri için) veya taşıyıcı bağlantısız (IoT için)
Genel Bağlanırlık	Çoklu Bağlantı	Farklı ağ katmanlarında (makro/mikro), izgede (6 GHz altı/mm-dalga), kullanıcı düzleminde (MAC/RLC/PDCP), servis, yerleştirme ve RAT'a (radyo erişim teknolojisi, radio access technology) bağlı teknolojilerde (WiFi/LTE) çoklu bağlantı
	İzge Erişimi	Lisanslı, lisanssız ve lisans destekli izgede servis bağımlı işlemler
RRC bağlantılı	Hareketlilik	Ölçüm, gruplar (tren, otobüs), yüksek hızlar (araba, tren, uçak), takip sensörleri veya klasik hareketlilik (yaya genişbant)
RRC bağlantılı	Hücre keşfi	6 GHz altı MIMO, masif MIMO mm-dalga (6 GHz destekli), ultra-yoğun ağlarda küçük hücreler keşfi (makro katman kapsamıyla)
	PDCP	Servise özel olarak başlık sıkıştırma ve şifrelemenin ihmal edilmesi
	RLC	Alındı onayı olmayan mod (örn., sensörler), alındı onayı olan mod (örn., kritik görevli servisler)
MAC / PHY	Taşıyıcı Yığılı	Enerji tüketimini de etkilediği için her senaryoda ihtiyaç duyulmamaktadır
MAC / PHY	Çoklu-hücre İşbirliği	Servis, yük, yerleştirme ve kanal bağımlı sıkı işbirliği (sembol eşzamanlı işlemler, karıştırma, planlama, CoMP) veya gevşetilmiş işbirliği (ICIC)
MAC / PHY	H-ARQ	İzgesel verimlilik için (masif genişbant), kapsama için (sensorler, IoT), güvenilirlik için (kritik görevli servisler) eniyileştirilmiştir
MAC / PHY	Kodlama	Kısa iletim için block kodlar (sensor), yüksek veri hacmi için turbo-kodlar

Çoklu 5G radyo teknolojileri arasında kullanıcı düzlemi kümelenmesi MAC, RLC ve PDCP (veya 5G eşdeğerleri) katmanlarında olacaktır. MAC katmanı kümelenmesinin çapraz taşıyıcı zamanlama gibi daha sıkı birleşmeleri olası kılması beklenmektedir. Ayrıca, MAC veya RLC katmanlarındaki kullanıcı düzlemi kümelenmesi sadece eş konumlu yerleştirmeler ve/veya iyi kaliteli omurga bağlantıları için mümkündür. PDCP katmanı kümelenmesi MAC katmanına benzer olmakla birlikte (daha düşük kazançlar ve çapraz-taşıyıcı zamanlaması hariç) ideal olmayan ana omurgaya sahip dağıtık yerleştirmeler için daha uygundur. LTE-A ve 5G arasında kullanıcı düzlemi kümelenmesinin PDCP katmanında olması öngörülmekle birlikte MAC katmanı için de çalışmalar devam etmektedir [12].

5G radyo oluşumları arasında kontrol düzlemi birleşiminin yukarıda anlatılan kullanıcı düzlemi kümelenmesini destekleyen tek bir tane uzak radyo kontrolörü (RRC, remote radio controller) olacağı öngörülmektedir. Bu yapı, ağda tek bir RRC biriminin ana eNB'de (MeNB) bulunduğu ve ikincil eNB'nin (SeNB) alt-katman parametrelerini ayarlamak için X2 arayüzü aracılığı ile MeNB ile iletişim kurduğu LTE sürüm-12'ye eşdeğer olacaktır. Günümüzde, RRC sinyalleşmesinin kontrolü, RRC çeşitliliği ve hücrelerarasında hızlı kontrol düzlemi değişimi birçok farklı projede çalışılmaktadır.

### **1.1.3.2 Fiziksel Mimari**

Bu kesimde 5G radyo ağları için fiziksel mimari yapı incelenmektedir. Bu mimari hem sadece radyo erişim ağının kendisini hem de çekirdek ağ fonksiyonlarına olan bağlantısını içermektedir. Bu fonksiyonların erişim noktalarının gerek dağıtık gerekse merkezi olarak yerleştirilmiş olabileceği durumlarda kullanılabilir olmaları gerekmektedir. CN fonksiyonların uygulanması için, sabit ağ içinde hesaplama ve depolama işlemlerinin yapıldığı birkaç küme düğümü bulunmaktadır.

Küçük hücre katmanlarının günümüzde kullanılan makro-hücre ağının içine entegre edilmesi 5G radyo ağları için önemli bir problemdir. Küçük hücreler için geleneksel dağıtık RAN (D-RAN) kullanılmasının yanında, uzak radyo başlıklarının (RRH) makro-hücreye bir arayüz ile bağlandığı merkezi-RAN (C-RAN) yaklaşımı da düşünülmektedir. Bu arayüz iletişimi için hali hazırda kullanılan CPRI, ORI ve OBSAI bağlantıları yerine Ethernet teknolojisi düşünülen çözümlerden bir tanesidir. Farklı

RAT'ların da merkezi RAN'a dahil edilmesiyle bir bulut yapısı düşünülebilir. Gerçekleştirilen 5G çalışmalarında, merkezi-RAN ve bulut-RAN genelde aynı hedeflere, yapılara ve hesaplama yeteneklerine sahip oldukları için, aynı anlamda kullanılmaktadır. 5G senaryolarında yaşanabilecek tıkanıklık dolayısıyla bir kısım işlem yükünü RRH'ye kaydırarak fonksiyonel bir bölünme gerçekleştirmek ve arayüzdeki iletim kapasite ihtiyacını azaltmak ilgi çekici bir öneri olarak gözükmektedir. Bunlar düşünüldüğünde C-RAN'ların 5G sistem mimarisine verimli bir şekilde entegre edilmesi planlanmaktadır.

### **Radyo Erişim Ağı**

5G ağlarının gereksinimlerini karşılamak için mevcut teknolojiler ile birlikte yeni radyo teknolojilerinin entegre edilmesi gerekmektedir. Milimetre dalgalar gibi yeni frekans bölgelerinin kullanılması planlanmaktadır ki bu da daha küçük ve yoğun küçük hücreler oluşturacaktır. Ayrıca yoğun MIMO sistemlerinin kullanılması ile daha verimli CoMP gibi girişim yönetim tekniklerine ihtiyaç duyulacaktır [13]. Bu girişim koordinasyonunun makro- ve küçük-hücreler arasında da olması gerekmektedir. Klasik D-RAN sistemleriyle de bu entegrasyon yapılabiliyor olsa da, operatörler C-RAN ile donanımları merkezileştirerek ve enerji tüketimini düşürerek CAPEX ve OPEX önemli ölçüde kısımlayabileceklerdir [14].

Arzulanan RAN esnekliği kullanılan teknolojilerin neleri desteklemesi konusunda bazı gereksinimler getirmektedir. Aynı zamanda, bu teknolojilerin gerçek uygulamalarda neler önerebileceği konusunda da limitler getirecektir. 5G çekirdek gelişimi ile tek bir yapı üzerinde farklı yerleştirme senaryolarını kullanabilecek ve gerçek bir sistemde bu bağımlılıkları çözebilecektir. Literatürde genel olarak işlem yükünün bulunduğu yerlere göre çeşitli somut RAN senaryoları önerilmektedir. İlk olarak çekirdek ağ fonksiyonlarını küme düğümlerine taşımak düşünülebilir. İkinci senaryoda ise, merkezi ortak işlemler için (örnek olarak küçük hücre işlemlerinin makro-hücrede yapılması) RAN fonksiyonlarının küme düğümlerine taşınması değerlendirilebilir. Üçüncü senaryo olarak, her biri birden fazla komşu bölgeye hizmet verecek şekilde, merkezi işlem yapan topaklar oluşturulması düşünülebilir. Genel hedef, 5G RAN tasarımının belirtilen bu senaryoların hepsini desteklemesidir [15].

METIS II projesi ile 5G RAN tasarımı konusunda çalışmalar yapılmaktadır, aşağıda önemli gereksinimlerden bazıları belirtilmiştir:

- 5G RAN veri hacmi, desteklediği bağlantı ve cihaz sayısı konusunda oldukça yüksek değerleri desteklemelidir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için kullanıcı düzlemi (UP, user plane) ve kontrol düzlemi (CP, control plane) ayrı ayrı ele alınmalı ve ölçeklendirilmelidir.
- Çeşitli servislerin çalıştırılabilmesi için bütün ağ (RAN ve CN) yazılım ile kontrol edilebilmelidir.
- 5G RAN çoklu bağlantıyı (hem erişim noktaları arasında hem haberleşme arayüzleri arasında) ve ağ-kontröllü D2D haberleşmesini (iki nokta arası) desteklemelidir.
- 5G RAN merkezi işlemlerden maksimum faydalanabilecek, ayrıca ana taşıyıcı yapısının kayıplı olabildiği dağıtık baz istasyonlarının bulunduğu durumda da çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır.
- İleride yeni özellik ve servislerin eklenmesine olanak sağlayabilmeli ve sonraki sürümlerinde cihazların geçmiş ile uyumluluğunu sağlayabilmelidir.
- 5G RAN tasarımı enerji verimli olmalıdır; ağ için uyku moduna ve bazı erişim noktalarının kontrol sinyallerinin göndermesine gerek olmadığı esnek yerleştirmelere olanak sağlayabilmelidir.
- Bantgenişliği ve yayılım koşulları gibi kanalın çeşitli karakteristik özellikleriyle birlikte geniş spektrum aralığında çalışabilmelidir.
- 5G RAN günümüz teknolojileri (LTE-A) ile yeni 5G teknolojilerinin birleştirilmesi de hedeflenmelidir.

### **C-RAN'ı Destekleyebilecek Fiziksel Mimari**

5G RAN mimarisinin servis ve yapı gereksinimlerini desteklemesi gerekliliğinden bahsedilmiştir. Örnek olarak, D-RAN ve C-RAN yapılarının ikisi de her zaman eniyi

değil; D-RAN düşük gecikme bakımından eniyiyken, C-RAN ise yüksek izgesel verimlilik, enerji verimliliği ve düşük maliyetler açısından daha iyidir. C-RAN için, dalgabiçimi örneklerinin aktarımı için makro-hücre başına 1 Tbit/s veri hızı gerekmekte, ve dolayısıyla ön taşıyıcı ağdaki optik bantgenişliği kullanımının düşürülmesi gerekmektedir [16]. Burada çözüm olarak ağ başarımını koruyacak şekilde temelbant işlemlerinin bölünmesi önerilmektedir [17], [18]. Bölünme seçenekleri her işlemin lokal olarak RRH'lerde yapıldığı D-RAN'dan, bazı veya bütün sinyal işleminin RRH'den temelbant ünitesine (BBU) kaydırıldığı tamamen merkezi olduğu C-RAN'lara kadar çeşitlendirilebilir. Enuygun bölünme ise girişim seviyeleri (merkezi işlemlere gerek olmayabilir), ağ karakteristiği ve topolojisi, desteklenmesi gerek servisler gibi birçok değişkene bağlıdır [19].

İki uç nokta olan C-RAN ile D-RAN arasında, sanallaştırma ve yazılım tabanlı şebeke konseptleri kullanılarak daha esnek bir mimari oluşturulabilir. Bu yapı literatürde dinamik D-RAN olarak geçmektedir. İdeal olarak, ön taşıyıcı ağında taşınan sinyallerin fiziksel BBU'da işlenmesine gerek kalmadan BBU fonksiyonlarını (kendilerinin özel donanım ihtiyacı olan fonksiyonlar hariç) çalıştıran sanal ağ fonksiyonları tarafından işlem görebilir. Bu sanal fonksiyonlar gecikme gibi ön taşıyıcı ağ kısıtlarını sağlayacak şekilde uygun ağ düğümlerinde bulunan donanımlarda gerçekleştirilecektir. Dolayısıyla belirli bir kullanıcıdan sorumlu BBU fiziksel bir konuma bağlı olmak yerine, hem fiziksel hem sanal ağ fonksiyonları olarak ikiye bölünebilir. Sanal olanlar ağ ve servis gereksinimlerine göre ağ içinde dinamik olarak hareket edebilirler. Bu yüzden, veri merkezleri de dinamik D-RAN'ın bir parçası olacaktır [20].

## **RAN Yerleştirme Topolojileri**

Yukarıda yazılanları özetlemek gerekirse, 5G servis gereksinimlerini karşılamak için, RAN mimarisinin esnek olması, hem kontrol/kullanıcı düzlemleri (CP/UP) olarak hem de merkezi/dağıtık birimler (CU/DU) olarak iki boyutlu bölünmelere uygun olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Yüksek katman işlem fonksiyonları fiziksel merkezi birimde bulunurken, düşük katman ağ fonksiyonları ise RRH gibi anten bölgelerine yakın bulunan dağıtık birimlerde bulunması hedeflenmektedir. CU/DU bölünmesinin esas sebebi, radyo erişim birimlerinin sayısının da artmasıyla merkezi birimde yapılacak temelbant işlemlerinin merkezileştirilmesinden doğacak kazançlardır. Tez

kapsamında üç temel mimari tanımlanmaktadır:

1. Dinamik Dağıtık RAN (DD-RAN): Bazı ağ fonksiyonlarının katmanlar arasında dağıtılıp bazılarının ise merkezi olarak tutulduğu durumdur. Bizim çalışmamızda radyo kaynak yönetimi (RM) ve girişim yönetimi (IM) fonksiyonları merkezleştirilmiştir. Bölüm 2’de incelenmektedir.
2. Dağıtık RAN (D-RAN): Ağ fonksiyonlarının hiçbiri merkezi değildir ve hücrelere dağıtılmıştır. Bölüm 3’te incelenmektedir. Bu yapının getirdiği dezavantajlardan bazıları: (i) yeterince kullanılmamış kaynaklardan kaynaklı yüksek CAPEX ve OPEX, (ii) sınırlı ölçeklendirilebilirlik ve esneklik ve (iii) kaynak paylaşımı eksikliğinden kaynaklanan verimsiz enerji yönetimi. Bu sınırlara çözüm olarak Merkezi Radyo Erişim Ağları (C-RAN) önerilmiştir.
3. Bulut RAN (C-RAN): Bulut RAN ile baz istasyonu işlemlerinin merkezleştirilmesi, ağ yönetimini basitleştirecek ve radyo kaynaklarının koordinasyonunu sağlayacaktır. Hücreler ve frekans bantları arasındaki radyo koordinasyonu, izgesel verimliliği ve kullanıcı deneyimini en üst düzeye çıkarmak için kullanılır. Farklı bantlardaki farklı bantgenişliklerine ve aynı zamanda giderek heterojen ağ dağıtımlarına ihtiyaç duyulacağı ve bu durumun, kesintisiz bir kullanıcı deneyimi sağlamak için teknolojiler ve hücre katmanları arasında gittikçe daha sıkı bir şekilde işbirliği yapılmasını gerektireceği tahmin edilmektedir. CoMP, çoklu-bağlantı gibi mekanizmalarla birlikte merkezleştirilmiş koordinasyon işlevselliği, taşıyıcı birleştirme, hareketlilik ve girişim yönetimi dahil olmak üzere ağın performansını en üst düzeye çıkarmak için oldukça önemlidir. Ancak kazançlarına rağmen merkezizetçilikten doğan sistem karmaşıklığı ile esneklik arasında bir denge gözetilmelidir. Bölüm 4’te incelenmektedir.

Yine, merkezleştirilmiş temelbant konfigürasyonu, girişim yönetimi, ortak işlem ve alım-birleştirme teknikleri için büyük bir potansiyel sağlar. Ancak yüksek bantgenişliği ve düşük gecikme, kısıtları dolayısıyla kayıpsız ve gecikmesiz (ideal) ön taşıyıcı ağa ihtiyaç duymaktadır. Bizim çalışmamızda da ideal ön taşıyıcı ağ kullanıldığı varsayılmıştır.

#### 1.1.4 5G Radyo Kaynak Yönetimi Çerçevesi

Operatörler için iletim gücü ve bantgenişliği önemli ve sınırlı kaynaklardır. Özellikle, hücresel ağlar, radyo/televizyon yayınları, uydu servisleri ve askeri uygulamalar gibi çeşitli amaçlarla kullanılan radyo frekans bandının kalabalık olması ve pahalı olması düşünöldüğünde, bu kaynağın eniyi şekilde kullanılması kritik bir önem taşımaktadır. Bu yüzden, kablosuz haberleşme sistemlerinin ilgili radyo frekans kaynaklarını mümkün olduğunca verimli kullanacak şekilde tasarlanması gerekmektedir, bir başka deyişle bütün sistemde yüksek izgesel verimliliğe (bits/s/Hz) ulaşılması gerekmektedir. Hücresel ağların yavaş hızlardaki ses/mesajlaşma servislerinden yüksek hızlı ve az gecikmeli veri iletimi dönemine geçişi düşünöldüğünde bu verimlilik daha da önem kazanmaktadır.

Heterojen ağlarda da katmanlar arasında izge paylaşımı önemli bir konudur. Kaynaklar kullanıcılara dikgen bir şekilde dağıtılsa bile, diğer katmanlardan gelen girişim izge verimsizliğine yol açmaktadır. Bu yüzden, kaynakların en fazla kullanılabileceği şekilde, girişim yönetiminin yapıldığı stratejiler geliştirilmelidir. RRM (radyo kaynak idaresi, radio resource management) 5G ağ mimarisinde de önemli bir bileşendir. 5G mimarisinde önerilen RRM çerçevesi iki tip bileşenden oluşur: cRRM (Merkezi Radyo Kaynak İdaresi, Centralized Radio Resource Management) ve dRRM (Dağıtık Radyo Kaynak İdaresi, Distributed Radio Resource Management).

Bir şebeke operatörü, tipik olarak bir ağgeçidi biriminde birkaç yüz hücreyi kontrol eden, bir veya daha fazla cRRM varlığına sahip olacaktır. Buna karşın dRRM her hücrede bulunur ve bir veya daha fazla cRRM ile iletişim kurar. dRRM'ler farklı operatörlerdeki cRRM'lerle iletişim kurabilmekte ve bu şekilde hücre çoklu-kiracı özelliğine sahip olabilmektedir. Önerilen RRM tasarımı, algoritmalarının merkezileştirilmiş veya dağıtılmış olmasına farkına bakmadan birden fazla servis sağlayıcıyla ortak çalışabilecektir. Ayrıca, önerilen RRM çerçevesi bulut hesaplama ortamlarında ve gömülü ekipmanlarda da çalışabilecektir.

RRM çerçevesinin en önemli tasarım gereksinimleri şunlardır:

- RRM, bir cRRM ve bir veya daha fazla dRRM'den oluşur.

- Sadece İzge Yöneticisi ile hücre arasında bir ağgeçidi olsa bile, cRRM her zaman bir ağda konuşlandırılır.
- dRRM, cRRM ile hücre katmanları arasında bir ağgeçidi olarak kullanılsa bile, her zaman bir hücreye yerleştirilir.
- Hücreler, operatör başına sadece bir tane ilgili cRRM'ye sahiptir.
- dRRM'ler her operatör için bir tane olacak şekilde birden fazla cRRM ile bağlanabilir.
- cRRM'de alınan kararlar, dRRM'de alınanlara göre daha önceliklidir. cRRM yeni bir yapılandırma gönderdiğinde, dRRM durumunu cRRM bilgisi ile sıfırlar.
- Sadece cRRM, izge yöneticisinden veri talep edebilir. Herhangi bir dRRM talebi önce cRRM'den geçer.
- Hücreler RAN paylaşımını desteklerler.
- RAN paylaşımını desteklemek için cRRM'ler arasında yeni bir arayüz sağlanmaktadır.
- Esnek dağıtılmış fonksiyonellikle bulut hesaplamalara uygundur.

#### **1.1.4.1 Radyo Kaynak Yönetimi ve Girişim Yönetimi Koordinasyon Dereceleri**

5G ağ mimarisinde RRM, merkezi ve dağıtık olmak üzere iki farklı koordinasyon derecesine sahiptir. Bu tezde karşılaştırma yapılması açısından bir de merkezi olmayan RRM seçeneği de üçüncü bir yaklaşım olarak incelenmektedir:

1. Merkezi Radyo Kaynak Yönetimi (cRRM): Merkeziyetçilik sayesinde elde edilen yüksek koordinasyon derecesinden faydalanılarak bir radyo erişim düğümü yerine bütün ağ bilgileri kullanılarak kaynak yönetimi, hücrelerarası geçişler, taşıyıcı kümelenmesi, girişim yönetimi başarımını artırmak mümkündür. Bölümler 2 ve 4'te incelenmektedir.
2. Dağıtık Radyo Kaynak Yönetimi (dRRM): Kanal durum bilgisi alışverişini azaltmak için, bazı girişim yönetimi ve kaynak tahsisi tasarıları, her bir hücrenin



kendi kısıtlarına bağılı kalarak kendi faydasını enbüyütmeyi amaçladığı dağıtılmış bir mimariyi benimsemiştir. Bizim bağlamımızda, RRM ve IM fonksiyonları her hücrede bulunan karar birimlerine dağıtılmıştır, ve hücre kazançları yanında sadece kullanıcıların maruz kaldığı girişim bilgisine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu bilgiler diğer hücrelerle herhangi bir iletişim kurulmadan kestirilebilirler. Bölüm 3'te incelenmektedir.

3. Merkezi Olmayan Radyo Kaynak Yönetimi (decRRM): dRRM'e benzer şekilde, her hücre kendi özel kısıtları altında, kendi faydasını enbüyütmeye çalışmaktadır. Bu yaklaşımda hücrelerarası girişim hücrelerin kendi eniyilemelerine etki etmemektedir. Merkezi ve dağıtık RRM yaklaşımları kullandıkları fazla bilgiler sayesinde merkezi olmayan yaklaşımdan daha iyi sonuçlar sunacaklardır. Bölüm 3'te incelenmektedir.

### **1.1.5 Kullanılan 5G Etkinleştirici Teknolojiler ve Ağ Fonksiyonları**

#### **1.1.5.1 Koordine Edilmiş Çok Noktalı Haberleşme (CoMP)**

Kullanıcıların yüksek kaliteli hizmet için artan talebi, kablosuz izge sıkıntısı ile birleştiğinde, hücrelerarası girişimi azaltmak ve hücre kenarındaki kullanıcıların servis kalitesini artırmak için daha gelişmiş kablosuz haberleşme teknikleri gerekmektedir. CoMP, haberleşme sistemlerinde aynı fiziksel hücrede bulunan veya bulunmayan çoklu vericilerin (alıcıların) koordineli biçimde çalışıp maruz kalınan girişimi azaltmaları ve sinyal kalitesini artırmak için geliştirilen tekniklere verilen genel bir isimdir [21]. LTE-A Rel-11'de yüksek veri hızları, hücre kenarındaki iş hacmini ve kapsamını iyileştirmek için bir araç olarak dikkate alınmaktadır. Aynı zamanda heterojen ağlarda girişim sorunları ile eICIC'e göre daha dinamik olarak baş etmek için alternatif bir yaklaşım olarak sunulmuştur [22].

Bir hücresel ağda dağıtık anten sisteminde tüm erişim noktalarının birbirleriyle koordineli biçimde çalışması, CoMP olarak adlandırılmaktadır. RAN tasarımında ana taşıyıcı bağlantısında fiber optik veya radyolink kullanılması nedeniyle yüksek kapasite ve düşük gecikmeye sahip bir arayüz sunulmaktadır. Bunun getirisi olarak erişim noktaları, kontrol birimine aldıkları sinyalleri temelbant sinyali düzeyinde bildirebilir.

Böylece ortaklaşa sinyal işleme ve güç kontrol tekniklerini kullanmak ve diğer bağlantılara oranla başarıyı yüksek uyarlamalı RRM tekniklerinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Oluşan sistem temelde aşağı yönlü iletimde yayın kanalı ve yukarı yönlü iletimde çoklu erişim kanalı yapılarına paraleldir; ancak kullanıcıların coğrafik olarak dağıtık olmasının yanı sıra CoMP'ta erişim noktaları da dağıtık.

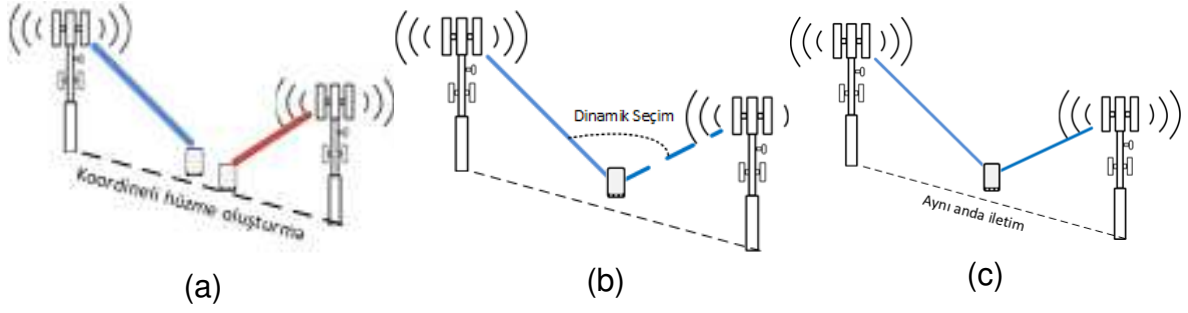
CoMP fonksiyonunun uygulanabilirliği, uygulanabilecek CoMP işleminin türü ve ilişkili başarıyı büyük ölçüde ana taşıyıcı özelliklerine (gecikme ve kapasite) bağlıdır. LTE'de kullanılan RAN topolojisi ve ana taşıyıcı özellikleri dikkate alındığında, CoMP çalışmasında aşağıdaki senaryolara odaklanılmaktadır:

- Homojen bir ağda, makro-hücreler arası koordinasyon.
- Yüksek güç çıkışına sahip RRH'lerin bulunduğu homojen bir ağın koordinasyonu
- Makro-hücrelerin kapsamında düşük güç tüketimli erişim noktalarının bulunduğu heterojen ağ koordinasyonu.

CoMP teknikleri genel olarak Şekil 1.1'de gösterilen ve aşağıdaki tanımlanan kategorilerden birine dayanmaktadır:

1. **Ortak İşleme (JP):** Kullanıcı verisi, CoMP işbirliği setindeki birden çok erişim noktasında bulunmaktadır.

- **Ortak İletim (JT):** Ortak iletim, birden fazla birlikte çalışan erişim noktasından bir UE terminaline aynı anda veri aktarımı olarak tanımlanır. Veri iletimi evreuyumlu veya evreuyumsuz olabilir ve genelde sistem veri hacmini veya benzer bir sistem çapında başarıyı metriğini geliştirmeyi amaçlar. Bir girişim sinyalini istenen bir sinyale dönüştürerek hücre kenarı performansını da iyileştirmektedir. Yoğun küçük hücrelerde ve düşük güç düğümleri olan heterojen ağlarda, birden fazla erişim noktasından eşzamanlı olarak güçlü sinyaller alan birçok kullanıcı terminali desteklenebilir.



Şekil 1.1. Koordine Edilmiş Çok Noktalı İletişim (CoMP) Yöntemleri: (a) Koordine edilmiş hüzmeye oluşturma (CB-CoMP), (b) Dinamik erişim noktası seçimi (DPS-CoMP), (c) Eş zamanlı iletim (JT-CoMP).

- **Dinamik erişim noktası seçimi (DPS):** CoMP işbirliği kümesinden sadece bir erişim noktası kullanıcıya veri iletmektedir. Kanal koşullarındaki değişiklikleri kullanarak UE'nin en uygun erişim noktası tarafından dinamik olarak iletişim kurması sağlanır.

- DPS zaman-frekans kaynakları gözetilerek JT ile birleştirilebilir.
- Dinamik hücre seçimi (DCS) de buraya dahil edilmektedir.

2. **Koordine edilmiş planlama/hüzmeye oluşturma (CS/CB):** RRH dağıtımlarında, birden fazla erişim noktasını kontrol eden tek bir BBU, aralarında çok düşük gecikme koordinasyonu sağlayabilir ve ortak planlayıcı uygulamalarına izin verebilir. Bu ortak planlayıcı, BBU'nun kontrol alanı boyunca değişen kısa süreli kanal koşullarına ve farklı trafik yüklerine dinamik olarak uyum sağlayarak kaynak havuzlamaya izin verir. Genel olarak, büyük topak boyutları bu kazanımları geliştirir. Bununla birlikte, gerçek dağıtımlardaki ana taşıyıcı kısıtlamaları, ortak iletim ve programlamanın gerçekleştirilebileceği topak boyutunu sınırlayabilir ya da planlama işlemini basitleştirmek için ağ tarafından da kısıtlanabilir. Merkezi planlama topak boyutlarını artırmak için kullanılabilir. Ayrıca, bir UE terminali tarafından deneyimlenen girişim seviyesini azaltmak için, girişimi UE'nin boşluğuna doğru yönlendirme amacıyla girişim noktalarının hüzmeye oluşturma ağırlıklarını uygun bir şekilde seçer.

3. JP ve CS/CB'nin ortak olarak kullanıldığı hibrit kategoriler de mümkündür.

CoMP topak sınırlarında bulunan kullanıcıların söz konusu başarımlarını ele almak için bir seçenek, komşu CoMP kümeleri arasında koordinasyon şemalarını

ele almaktır, ancak, bu teknikler, eICIC'e göre sınırlı bir başarıyı iyileştirmesine sahip olabilir [23]. Bu başarıyı bozulmasının etkisi, bulut RAN mimarisine sahip ağlardaki daha büyük bir CoMP koordinasyon alanı göz önüne alınarak en aza indirilebilir.

### **1.1.5.2 Çoklu Bağlantı**

Çoklu Bağlantı fonksiyonu, 5G mobil ağların zorlu gereksinimlerini karşılamak için gerekli anahtar bir etkinleştiricidir. 5G (NR), 4G (LTE) ve IEEE 802.11 (Wi-Fi) gibi farklı teknolojilere eş zamanlı bağlantı ve kümelenmeyi destekler. Sadece tek bir frekans bandına veya standart radyo erişim bağlantılara bağlı kalmayarak, makro ve küçük hücreler gibi çoklu ağ katmanlarına ve 6 GHz ve mmWave gibi çoklu radyo erişim teknolojisi (RAT) katmanlarına bağlanabilir. Bu son örnek, özellikle kapasitenin ve güvenilirliğin iyileştirilmesi için önem arz etmektedir. Ek olarak çoklu erişim 5G çekirdek ağlarının, mobil operatörlerin bugünkü yatırımlarından da faydalanmaya devam etmesini sağlayacaktır. Bunun gerçekleşmesi için, 5G sistemlerinin çoklu RAT'ları ve ağ katmanlarını tek bir sanal radyo erişim ağında sorunsuz bir şekilde birleştiren ağ mimarilerini ve protokollerini desteklemesi gereklidir. Yüksek bantgenişliği veya süreklilik gerektiren senaryolar birden çok aynı anda bağlantı gerektirir. Örneğin, yüksek bantgenişliği üretmek için 5G, LTE ve Wi-Fi gibi çeşitli erişim teknolojilerinden çoklu abonelikler ile eş zamanlı veri alma gereklidir. Bir kullanıcı 5G yüksek frekanslı küçük hücreye eriştikten sonra sürekliliği sağlamak için bir LTE ağ erişimine (makro-hücre) ihtiyaç duymaktadır. Ayrıntılı bilgi Kısım 1.1.3.1'de bulunabilir

### **1.1.5.3 Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA)**

Dikgen olmayan çoklu erişimin (NOMA) 5G heterojen ağları için düşük gecikme, yüksek güvenilirlik, yoğun bağlantı, geliştirilmiş adalet ve yüksek iş hacmindeki talepleri karşılamak için radyo erişim tekniklerinin tasarımı için önemli bir etkinleştirici olması beklenmektedir [24]. 2G'de (TDMA: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim), 3G'de (CDMA: Kod Bölmeli Çoklu Erişim) ve 4G (OFDMA: Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) sistemlerinde yeterince kullanılmayan güç alanından faydalanarak, hücreiçi çok kullanıcıyı çoğullayan bir tekniktir. NOMA'nın arkasındaki temel fikir, zaman, frekans, kod gibi aynı kaynak bloğunda kasıtlı bir şekilde dikgenliği bozarak birden fazla kul-

lanıcıya hizmet etmektedir [25].

Kullanıcı çoğullama çözümü, verici tarafındaki eşlenmiş kullanıcılar arasındaki büyük güç farkı ve alıcıda sıralı girişim giderimi yoluyla gerçekleştirilir. Çoklu kullanıcılar arasında kanal kazancı (ör., Yol kaybı ve alınan SINR) farklılığı, güç alanında büyük kanal kazancı farkı olan çok sayıda kullanıcının iletim sinyallerinin üst üste yerleştirilmesi yoluyla çoğullama kazanımlarına çevrilir. Güç paylaşımı, her bir kullanıcıya ayrılan gücü azaltmasına rağmen, hem yüksek hem de düşük kanal kazancı olan kullanıcılar, daha sık planlanma ve daha fazla bantgenişliği atanmasından yararlanırlar [26]. Sonuç olarak, hem sistem kapasitesi hem de kullanıcı adaleti geliştirilebilir. Dahası, NOMA daha fazla eşzamanlı bağlantı destekleyebilir ve bu da yoğun bağlantı problemlerini ele almak için uygundur.

Üst üste bindirme kodlaması (Superposition coding), tek taşıyıcılı aşağı yönlü NOMA uygulamasına bir örnek olarak verilebilir:

### **Tek Taşıyıcılı Aşağı Yönlü NOMA Uygulaması**

Aşağı yönlü bir kanalda NOMA kavramı bir baz istasyonu ve iki kullanıcının olduğu, alıcı ve vericinin birer antene sahip olduğu basit bir senaryoda anlatılmaktadır. Sistemdeki iletim bantgenişliği 1 Hz olarak düzgelenmektedir.  $E[\{x_i\}^2] = 1$  ve  $\sum_i P_i = P$  olmak üzere baz istasyon  $i = 1, 2$  için  $i$ 'inci kullanıcıya  $P_i$  iletim gücüyle  $x_i$  sinyali göndermektedir.  $x_1$  ve  $x_2$  sinyalleri

$$x = \sqrt{P_1}x_1 + \sqrt{P_2}x_2 \quad (1.1)$$

olacak şekilde üst üste bindirilir. Böylece  $i$ 'inci kullanıcının aldığı sinyal

$$y_i = h_i x + w_i \quad (1.2)$$

olarak ifade edilebilir, burada  $h_i$   $i$ 'inci kullanıcı ile baz istasyon arasındaki karmaşık kanal katsayısını,  $w_i$  ise eklenir beyaz Gauss gürültü ve (mevcutsa) hücrelerarası girişimin toplamını temsil etmektedir.  $w_i$ 'nin güç izgesel yoğunluğu  $N_{0,i}$  ile gösterilmektedir.

Aşağı yönlü NOMA'da, SIC (sıralı girişim giderimi, successive interference cancellation) işlemi kullanıcıda uygulanır. Kodçözümü için eniyi sıralama, gürültü ve hücrelerarası girişim gücü ile düzgelenmiş kanal kazancının ( $|h_i|^2/N_{0,i}$ ) azalan sıralamasıdır. Bu sıraya bağlı olarak, herhangi bir kullanıcının kodçözümü sırasının ilgili kullanıcıdan önce gelen diğer kullanıcıların sinyallerini doğru şekilde çözebileceği varsayılmaktadır. Böylece,  $i$ 'inci kullanıcı, ( $|h_j|^2/N_{0,j} < |h_i|^2/N_{0,i}$ ) için diğer  $j$ 'inci kullanıcılardan gelen girişimi giderebilir.

İki kullanıcı olan durumda, ( $|h_1|^2/N_{0,1} > |h_2|^2/N_{0,2}$ ) varsayılınsın, böylece birinci kullanıcı, ikinci kullanıcının kodçözemediği herhangi bir veriyi kodçözebilir. Daha sonra, ikinci kullanıcı,  $x_1$ 'e gürültü olarak davranır ve verisini aldığı  $y_2$  sinyalinden çıkarır. Son olarak, birinci kullanıcı SIC işlemini gerçekleştirir;  $x_2$ 'yi kodçözer ve ikinci kullanıcının sinyalini  $y_1$ 'den çıkartır ve kendi verisini çözer. Böylece, başarılı bir kodçözümü ve hata yayılımının olmadığı varsayıldığında, kullanıcıların veri hızları

$$r_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1|h_1|^2}{N_{0,1}} \right) \quad (1.3)$$

$$r_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{P_2|h_2|^2}{P_1|h_2|^2 + N_{0,2}} \right) \quad (1.4)$$

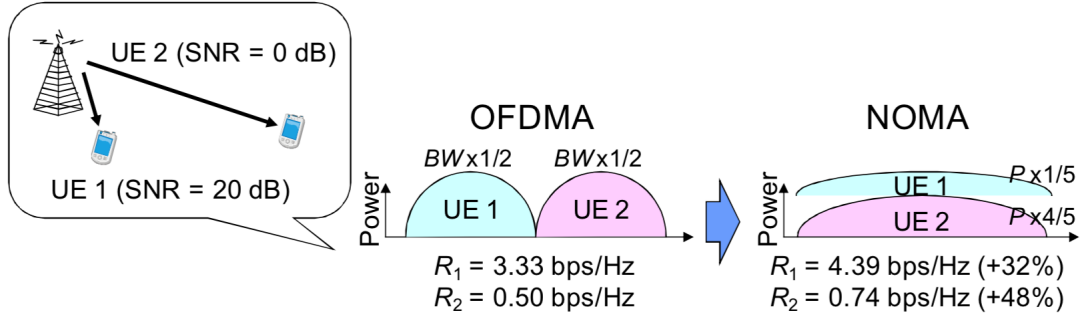
olarak bulunur. Buradan, güç tahsisinin kullanıcıların servis kalitesi açısından ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Güç tahsisi oranı ( $P_1/P_2$ ) ayarlanarak, her kullanıcının başarımı kontrol edilebilir. Açıkçası, hücredeki toplam veri hızı, hücre kenarındaki kullanıcıların servis kalitesi ve adaleti benimsenen güç tahsisi tasarısı ile yakından ilişkilidir [27].

### OMA ile Başarım Karşılaştırması

Dikgen çoklu erişim yöntemi ile kullanıcı çoğullamasının yapıldığı durumda  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) bantgenişliği birinci kullanıcıya,  $\beta = 1 - \alpha$  ( $0 < \beta < 1$ ) bantgenişliği ise ikinci kullanıcıya ayrıldıysa varsayılırsa, kullanıcı veri hızları

$$r_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{P_1|h_1|^2}{\alpha N_{0,1}} \right) \quad (1.5)$$

$$r_2 = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{P_2|h_2|^2}{\beta N_{0,2}} \right) \quad (1.6)$$



Şekil 1.2. İki kullanıcı sistem için NOMA ve OMA başarımlarını karşılaştırması [1]

olarak bulunur. (NOMA için  $\alpha = \beta = 1$  olarak seçilmektedir.)

Kullanıcıların kanal kazançları arasındaki fark arttıkça, NOMA'nın OMA'ya göre başarımını artmaktadır. Örnek olarak, Şekil 1.2'de görüleceği üzere, iki kullanıcı için,  $|h_1|^2/N_{0,1}$  ve  $|h_2|^2/N_{0,2}$  sırasıyla 20 dB ve 0 dB olarak seçilmektedir. OMA'da kullanıcılara eşit bantgenişliği ve eşit iletim gücü tahsis edildiği durumda ( $\alpha = 0.5, P_1 = P_2 = 0.5P$ ), kullanıcı hızları Eşitlikler (1.5) ve (1.6)'dan  $r_1 = 3.33$  bps ve  $r_2 = 0.5$  bps olarak bulunur. Diğer tarafta, NOMA yöntemiyle  $P_1 = 0.2P$  ve  $P_2 = 0.8P$  olarak güç tahsisi yapıldığında, Eşitlikler (1.4) ve (1.3)'ten kullanıcı hızları sırasıyla  $r_1 = 4.39$  bps ve  $r_2 = 0.74$  bps olarak bulunur. NOMA yöntemi kullanıldığında OMA'ya göre kullanıcı veri hızları sırasıyla %32 ve %48 oranında ve dolayısıyla toplam veri hızı artmaktadır [1].

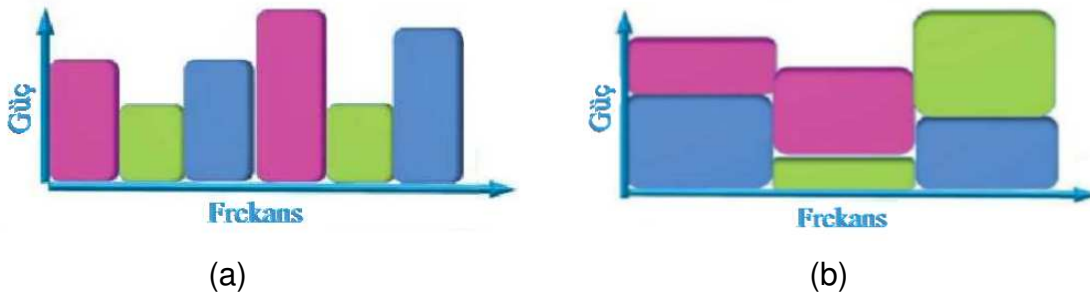
### Çok Taşıyıcılı NOMA

OFDMA'nın teknik açıdan olgunluğu göz önünde bulundurulduğunda, 5G ağlarına dahil edilecektir ve bu nedenle birden fazla OFDMA alt taşıyıcısının NOMA ile verimli bir şekilde nasıl bir araya getirilebileceği dikkat çekmektedir. Bu kısımda, çok taşıyıcılı NOMA'nın genel ilkesi tanıtılacaktır.

Çok taşıyıcılı NOMA, bir ağdaki kullanıcıların birden çok gruba ayrıldığı hibrit NOMA'nın farklı bir uygulaması olarak görülebilir. Özellikle, her gruptaki kullanıcılar NOMA prensibini izleyen aynı dikgen kaynak bloğunda sunulur ve farklı gruplar farklı dikgen kaynak bloklarına tahsis edilir. Hibrit NOMA sistem karmaşıklığını azaltmak için önerilmektedir. Ağdaki tüm kullanıcıları bir dikgen kaynak bloğunda bulunacak şekilde tek bir gruba atayarak NOMA'nın uygulanması oldukça zordur, çünkü en iyi

kanal koşullarına sahip olan kullanıcı kendi mesajlarının kodunu çözmeden önce diğer tüm kullanıcıların mesajlarının kodunu çözmelidir ki bu da yüksek karmaşıklık ve yüksek kodçözümü gecikmesiyle sonuçlanır. Hibrit NOMA, sistem performansı ve karmaşıklık arasında bir ödünleşim oluşturmaktadır. Çok taşıyıcılı NOMA'da, hücredeki kullanıcılar, karşılıklı olarak birbirinden ayrık olma zorunluluğu olmayan çoklu gruplara ayrılır. Bir gruptaki kullanıcılar aynı alt taşıyıcıya tahsis edilir ve grup içi girişim NOMA prensibi kullanılarak hafifletilir.

Farklı kullanıcı grupları arası girişim ise farklı alt taşıyıcıların kullanılması sebebiyle etkin bir şekilde giderilmektedir. Sonuç olarak, mevcut alt taşıyıcıların sayısından daha fazla kullanıcıyı desteklemek için gerekli olan ve yoğun bağlantıyı sağlamak için gerekli olan sistem, hibrit NOMA ve çeşitlemeleri ile gerçekleştirilebilir. Hibrit NOMA'nın diğer örneklerine kıyasla, çok taşıyıcılı NOMA'nın daha cazip olması beklenmektedir, çünkü OFDMA yönteminin de 5G ağlarında kullanılması muhtemeldir.



Şekil 1.3. (a) Dikgen Çoklu Erişim (OMA), (b) Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (NOMA)

### 1.1.6 Yeşil Radyo

Mobil abone sayısındaki dünya çapındaki büyüme, daha yüksek veri hızına sahip mobil genişbanda geçiş ve bilgi teknolojisinin dünyanın genel enerji tüketimine olan katkısı gün geçtikçe artmaktadır. Çevresel ve ekonomik endişeler radyo erişim ağlarının enerji gereksinimlerinin azaltılmasına dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir [28]. Enerji tüketiminin artması,  $CO_2$  emiliminin de artmasına neden olmaktadır ki bu da deniz seviyesinin yükselmesine, global bir şekilde ve birçok büyük şehirde hava kirliliğinin şiddetinin artmasına sebep olacaktır [29]. 2012 yılında, ICT (Information and Communication Technology) endüstrisinin yıllık ortalama güç tüketimi 200 GW'ı geçmektedir, ve bunun %25'ini haberleşme sektörünün altyapısı ve cihazları



kullanmaktadır. Enerji verimliliği, 4G standardizasyonuna yetişememiş olsa da, yeni nesil kablosuz haberleşme protokolleri ile güçlendirilmiş bilgi ve haberleşme sektörünün toplam endüstriyel  $CO_2$  gazı emisyonununun 2020 yılına kadar %15 azaltılması beklenmektedir, ki bu yıl başına 1380 milyar TL kazanca denk gelmektedir [30].

Operatörlerin bakış açısıyla, enerji tüketimini azaltmak, düşük işletme harcamaları (OPEX) maliyetlerine de dönüşecektir. Kablosuz hücresel ağlar için karbon emisyonlarını ve OPEX'i azaltmak, Yeşil Radyo programının geliştirilmesinin ardındaki iki temel nedendir. Enerji verimliliği 5G ağları için önemli bir başarımlar kriteri (KPI) olacaktır ve yeşil radyo programı [5], [31], kablosuz haberleşme ağları için mevcut tasarımlara göre güç tüketiminde yüz kat azalma sağlama isteğini belirtmektedir. Bu zorluk, ağ kullanıcılarının kullandığı hizmet kalitesinden (QoS) önemli ölçüde ödün vermeden bu indirgemeyi gerçekleştirme gereği ile belirgin olmayan bir hale gelmektedir. Başarıyı anlamlı bir şekilde ölçmek için, uygun enerji tüketimi ölçümleri uygulanmalıdır.

Enerji tasarrufu birkaç farklı perspektiften takip edilebilir. Birincisi, baz istasyonlarda bulunan antenler ve güç yükselteci gibi RF bileşenlerin güç verimliliği artırabilir. İkincisi ağdaki enerji tüketimini azaltmak için radyo erişim ağlarında C-RAN gibi farklı ağ mimarilerini incelemektir. Bir diğer yaklaşım ise ağdaki enerji tüketimini azaltmak için baz istasyonlarında veya el cihazlarında harcanan hesaplama gibi gibi sinyal iletimi dışında tüketilen enerjiyi de dikkate alan farklı RRM, IM teknolojileri ve algoritmaları geliştirmektir. Özellikle, yoğun MIMO ve milimetre-dalga teknolojilerinin, iletim hızını iyileştirmeye ve 5G mobil haberleşme sistemlerinin iletim gücünü azaltmaya yönelik olarak konuşlandırılması beklenmektedir [32].

Öte yandan, D-RAN mimarisinde, özellikle küçük hücreli baz istasyonlarında beklenen ağır trafiği işlemek için daha fazla hesaplama gücü gerekecektir. Bu koşullar altında, 5G heterojen ağları için enerji verimliliğinin eniyileştirilmesi amacıyla hesaplama ve iletim gücü arasında oluşacak ödünleşimin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Geleneksel enerji verimliliği değerlendirmesinde BS'lerin hesaplama gücü genellikle iletim gücüne kıyasla daha düşüktür ve belirli sayılara sabitlenmektedir [33], [34]. Genel olarak enerji verimliliği araştırması, BS'lerde iletim gücünün eniyilenmesine odaklanmaktadır. Hücresel şebekelerde küçük hücre

BS'ler çok yoğun bir şekilde konuşlandırıldığında, hesaplama gücünün iletim gücüne kıyasla daha yüksek olacağı senaryolar olacaktır [35].

BS'ler için hesaplama ve iletim gücünün etkilerini değerlendirmek için, toplam BS güç tüketiminin daha ayrıntılı olarak analiz edilmesi gerekir.

#### **1.1.6.1 BS Güç Tüketimi**

BS güç tüketim modeli, bileşenleri ve sistem seviyeleri arasındaki arabirimi oluşturur, bu da belirli bileşenlerde enerji tasarrufunun şebeke seviyesinde enerji verimliliğini nasıl artırdığının ölçülmesini sağlar. Uygulanan bileşenlerin özellikleri, çıkış gücü, boyutu ve maliyetindeki kısıtlamalar nedeniyle büyük ölçüde BS tipine bağlıdır. Bu heterojen özellikler, her bir BS tipine göre bir güç modeli zorunlu kılar.

Baz istasyonları (makro, mikro, piko ve femto) her biri tek anten kullanan çoklu verici-alıcılardan (TRX) oluşmaktadır, ve her verici-alıcı yapısı güç yükselteci, RF bileşeni, küçük-sinyal TRX parçası, temelbant motoru, DC-DC güç sağlayıcısı, soğutucu, şehir şebekesine bağlanmak için AC-DC birimine sahiptir.

#### **BS Güç Tüketimi Çeşitleri**

Baz istasyonların fonksiyonları ve mimarileri göz önünde bulundurulduğunda, BS'lerde güç tüketimi genel olarak üç tipe ayrılır: iletim gücü, hesaplama gücü ve ek güç, aşağıda özetlenmektedir:

**İletim gücü:** Kablosuz sinyal değişimini gerçekleştiren güç yükselteci ve RF zincirleri tarafından kullanılan enerjiye karşılık gelir. Ayrıca, besleyicideki güç tüketimi iletim gücünün bir parçası olarak dahil edilmektedir.

**Hesaplama Gücü:** BBU'larda, sayısal sinyal işleme fonksiyonlarıyla, BS için yönetim ve kontrol fonksiyonlarıyla, çekirdek ağ ve BS'ler arasındaki haberleşme fonksiyonlarıyla tüketilen enerjiyi temsil eder.

**Ek Güç:** İletim ve hesaplama gücü hariç, BS'lerin çalışmasını sürdürebilmesi için harcanan güç gösterir. Örnek olarak, aktif soğutma için harcanan güç, güç şebekesinden ana kaynağa geçişte kaybolan güç verilebilir.

## Doğrusal Güç Tüketimi Modeli

Baz istasyonların mimarileri ve işlevleri göz önüne alınarak EARTH projesinde baz istasyonların güç tüketimleri için, iletim gücüne ek olarak, hesaplama gücü ve istasyonun çalışmaya devam edebilmesi için tüketilen ek güçleri de içeren bir BS güç modeli önerilmektedir [36]. RF çıkış gücü ile BS güç tüketimi arasında bulunan doğrusala yakın ilişki dolayısıyla,

$$P_{in} = \begin{cases} N_{trx} (P_C + \Delta_p P_{out}) & , 0 < P_{out} \leq P_{max} \\ N_{trx} P_{uyku} & , P_{out} = 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

doğrusal modeli oluşturulmuştur. Burada  $P_{in}$  toplam güç tüketimini,  $P_C$  erişim noktalarının iletim yapmadığı andaki güç tüketimini,  $P_{out} \in (0, P_{max}]$  iletim gücünü,  $\Delta_p$  ise yüke bağlı güç tüketiminin eğimini,  $N_{trx}$  alıcı-verici cihaz sayısını,  $P_{uyku}$  ise erişim noktasının uyku modundaki güç tüketimini temsil etmektedir. Doğrusal güç modelinin parametreleri en küçük kareler eğrisi uydurma yöntemi kullanılarak elde edilmektedir ve Çizelge 1.2'de verilmektedir.

Çizelge 1.2. Farklı BS çeşitleri için güç modeli parametreleri

BS Çeşidi	$N_{TRX}$	$P_{max}[W]$	$P_C[W]$	$\Delta_p$	$P_{sleep}[W]$
Makro	6	20.0	130.0	4.7	75.0
RRH	6	20.0	84.0	2.8	56.0
Mikro	2	6.3	56.0	2.6	39.0
Piko	2	0.13	6.8	4.0	4.3
Femto	2	0.05	4.8	8.0	2.9

## 1.2 İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda, özellikle kullanıcıların yoğun olduğu bölgelerde kapasite artırmak için yeni baz istasyonu, pico- ve femto-hücreler kurulmaktadır. Bu ise özellikle hücre sınırlarına yakın kullanıcılarda hücreler arası girişimin etkilerini artırmaktadır. Bu sebeple, yeni nesil ağlar hücreler arası girişimden çok fazla etkilenmekte ve günümüzde hücreler arası girişimi azaltmak için pek çok araştırma yapılmış ve hala yapılmaktadır [37], [38], [39].

Fiziksel katman CoMP tekniklerine örnek olarak çok hücreli hücreme oluşturma ve

önkodlama [40], [41]; ayrıca MAC katmanına örnek olarak, koordineli kullanıcı zamanlaması ve güç kontrolü [42] verilebilir. CoMP sistemlerinde genel olarak kullanıcı terminalleri kanal bilgilerinin baz istasyonları tarafından bilindiği kabul edilir. Ayrıca baz istasyonu koordinasyonun mükemmel ve baz istasyonu omurga bağlantılarının gecikmesiz ve hatasız olduğu varsayılır. Bu yaklaşımlar tasarımı basitleştirse de pratikte, özellikle baz istasyonu sayısı arttıkça uygulanması zordur. Bu tür problemlerle başa çıkmak için topak tabanlı baz istasyonu koordinasyon biçimleri önerilmiştir [43], [44]. CoMP teknikleri ana omurgada ağır bir data yüküne, gecikme ve hata kısıtlarına sahip olmakla birlikte; ortaya koydukları erişilebilir veri hızlarındaki artış hem nümerik [45] hem de analitik [46] olarak ortaya konmuştur.

Bu tezde; ilk olarak özellikle dağıtılmış antenlere sahip (distributed antenna system, DAS) hücresel ağlardaki girişim etkilerinin CoMP teknikleri kullanılarak azaltılması üzerinde çalışılmaktadır. Dağıtılmış anten sistemleri ilk olarak kapalı alanlarda kullanılmak için önerilmiştir [47], [48]. Sadece yükseltici ve antenden oluşan (herhangi veri işleme vb. özelliği bünyesinde barındırmayan) bir yapıya sahip olan bu antenler, hızlı bir bağlantı biçimiyle (örn., fiber optik) vericiye (baz istasyonuna) bağlanmış ve esas olarak vericiyi kullanıcıya yakınlaştırarak yol kaybı azaltılması için kullanılmıştır. Dağıtılmış anten sistemlerindeki ilk çalışmalar daha çok CDMA tabanlı sistemler üzerine yapılmıştır [49], [50]. Bu çalışmalarda dağıtılmış anten sistemlerinin daha düşük güçlerde sistem kapasitesini artırdığı gösterilmiştir. Daha sonra ise dağıtılmış anten sistemlerine sahip bir MIMO sisteminin klasik bir MIMO sistemine göre daha yüksek kapasiteye sahip olduğu gösterilmiştir [51]. Performanstaki artış teorik olarak gösterilmesine rağmen gönderim ve güç paylaşım teknikleri üzerinde geçmişte pek çalışılmamıştır. Yakın zamanda RRH'lerin koordineli çalışması ve kaynak kullanımı konularında yeni çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [52], [53]. Çoklu ve dağıtılmış anten sistemlerinin getirdiği faydalara rağmen, bu RRH'lerin yanlış ve uygun olmayan seçimleri performans düşüşüne neden olabilir. Antenler arasında koordinasyonun olmadığı dağıtılmış anten sistemleri üzerine bir çalışma [54]'te bulunabilir. Bu çalışmadan sonra anten ağırlıklarının kanal katsayılarının fazına uyumlu seçildiği ve tek anten ve tüm anten gönderim şekillerinin incelendiği bir çalışma da [55]'te bulunabilir. Bu çalışmalardan sonra, eğer gönderim yapacak antenler koordineli bir biçimde seçilirse elde edilecek sonucun, tek anten iletimi ve tüm antenlerden iletim

sonuçlarından daha iyi olduğu gösterilmiştir [56].

Bu problem yakından incelendiğinde Karışık Tamsayı Programlama (Mixed Integer Programming) problemi [57] olduğu görülür. Problem, doğası gereği NP-hard'dır [58] ve çok basit senaryolar dışında çözümün karmaşıklığı pratik olmaktan çok öteye geçebilmektedir. [56]'te problemin çözümü için iki aşamalı bir yöntem önerilmiştir. Birinci aşamada [55]'da yazarların sunduğu, girişim gücü sabitken SINR enbüyülten anten katsayısının fazının RRH-kullanıcı kanal katsayısının fazına eşlenmesi çözümüne dayanarak en uygun anten ağırlıkları bulunmakta, daha sonra Positive Yarı-Belirleyici Gevşetme (Pozitif Semidefinite Relaxation) yöntemi ile RRH'lerin hangilerinin açık hangilerinin kapalı olacağı bulunmaktadır. İkinci aşamada ise RRH'lerin açık olma bilgisi kullanılarak en küçük SINR'ı enbüyültecek anten ağırlıkları hesaplanmaktadır. Benzetimler yoluyla, bu yöntemin basit ancak kaba kuvvet taramaya yakın değerler verdiği gösterilmiştir. Gevşetilerek basitleştirilmiş problem, CVX en iyileştirme aracı [59] ile çözülmüştür.

[60]'da, aşağı yönlü çok kullanıcılı dağıtık anten sisteminde, (DAS) kullanıcılar arasında adalet dikkate alınarak EE'yi enbüyülten, enerji verimliliği ile izgesel verimlilik (SE) arasındaki ilişkiye dikkat çeken çok kriterli bir eniyileştirme problemi incelenmiştir. Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi (weighted sum method) kullanılarak çok kriterli eniyileştirme problemi daha basit tek kriterli eniyileştirme problemine dönüştürülmüş; sonrasında EE ile SE arasındaki ödünleşimi dengeleyecek şekilde güç tahsisi yapan bir algoritma önerilmiştir. [61]'de yine dağıtık anten sisteminde aşağı yönlü çok kullanıcılı OFDM sisteminde adil ve enerji verimli kaynak tahsisi problemi incelenmiştir. Problemin iç-bükey olmaması ile eniyi çözüme ulaşmanın zorluğundan dolayı eniyiye yakın bir çözüme götüren az karmaşıklığa sahip bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritmada, öncelikle alt taşıyıcılara eşit güç tahsisi yapıldığı kabul edilmiş, daha sonra kesirli bir forma sahip içbükey olmayan eniyileştirme problemi, eksiltici (subtractive) bir forma dönüştürülmüştür. Ardından enerji verimliliğini enbüyültecek şekilde kaynak tahsisi yapılmıştır. Enerji verimli yapılar, EE metriği ve enerji koruyan yöntemler hakkında daha detaylı incelemeler [62] ve [63]'te bulunabilir.

5G ve ötesi sistemlerinde NOMA'nın olası uygulamalarının belirlenmesi için son yıllarda çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle NOMA'nın klasik sistemlerde ve

çok kullanıcılı aşağı yönlü MIMO sistemlerde kullanımı ile ilgili önemli çalışmalar bulunmaktadır; ancak henüz çok hücreli sistemlerde ve CoMP sistemleriyle birlikte kullanılması ile ilgili çok fazla araştırma yapılmamıştır. Bu konularla ilgili ve tez çalışmasıyla yakınlığı olan çeşitli çalışmalar aşağıda verilmektedir.

### 1.2.1 Klasik Sistemlerde NOMA

Temel NOMA kavramı, aşağı yönlü iletimi için başlangıçta [1], [64] ve [65]'te kullanılmıştır. [1]'de çok kullanıcılı güç tahsisi ve kullanıcı zamanlama tasarıları, SIC'de hata yayılımı, kullanıcı hareketliliği ve NOMA'nın MIMO ile kombinasyonu gibi, NOMA sistemlerinin çeşitli pratik zorlukları tartışılmıştır. [64]'te sistem düzeyinde ve bağlantı düzeyinde benzetimler ile, NOMA'nın sistem başarımı ve bireysel kullanıcı başarımı açısından OMA'dan üstünlüğü gösterilmiştir. [65]'teki yazarlar, UE terminallerinde BS ve SIC tabanlı sinyal alımında güç alanında kullanıcı çoğullamasını önermişlerdir. Bu yöntemle geliştirilmiş izgesel verimlilik sunulmasıyla birlikte, karmaşıklık kullanıcı sayısı ile artmaktadır.

Statik güç tahsisleri düşünülerek, ergodik toplam veri hızı ve servis kesilme olasılığı için kapalı biçim ifadeleri elde edilmiştir [24]. İki kullanıcılı NOMA sistemi için kullanıcı eşlemenin etkisi [66]'da incelenmiştir. Yazarlar NOMA kullanıcıları arasında iletim güçlerini statik olarak ayırarak sabit ve fırsatçı kullanıcı eşleme tasarıları önermişlerdir. Öte yandan, güç tahsisinin aşağı yönlü NOMA'nın adaletliliği üzerindeki etkisi, mükemmel ve ortalama kanal durumu bilgisi geri bildirimleri göz önünde bulundurularak [67]'de incelenmiştir. [68]'de, işbirlikçi NOMA sistemi ile zayıf kanala sahip kullanıcıların işbirlikçi veri iletimi için güçlü kanala sahip kullanıcılarla eşlenmesi çalışılmıştır.

Aşağı yönlü çok kullanıcılı MIMO sistemlerinde NOMA'nın kullanılması ile ilgili önemli derecede çalışmalar mevcuttur. Bunlardan MIMO-NOMA kombinasyonunun temelleri [1]'de incelenmiştir, burada tek antenli alıcı ve iki antenli BS ile  $2 \times 2$  MIMO sisteminde hüzmeliçimlendirme çalışılmıştır. Vericide sabit güç tahsisi stratejileri, alıcıda ise iki aşamalı girişim giderimi yöntemi uygulanmıştır. hüzmeler arası girişim, ilk aşamada girişim reddetme birleştirmesi (interference rejection combining, IRC), ikinci aşamada ise SIC kullanılmıştır. [69]'da tek antene sahip çok kullanıcılı

aşağı yönlü MIMO-NOMA sisteminde, çok kullanıcılı sıfıra zorlama hüzme oluşturma (zero-forcing beamforming, ZFBF) çalışılmıştır. Bu çalışmada, kullanıcılar, kanal kazancı ilintilerine göre sadece iki kullanıcıdan oluşacak şekilde gruplara ayrılmıştır. Bir başka çalışmada, MIMO-NOMA sisteminde, kullanıcılardaki alıcı anten sayısının, BS'lerdeki verici anten sayısından az olmadığı kabul edilerek, kullanıcıların servis kesilme olasılıklarının hesaplanmıştır [70].  $3 \times 3$ 'lük MIMO-NOMA sisteminde, sabit güç tahsisi ile benzetimler yapılmış ve önkodlama ve kodçözücü matrisler önerilmiştir. [71]'de, iki kullanıcılı aşağı yönlü MIMO-NOMA sisteminde, BS ve kullanıcıda eşit anten olduğu kabul edilerek, dışbükey olmayan güç tahsisi problemi formüle edilmiş, hem eniyi hem de eniyeye yakın çözümler önerilmiştir.

Diğer taraftan, yukarı bağlantı iletimleri için, NOMA ilk olarak [72]'de incelenmiştir, burada güç kontrolü UE vericisinde uygulanmış ve BS alıcısında enküçük ortalama kareler kestirimi (MMSE) tabanlı SIC kodçözümü kullanılmıştır. Ortak bir alttaşıyıcı ve güç tahsisi problemi [73]'te incelenmiş, bir NOMA topağının toplam veri hızını enbüyütülmesi için eniyeye yakın bir çözüm önerilmiştir. [74]'te iki kullanıcılı bir uplink NOMA sistemi için, farklı kullanıcıların statik güçleri olduğu varsayılarak, toplam veri hızı ve servis kesilme olasılığı için kapalı form ifadeleri türetilmiştir. Ayrıca sonuçlar, TDMA tabanlı OMA sistemi ile karşılaştırılmış ve her bir NOMA kullanıcısı için uygun bir hedef veri hızı seçimi yapılmadığında bir kullanıcının her zaman servis kesintisine uğrayabileceği sonucuna varılmıştır. Bu sonuç, [24]'te aşağı yönlü NOMA için de belirtilmiştir.

[75]'te aşağı yönlü heterojen ağlarda izge tahsisi ve güç kontrolü ortak problemi oluşturulmuştur, burada, izge tahsisi için çoktan-bire (many-to-one) eşleme oyunundan faydalanılmış, güç kontrolü için ise dışbükey olmayan eniyileme problemi oluşturulmuştur. [76]'da aşağı yönlü çok hücreli ağda, belirli veri hızı kısıtı altında, birkaç BS üzerinden toplam iletim gücünün enküçültülmesi için dağıtık eniyileme problemi ele alınmıştır. [77]'de yoğun MIMO sistemlerinin kullanıldığı makro-hücreden ve NOMA'nın kullanıldığı küçük-hücrelerden oluşan heterojen ağlar için kapsama olasılığı türetilmiştir.

## 1.2.2 Aşağı Yönlü CoMP Sistemlerinde NOMA

NOMA ve CoMP sistemleri ayrı ayrı incelenmiş olsa da, NOMA tasarısı ile CoMP ağlarının birleştirilmesi üzerine yeteri kadar çalışma yapılmamıştır. CoMP ağlarında dikgen erişim teknikleri kullanıldığında, taşıyıcı, kötü kanal koşullarına sahip kullanıcının varlığında, bu kullanıcılara tahsis edilmektedir. Bu yüzden kötü kanallara sahip kullanıcı sayısı arttığında, izgesel verimlilik düşmeye devam etmektedir. Bu problemin çözümü için, [78]'de NOMA tasarısı, iki hücreli CoMP ağlarında kullanılması önerilmiş (NOMA-CoMP olarak adlandırılmaktadır), bu sayede tek taşıyıcılı aşağı yönlü kanalda CoMP'un etkinliği artırılmıştır. Bu çalışmada dikgen olmayan tasarı için, BS'e yakın bir kullanıcı ile kötü kanal koşullarına sahip kullanıcı gruplandırılmış, ve üst üste bindirme (superposition coding [79]) uygulanmıştır. Hücre kenarı kullanıcısı için iki BS'te, herhangi kanal durum bilgisi değişimi gerektirmeyecek şekilde Alamouti kodlama [80] kullanılmıştır. NOMA tasarısı için toplam veri hızı başarımları türetilerek izgesel verimliliğin artırıldığı gösterilmektedir.

[81]'de CoMP ağlarında kullanıcılararası girişimin üstesinden gelebilmek için, fırsatçı NOMA tasarısı (opportunistic NOMA, ONOMA) ile farklı topaklardaki kullanıcılar arasında bir zamanlama yapılarak karmaşıklık düşürülmektedir. Burada her kullanıcı için öncelikli AP'lerden oluşan kümeler, kanal koşullarına göre belirlenmektedir. Her AP, bir ONOMA hücresi olarak kabul edilmektedir. İlgili kullanıcıya kendi ONOMA hücreleri kümesinden gelen girişimin SIC ile giderildiği varsayılarak, diğer ONOMA hücrelerinden girişime maruz kaldığı kabul edilmiştir. Kullanıcıların bir ONOMA hücresinden sinyal aldığı veya CoMP uygulanarak birkaç ONOMA hücresinden sinyal alabildiği iki ayrı durum incelenmiştir. Güç dağılımı ise her kullanıcının ONOMA kümesinin büyüklüğü ile, ve dolayısıyla kanal kazançları ile belirlenmektedir. ONOMA tasarısı ile bu çalışmada, tek antenli iki AP ve beş kullanıcıdan oluşan sistemde, ONOMA topolojisinde toplam veri hızı ve servis kesinti olasılığı numerik olarak hesaplanmış, ve klasik JT-NOMA CoMP sistemlerine göre kazançları gösterilmiştir.

[82]'de koordine edilmiş NOMA (CO-NOMA, coordinated NOMA) tasarısı CoMP ağlarında çalışılmıştır. Yazarlar, aşağı yönlü senaryoda, doğrusal karmaşıklığa sahip eniyeye yakın bir zamanlama stratejisi önermişler ve diğer tasarılarla karşılaştırmış-



lardır. Güç ve frekans kaynak tahsisi, periyodik zamanlama aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Klasik dikgen tasarımlardan, dikgen olmayan ve koordineli (CoMP) tasarımlar için incelemeler yapılmıştır. İletim gücü RB'ler üzerinde eşit şekilde dağıtılmıştır. NOMA ağlarında güç tahsisi için [64]'teki sabit ve oranlı güç tahsisi, [83]'teki kullanıcı çifti güç tahsisi ve [84]'teki ağaç araması güç tahsisi yöntemleri önerilmiştir. Bu çalışmada ise koordine edilmemiş (sadece) NOMA ağlarında, bir RB üzerinden birden fazla kullanıcı çoğullanmıştır. Ancak bant içindeki girişimin etkisiyle güç tahsisi probleminde oluşan karmaşıklık sebebiyle [83]'teki kullanıcı çiftleri oluşturulmakta ve bu iki kullanıcı için güç tahsisi algoritması kullanılarak eniyiye yakın çözüm elde edilmektedir. Burada maliyet işlevini enbüyüten ve kendi SINR kısıtını sağlayan en iyi iki kullanıcı seçilir. Bu işlem kullanıcıların metriklerini ve SINR değerlerini karşılaştırarak doğrusal karmaşıklıkla yapılabilmektedir. Ancak bu iki kullanıcı her zaman eşleştirememektedir, ve bu durumda, ilgili RB'deki bütün iletim gücü yüksek metriğe sahip kullanıcıya tahsis edilmektedir. Eşleştirme yapılabildiği durumlarda, eniyiye yakın bir çözüm elde edilebilmektedir. Farklı kullanıcı çiftleri için zamanlama yapılarak girişim giderilmektedir. Koordine edilmiş NOMA ağlarında (CoMP-NOMA), CoMP için [64]'teki oranlı güç tahsisi algoritması kullanılmıştır. CoMP uygulanabilmesi için 2 adet RRU'lu sistem düşünülmüştür ve farklı RRU'lardan ilgili kullanıcıya aynı gücün gönderildiği varsayılmıştır. Kullanıcı sayısına göre OMA, NOMA, CO-OMA ve CO-NOMA sistemlerinin başarımları karşılaştırılmıştır.

Ancak [78], [81] ve [82]'de bahsedilen NOMA-CoMP stratejileri, her kullanıcının CoMP ağındaki en az bir erişim noktasından sinyal aldığı varsayımına dayanmaktadır. [85]'teki çalışmada, bu varsayım ortadan kaldırılarak, kullanıcıların CoMP ağındaki AP'lerden sinyal almama durumunun olabildiği, çok katmanlı bir NOMA stratejisi önerilmektedir. Burada, CoMP ağındaki AP'lerden sinyal alan kullanıcılar, sinyal almayan kullanıcılara sinyalleri iletmektedirler, böylece kullanıcılar farklı katmanlara ayrılmaktadırlar. AP'lerden sinyal alan kullanıcılar birinci katmanda, ilk katman kullanıcılarının sinyal gönderdiği kullanıcılar ikinci katman kullanıcıları olarak gruplandırılmakta, ve böylece devam etmektedir. Bu çalışmanın esas katkıları, kullanıcıları kanal durumlarına göre farklı katmanlara ayırarak, CoMP ağlarında zamanlama stratejileri üreterek kullanıcıların kapsamasını artırmak olarak özetlenebilir. AP'lerle aralarında kötü kanallara sahip kullanıcıların varlığında, çift katmanlı NOMA-CoMP

ağlarında servis kesinti olasılığı ve toplam veri hızı başarımları türetilmiştir. Güç tahsisinin [81]'deki gibi kullanıcıların AP kümelerinin büyüklüklerine bağlı olarak yapıldığı, iki AP'li ve üç kullanıcıli senaryonun başarımları hesaplanarak tek-katmanlı duruma göre avantajları gösterilmektedir. Ayrıca, aşağı yönlü çok hücreli NOMA uygulamalarının anlatıldığı [86]'da de yazarlar, CoMP ile birden fazla AP'den sinyal alan tek bir kullanıcı ile CoMP sistemine dahil olmayan başka bir kullanıcı ile gruplandırılarak NOMA topaklarında başarımları incelenmiştir.

Ayrıca, aşağı yönlü hücreli NOMA ağlarında, koordine edilmiş hüzme oluşturma kullanılarak toplam veri hızı ve kaynak tahsisi eniyilemesi incelenmiştir [86]. [87]'de, hücreli aşağı yönlü NOMA'da toplam iletim gücü enküçültülmesi ve toplam veri hızı enbüyütülmesi için dinamik güç kontrolü kullanılmıştır. Burada yazarlar, homojen ağdaki hücrelerde CoMP iletişimini düşünmüşler ve her hücredeki NOMA topaklarının iki kullanıcıli olduğu kabul edilmiştir.

Aşağı yönlü çok hücreli homojen ve heterojen ağlarda CoMP-NOMA kavramı, sırasıyla [88] ve [89]'da çalışılmıştır. Yazarlar, her hücrede NOMA'nın kullanıldığı aşağı yönlü çok hücreli ağlarda dinamik güç tahsisi problemini ele almaktadır. Aynı zamanda, ciddi derecede hücrelerarası girişime (ICI) maruz kalan kullanıcıların başarımlarının iyileştirilmesi için birden fazla hücre arasında (CoMP) iletişimi kullanılmaktadır. Bu CoMP-NOMA çerçevesi altında, birden fazla BS ile farklı olmayan kanal kazancına sahip kullanıcılar için CoMP kullanılırken, belirli bir BS ile baskın kanal kazancına sahip kullanıcılar için CoMP kullanılmamaktadır. Bütün kullanıcılar için NOMA kullanılmaktadır. JT-CoMP-NOMA modeli için, enküçük veri hızı kısıtı altında toplam veri hızını enbüyüten ortak güç tahsisi problemi formüle edilmiş ve çoklu koordine edilmiş BS'lerden oluşan her bir CoMP kümesi için çözülmüştür. Ortak güç eniyileme yaklaşımının hesaplama karmaşıklığını azaltmak için, birbirinden bağımsız, her BS (hücre) için ayrı olan dağıtık güç eniyilemesi yaklaşımı önerilmiştir.

### **1.2.2.1 CoMP-NOMA Sistemlerinde Enerji Verimliliği**

5G sistemlerindeki önemli metriklerden biri olan enerji verimliliği (EE), son zamanlarda NOMA sistemlerinde de incelenmektedir [90], [91], [92]. [90]'da kanal durum bilgisinin bilindiği MIMO sistemlerde, NOMA kullanılmış ve EE enbüyütülmüştür.

[91]'de çok taşıyıcılı NOMA sistemlerinde, EE'nin enbüyütülmesi için bir kaynak ve güç tahsisi algoritması önerilmiştir. [92]'de kullanıcıların enküçük veri hızı kısıtı ile güç tahsisi ile EE eniyileştirilmiştir. Bütün bu çalışmalarda, NOMA'nın EE başarımının OMA'dan daha iyi olduğu gösterilmektedir. NOMA'da güç kontrolünün, kullanıcı veri hızları ve servis kesilme olasılığı üzerinde önemli etkileri vardır [24], [25], [74], [93].

[94]'teki çalışmada, bütün kullanıcılara bütün BS'ler tarafından sinyal gönderilmesi JT-NOMA olarak adlandırılmış; hesaplama karmaşıklığı ve SIC'ın hata yayılımı sebebiyle koordine edilmiş BS'lerin sadece hücre kenarı kullanıcılarına ortak iletim yaptığı kabul edilmiş ve yazarlar tarafından JTe-NOMA olarak adlandırılmıştır. Ayrıca [81]'deki çalışmadaki ideal durum tasarısına benzer şekilde, kanal durumlarına göre kullanıcıların bir BS seçtiği farklı bir tasarı da incelenmiştir. [78] ve [81]'de CoMP sistemleri statik güç tahsisi altında çalışılmıştır. [94]'te yazarlar, enküçük kullanıcı veri hızı ve BS iletim gücü kısıtları ile EE'nin enbüyütüldüğü dinamik güç tahsisi algoritması önermektedirler. Problemin çözümünde, kesirli (fractional) programlama ve DC (difference of convex, dışbükeylerin farkı) programlama kullanılmıştır, ve sonuçlar CoMP sistemlerinde OMA yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Yazarlar burada, hücrel sistemleri incelemekte, ancak hücrelerarası girişimi sıfır kabul etmektedirler.

### 1.3 TEZİN KATTIĞI DEĞERLER VE YENİLİKLER

Bu tezde yapılan çalışmalar JT-CoMP-NOMA etrafında dört ana başlık altında sınıflandırılabilir: Dağıtık anten sistemi (DAS) yapısı, Çoklu Bağlantı (MC), Farklı fiziksel mimari yapılar, RRM ve IM koordinasyon seviyeleri:

- Çok hücreli ağlarda JT-CoMP-NOMA kullanılmakta, literatürden farklı olarak
  - \* ağ modeline dağıtık anten sistemi (DAS) yapısı eklenmektedir.
  - \* farklı kullanıcılar bütün RB'leri aynı anda kullanabilmektedirler, yani, bir kullanıcı sadece bir NOMA topağında olmak zorunda değildir.
  - \* bir NOMA topağında kullanıcı eşlemesi veya gruplaması yapılmadan güç kontrolü yapılmaktadır.
  - \* veri hızı ve AP iletim gücü kısıtlarının yanında kullanıcılar arası adalet

kısıtı eklenmekte, karmaşık sinyal ve ağ modeli (ağır girişim altında) ile eniyileme problemi çözülmektedir.

\* çeşitli maliyet işlevleri incelenmektedir. Toplam veri hızının ve enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü farklı problemlerde güç ve kaynak tahsisi ortak olarak eniyilenmektedir. Ayrıca toplam veri hızının enbüyütülmesi ile toplam iletim gücünün enküçültülmesi arasında bir ödünleşim oluşturularak, sistemin çalışma bölgeleri incelenmektedir.

- DAS yapısının kullanıldığı heterojen ağlarda MC (Çoklu Bağlantı) fonksiyonunun katkısı hem NOMA hem OMA tasarılarında gözlemlenmektedir.
- Yukarıda bahsedilen çalışmalar, farklı fiziksel mimariler altında da incelenmektedir: (i) Bütün sistemin tek bir bulut mimari olarak düşünüldüğü ve ağ fonksiyonlarının merkezileştirildiği C-RAN, (ii) RRM gibi bazı ağ fonksiyonlarının merkezi tutulduğu, ancak bağlantırlık gibi bazı fonksiyonlarının dağıtık olarak kaldığı DD-RAN, (iii) bütün ağ fonksiyonlarının dağıtık olarak hücre kontrolörlere dağıtıldığı D-RAN mimarisi.
- C-RAN ve DD-RAN mimarilerinde merkezi RRM (cRRM) kullanılmakta, ancak D-RAN mimarisinde, doğası gereği, dağıtık RRM (dRRM) veya merkezi olmayan RRM (decRRM) kullanılması gerekmektedir. Dağıtık RRM için, her eniyileme sonucu hücre kontrolörleri arasında paylaşılmakta ve bir sonraki eniyilemede kullanılmaktadır, merkezi olmayan RRM'de hücreler arası herhangi bir bilgi paylaşımı yoktur. Farklı mimariler altında, farklı RRM koordinasyon seviyeleri ile başarımların farklıları incelenmektedir.

#### 1.4 TEZ KAPSAMI ve ORGANİZASYONU

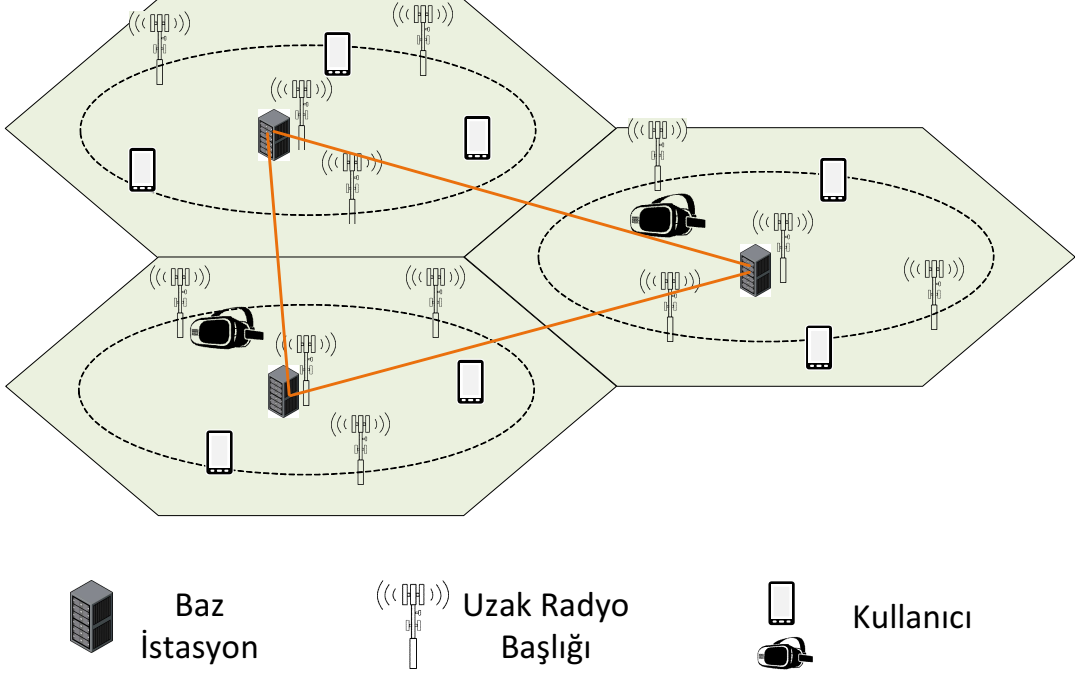
Bu tez kapsamında, gelecek nesil telsiz haberleşme sistemlerinde ön plana çıkan heterojen ağlarda RRM ve IM problemi ele alınmaktadır. İlk olarak, homojen ağlarda önceki kısımlarda bahsedilen makro erişim noktaları (RRH) tek tek ele alınarak problemin çözümü aranmakta, ilerleyen aşamalarda heterojen ağlarda farklı erişim noktalarının (RRH, femto-hücre, piko-hücre) bu yapılarla birlikte çalışabilirliği sorgulanmakta ve uygun RRM algoritmaları geliştirilmektedir. Basitten karmaşığa doğru

karmaşıklığı değişen senaryolarda ve uygun kısıtlar altında (örn., azami güç, adalet) RRM problemi irdelenmekte ve eniyi veya eniyeye yakın çözümler önerilmektedir. Bu algoritmalarda, 5G ve ötesinde kullanılması öngörülen, Kısım 1.1.5.3'de tanımlanan çok taşıyıcılı NOMA (dikgen olmayan çoklu erişim), Kısım 1.1.3.1'de anlatılan MC (çoklu-bağlantı), Kısım 1.1.5.1'de tanımlanan CoMP (koordine edilmiş haberleşme) gibi ağ fonksiyonlarının başarımları incelenmektedir. Heterojen yapıdaki senaryolarda özdeş olmayan erişim noktalarının aynı anda ve birlikte kullanılacak olması, homojen ağlar için geliştirilen mevcut RRM ve IM tekniklerinin heterojen ağlar için verimsiz çalışmasına sebep olmaktadır. CoMP ağlarında, NOMA'nın kullanılmasının getirdiği kazanç incelenmekte, heterojen ağlarda çoklu-bağlantının katkıları araştırılmaktadır. CoMP kullanılan heterojen ağlarda, başarımlar ve karmaşıklık ödünleşimi göz önüne alınarak NOMA ve/veya MC fonksiyonlarının tercihleri karşılaştırılmaktadır.

Yeni nesil haberleşme sistemlerinin temelini oluşturacak NFV yapısında, özellikle dikey sektörler dikkate alındığında, ağ dilimlendirme konsepti altında, kullanım amacına göre bazı fonksiyonlar merkezi bazı fonksiyonlar ise dağıtık olarak kullanılabilir olacaktır. Yukarıda belirtilen RRM, ICIC, NOMA, MC ve CoMP gibi ağ fonksiyonları hem merkezi hem de dağıtık olarak kullanılabilirlerdir. Bu bağlamda, Bölüm 2'de, bazı ağ fonksiyonlarının (örn., RRM, ICIC) merkezi olarak, bazılarının (örn., taşıyıcı tabanlı bağlantılık, CoMP) ise dağıtık olarak kullanıldığı DD-RAN (dinamik dağıtık RAN) mimarisinde cRRM (merkezi RRM) incelenmektedir. Bölüm 3'te, D-RAN mimarisi göz önüne alınmış, her hücrede RRM ve IM'in dağıtık (dRRM) ve merkezi olmayan (decRRM) bir şekilde yapıldığı durumlar incelenmektedir. Bununla birlikte, Bölüm 4'te, C-RAN (bulut RAN) mimarisi ile ağ fonksiyonlarının merkezi olarak kullanıldığı, merkezi sinyal işleme ve temelbant işlem havuzlaması ile kazanılan çeşitlenmeden faydalanan sistem mimarisi incelenmektedir.

Tez kapsamında başlangıçta [56]'da incelenen,  $M$  hücreden oluşan bir yapıda (topak), her hücrede baz istasyona yüksek hızlı bağlantı ile bağlı olan  $L$  tane özdeş uzak radyo başlığının (RRH) bulunduğu homojen ağ senaryosu ele alınmaktadır. RRH'lerden bir tanesi hücre merkezine, geri kalanları ise merkezden çevrel çemberin  $2/3$ 'ü kadar uzaklıkta birbiçimli olarak dağıtılmaktadır. Toplamda  $LM$  adet RRH

bulunmaktadır. Daha sonra, ağ modeli her hücrede farklı güç sınırlarına ve koordinasyon seviyelerine sahip olabilen  $L = L_r + L_f$  adet erişim noktası olacak şekilde heterojen senaryoya genelleştirilmektedir, burada  $L_r$  ve  $L_f$ , sırasıyla, hücre başına RRH ve LPN sayısını temsil etmektedir. Ayrıntılı sistem modeli Kısım 1.4.1'de anlatılmaktadır.



Şekil 1.4. DD-RAN mimarisinde, Uzak Radyo Başlıklarından Oluşan Dağıtık Anten Sistemi

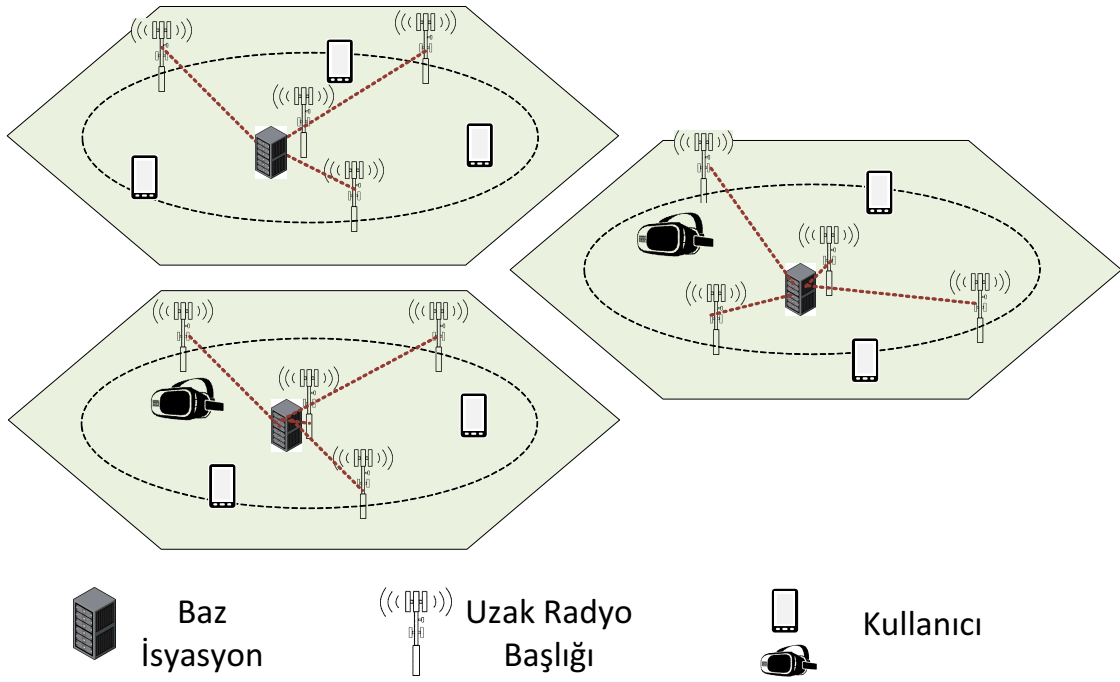
- Bölüm 2'de, Şekil 1.4'te gösterilen DD-RAN mimarisinde, basitten karmaşığa doğru çeşitli senaryolarda, farklı maliyet işlevleri için ve uygun kısıtlar altında (örn., azami güç, adalet) RRM problemleri irdelenmektedir.
  - \* Kısım 2.3.1.1'de sadece RRH'lerden oluşan homojen ağlarda, hücre başına tek kullanıcı (  $K = 1$  ) ve tek taşıyıcı (  $N = 1$  ) senaryo, topaktaki en düşük veri hızına sahip kullanıcının veri hızının enbüyütüldüğü, enküçük veri hızı kısıtı altında toplam veri hızının enbüyütüldüğü ve Jain adaletliliği kısıtı altında toplam veri hızının enbüyütüldüğü senaryolar incelenmektedir. Bu problemlerin hepsinde BS için azami güç kısıtları da mevcuttur.
  - \* Kısım 2.3.1.2'de sadece RRH'lerden oluşan homojen ağlarda, tek taşıyıcı; ama hücre başına çok kullanıcı (  $K \geq 1$  ) durum için aynı senaryolar

enküçük veri hızı, adalet ve BS iletim gücü kısıtları altında incelenmektedir. Tek taşıyıcılı senaryolar hem BBU'ların ya tam güçle çalıştığı ya da çalışmadığı BPM (İkili Güç Yönetimi, Binary Power Management) için hem de azami güç değerine kadar herhangi bir güç ile iletim yapabildiği CPM (Sürekli Güç Yönetimi, Continuous Power Management) için incelenmektedir.

\* Kısım 2.3.1.3'te sadece RRH'lerden oluşan homojen ağlarda, taşıyıcı sayısı da artırılarak ( $N \geq 1$ ) çok kullanıcıli sistemin veri hızı ve enerji verimliliği başarımları aynı kısıtlar altında incelenmektedir. Bununla birlikte harcanan iletim gücünün enküçültülmesi ile veri hızının enbüyütülmesi arasında bir ödünleşim kurularak çeşitli BS iletim gücü çalışma bölgelerinde enerji verimliliği eniyileştirilmektedir. Çok taşıyıcılı bu senaryoda NOMA'nın başarımlarının incelenebilmesi için ayrıca bir dikgen çoklu erişim yöntemi (OMA) tanıtılmaktadır. Önceki kısımlarda CPM tasarısının BPM'e göre üstünlüğü gösterilmektedir. Çok taşıyıcılı sistemde ise NOMA'nın getirdiği avantajlar üzerinde durulmaktadır. Karmaşıklığı artırmamak ve çok sayıda kullanıcıya daha rahat hizmet verilebilmesi amacıyla, çok taşıyıcılı sistemlerde sadece CPM tasarısı kullanılarak eniyileme problemi düzenlenmektedir.

\* Kısım 2.3.2.1'de çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı heterojen ağlarda enerji verimliliği başarımları yine aynı kısıtlar altında incelenmektedir. Bu kısımda, kullanıcıların aynı anda RRH'lere ve LPN'lere bağlanıp sinyal alabilmesine olanak sağlayan MC fonksiyonunun kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak farklı bir kısıt eklenmektedir. JT-CoMP ve MC fonksiyonları hücrelerdeki kaynak ve güç yönetimini gerçekleştiren kontrolörlere dağıtılmaktadır; bununla birlikte NOMA tekniğinin uygulanmasında aktif rol alan RRM fonksiyonu için merkezi birimin kararları geçerlidir.

- Bölüm 3'te, Şekil 1.5'te gösterilen D-RAN mimarisinde, çok kullanıcıli, çok taşıyıcılı ve çoklu hücre yapısına sahip topakta, CoMP, MC, RRM, ICIC gibi ağ fonksiyonları her hücre kontrolörüne dağıtılmaktadır ve her hücre kendi kararını almaktadır. Burada RRM iki ayrı koordinasyon seviyesinde incelenmektedir.

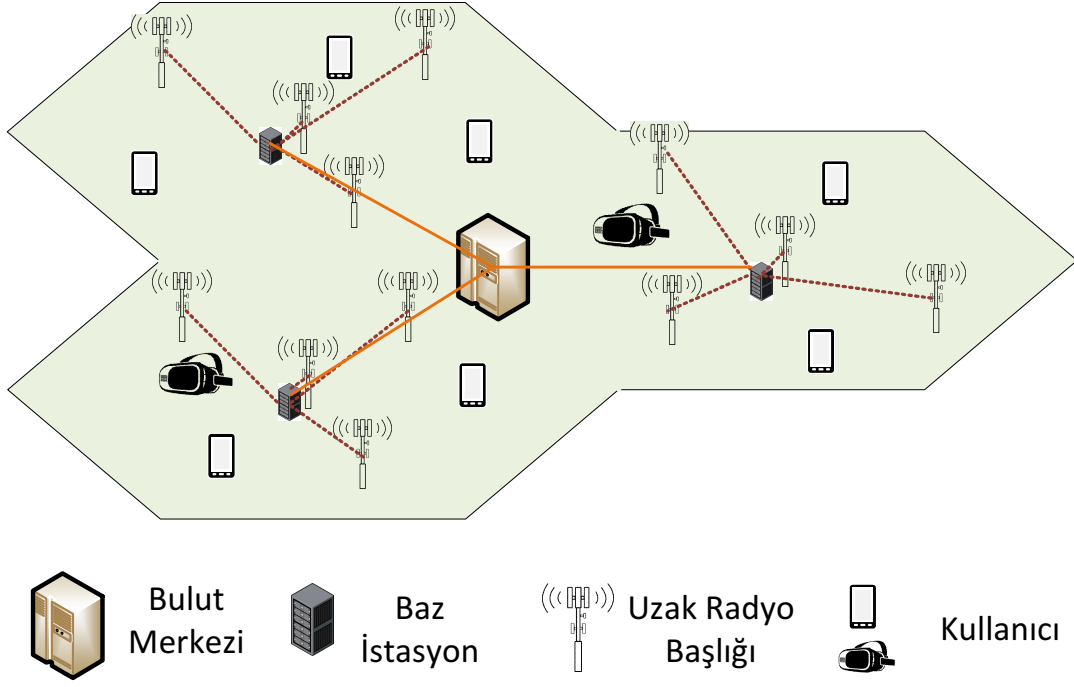


Şekil 1.5. D-RAN mimarisinde, Uzak Radyo Başlıklarından Oluşan Dağıtık Anten Sistemi

Birincisi, dağıtık RRM (dRRM), ağ eniyilemesinin yapıldığı bir önceki andaki komşu hücrelerden gelen girişim seviyelerine göre kendi başarımını eniyilemektedir, ve bu eniyileme sonucu bir sonraki adımda etkili olacaktır. Bir diğeri, merkezi olmayan RRM (decRRM), komşu hücre girişim seviyelerini hiç dikkate almaz, ve en kötü koşulları düşünerek sabit bir girişim değeri kabul ederek sistem eniyilemesi yapmaktadır. Bu bölümde adaletlilik, BS azami güç, enküçük veri hızı gibi kısıtlar altında, hem dRRM hem de decRRM için enerji verimliliği eniyileştirilmektedir.

- Bölüm 4'te, çok kullanıcılı, çok taşıyıcı ve çoklu hücre yapısına sahip topak Şekil 1.6'te gösterilen bir bulut (C-RAN) mimari olarak düşünülerek, cRRM uygulanmaktadır. Burada, dağıtık RAN mimarilerinin aksine, hücrelerdeki erişim noktaları, komşu hücrelerdeki kullanıcılara da sinyal gönderebilmektedir. CoMP ve MC fonksiyonları merkezileştirilmekte ve ağdaki bütün erişim noktaları arasında bir koordinasyon mevcuttur. Bu bölümde adaletlilik, BS azami güç, enküçük veri hızı gibi kısıtlar altında enerji verimliliği eniyileştirilmektedir.
- Bölüm 5'te, önceki bölümlerde incelenen farklı mimariler (DD-RAN, C-RAN ve D-RAN) farklı RRM koordinasyon seviyeleri (cRRM, dRRM ve decRRM) için





Şekil 1.6. C-RAN mimarisinde, Uzak Radyo Başlıklarından Oluşan Dağıtık Anten Sistemi

elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

- Bölüm 6'da tezde yapılan çalışmalar özetlenmekte ve bunlara ek olarak gelecekte yapılabilecek araştırmalara değinilmektedir.

Yukarıda anlatılan sistem eniyilemeleri için Kısım 1.4.1'de anlatılan ağ modeli kullanılmaktadır.

#### 1.4.1 Ağ Modeli

Tez kapsamında ilk olarak, [56]'da incelenen,  $M$  hücreden oluşan bir topakta, her hücrede baz istasyona yüksek hızlı bağlantı ile bağlı olan  $L$  tane özdeş uzak radyo başlığının (RRH) bulunduğu homojen ağ senaryosu ele alınmaktadır. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi RRH'lerden bir tanesi hücre merkezine, geri kalanları ise merkezden çevrel çemberin  $2/3$ 'ü kadar uzaklıkta birbiçimli olarak dağıtılmaktadır. Toplamda  $LM$  adet RRH bulunmaktadır. Tezin ilerleyen bölümlerinde, ağ modeli her hücrede farklı güç sınırlarına ve koordinasyon seviyelerine sahip olabilen  $L = L_r + L_f$  adet erişim noktası olacak şekilde heterojen senaryoya geliştirilmektedir, burada  $L_r$  ve  $L_f$ , sırasıyla, hücre başına RRH ve düşük güç tüketimli LPN sayısını temsil etmektedir. RRH'lerin hücre içine dağılımı homojen senaryo ile aynı olmakla birlikte, LPN'ler

birbirlerine en az 10 m, RRH'lere ise en az 35 m uzaklıkta olacak şekilde rasgele olarak dağıtılmaktadır.  $m$ 'inci hücrede birbiçimli ve rasgele olarak dağıtılmış  $K_m$  adet kullanıcı, toplamda ise  $K_t = \sum_{m=1}^M K_m$  kullanıcı bulunmaktadır, bu kullanıcılar dağıtık mimaride sadece bulunduğu hücrenin erişim noktalarından, merkezi mimaride ise bütün topaktaki erişim noktalarından sinyal alabilmektedir. Diğer hücrelerden gelen sinyaller hücrelerarası girişim, diğer kullanıcılar için gönderilen sinyaller de hücreiçi girişim olarak kabul edilmektedir.

Sistem genelinde kullanılacak her biri  $B$  bantgenişliğinde olan  $N$  adet kaynak bloğu bulunmakta ve her bir kaynak bloğunda bütün kullanıcıların hizmet alabilmesinin mümkün olduğu, Kısım 1.1.5.3'de tanımlanan çok taşıyıcılı NOMA tekniği ve bir hücredeki erişim noktalarının (RRH ve LPN) hücre içindeki bütün kullanıcılara yayın yaptığı JT-CoMP tekniği kullanılmaktadır; dolayısıyla hücre (veya bulut) içindeki bir kullanıcı diğer kullanıcılar için gönderilen sinyaller tarafından da hücreiçi girişime maruz kalmaktadır. Hücreiçi girişimi kısmi olarak gidermek için sıralı girişim giderimi yöntemi kullanılmaktadır [95]. RRM ve IM mimari çeşidine bağlı olarak merkezi veya dağıtık olarak yapılmaktadır.

[56]'da özdeş erişim noktaları (RRH) kullanılmakta, ve bunlar ya tam güçte ( $P_{max}$ ) iletim yapmakta ya da kapalı durumda bulunabilmektedir, bu yöntem bu tezde İkili Güç Yönetimi (Binary Power Management, BPM) olarak adlandırılmaktadır. Her erişim noktası ve kullanıcının birer adet antene sahip olduğu varsayıldığı bu senaryolarda, kullanılan RRH'lerin ve LPN'lerin iletim yapabileceği azami güç sırasıyla  $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$  ile sınırlanmaktadır.  $m$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının iletim gücü sınırı  $P_{\ell m}$  ile genelleştirilmektedir. Tez kapsamında ise, ikili güç modeli  $\{0, P_{max}\}$  yerine erişim noktalarının  $[0, P_{max}]$  aralığında herhangi bir güç seviyesinde yayın yapabilmesine olanak sağlanmakta ve Sürekli Güç Yönetimi (Continuous Power Management, CPM) olarak adlandırılmaktadır.

İlerleyen bölümlerde oluşturulan problem formülasyonlarının çözümünde dışbükey eniyileme (convex optimization) kullanılmaktadır. Problemler dışbükey biçiminde olmadığı için elde edilen sonuçlar eniyiye yakın olmaktadır.

## 2. DİNAMİK DAĞITIK RAN (DD-RAN) MİMARİSİ

Bu bölümde JT-CoMP ve MC fonksiyonları hücrelerdeki kaynak ve güç yönetimini gerçekleştiren kontrolörlere dağıtılmaktadır; bununla birlikte NOMA tekniğinin uygulanmasında aktif rol alan RRM fonksiyonu için merkezi birimin kararları geçerlidir. Basitten karmaşığa doğru çeşitli senaryolarda, farklı maliyet işlevleri için ve uygun kısıtlar altında (örn., azami güç, adalet) RRM problemleri irdelenmektedir.

İlk olarak homojen ağlar göz önüne alınmaktadır. Kısım 2.3.1.1'de hücre başına tek kullanıcı (  $K = 1$  ) ve tek taşıyıcılı (  $N = 1$  ) senaryo,  $M = 2$  hücreden oluşan topaktaki (cluster) en düşük veri hızına sahip kullanıcının veri hızının enbüyütüldüğü, enküçük veri hızı kısıtı altında toplam veri hızının enbüyütüldüğü ve Jain adaletliliği kısıtı altında toplam veri hızının enbüyütüldüğü senaryolar incelenmektedir. Bu problemlerin hepsinde BS için azami güç kısıtları da mevcuttur. Daha sonra, Kısım 2.3.1.2'de tek taşıyıcılı; ama hücre başına çok kullanıcı (  $K \geq 1$  ) durum için aynı senaryolar enküçük veri hızı, adalet ve BS iletim gücü kısıtları altında incelenmektedir. Bir sonraki adımda, Kısım 2.3.1.3'te taşıyıcı sayısı da artırılarak (  $N \geq 1$  ) çok kullanıcı sistemin veri hızı ve enerji verimliliği başarımları aynı kısıtlar altında incelenmektedir. Bununla birlikte harcanan iletim gücünün enküçültülmesi ile veri hızının enbüyütülmesi arasında bir ödünleşim kurularak çeşitli BS iletim gücü çalışma bölgelerinde enerji verimliliği eniyileştirilmektedir. Çok taşıyıcılı bu senaryoda NOMA'nın başarımının incelenebilmesi için ayrıca bir dikgen çoklu erişim yöntemi (OMA) tanıtılmaktadır.

Daha sonra Kısım 2.3.2.1'de çok kullanıcı ve çok taşıyıcılı heterojen ağlarda enerji verimliliği başarımları yine aynı kısıtlar altında incelenmektedir. Bu kısımda, kullanıcıların aynı anda RRH'lere ve LPN'lere bağlanıp sinyal alabilmesine olanak sağlayan MC fonksiyonunun kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak farklı bir kısıt eklenmektedir.

Tek taşıyıcılı (  $N = 1$  ) senaryolar hem BBU'ların ya tam güçle çalıştığı ya da çalışmadığı BPM (İkili Değer Güç Yönetimi, Binary Power Management) için hem de azami güç değerine kadar herhangi bir güç ile iletim yapabildiği CPM (Sürekli Güç Yönetimi, Continuous Power Management) için incelenmektedir. Takip eden kısımlardaki çok taşıyıcılı senaryolar için sadece CPM yöntemi ile sistem eniyilemesi yapılmak-

tadır.

## 2.1 SİSTEM MODELİ

Bu bölümdeki çalışmalar için Kısım 1.4.1'de tanımlanan ağ modeli benimsenmektedir. Aşağıda çok kullanıcı ve çok taşıyıcılı en karmaşık senaryo olan heterojen ağlar için sistem modeli tanımlanmaktadır. Elde edilecek formülasyonlar, daha basit senaryolar için kolaylıkla basitleştirilebilir.

$m$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerinde  $k$ 'inci kullanıcı için ayırdığı iletim gücü  $\alpha_{\ell mki}$  katsayıları ile ayarlanmaktadır. İkili Güç Yönetimi'nde (BPM), RRH'lerdeki RRU'lar (uzak radyo birimi, remote radio unit) bir kullanıcı için ayrılan gücün tamamıyla iletim yapmakta veya çalışmamaktadırlar, bir başka deyişle,  $\alpha_{\ell mki} \in \left\{0, \frac{1}{K_m}\right\}$ . Çok taşıyıcılı durumun da dahil olabileceği problemler Sürekli Güç Yönetimi (CPM) için düzenlendiğinde, her RRU,  $\alpha_{\ell mki} \in [0, 1]$  aralığı dahilinde herhangi bir güç seviyesinde iletim yapabilecektir; ancak herhangi bir erişim noktasında bütün RRU'ların bütün kullanıcılar için bütün RB'ler üzerinden harcadığı toplam iletim gücü RRH için  $P_{r,\max}$ , LPN için  $P_{f,\max}$  ile sınırlandırılmaktadır.

JT-CoMP tekniği sayesinde erişim noktaları bir veya birden fazla kullanıcıya aynı anda sinyaller gönderebilmektedir, dolayısıyla  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci kaynak bloğunda aldığı sinyal

$$y_{kmi} = \left( \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell mki} P_{\ell m} h_{\ell mki} \omega_{\ell mki}} \right) x_{km} + \sum_{j=1, j \neq k}^{K_m} \left( \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell mji} P_{\ell m} h_{\ell mki} \omega_{\ell mji}} \right) x_{jm} + \sum_{n=1, n \neq m}^M \sum_{j=1}^{K_n} \left( \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell nji} P_{\ell n} h_{\ell nki} \omega_{\ell nji}} \right) x_{jn} + \eta_{kmi}, \quad \forall m, k, i, \quad (2.1)$$

olarak yazılır, burada  $m = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq M\}$ ,  $n = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq M\}$ ,  $\ell = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq L_r + L_f\}$ ,  $j = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq K_m, \forall m\}$ ,  $k = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq K_m, \forall m\}$ , ve  $i = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq N\}$  için,  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcıya iletilecek bilgi sinyali  $x_{km}$  ile temsil edilmekte ve  $E[x_{km} x_{jn}] = \delta_{nm} \delta_{jk}$  eşitliği geçerlidir, yani,  $m \neq n$  veya  $k \neq j$  durumunda gelen farklı bilgi sinyalleri ilintisizdir.  $\alpha_{\ell mki}$  ve  $\omega_{\ell mki}$  katsayıları, sırasıyla,  $m$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerinde  $k$ 'inci kullanıcı için ayırdığı iletim gücünü ve hüzme yönlendirmeyi kontrol etmektedir.  $n$ 'inci hücrenin  $\ell$ 'inci erişim noktası ile  $m$ 'inci hücredeki

$k$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerindeki kanal katsayısı  $h_{\ell n k m i}$  ile temsil edilmektedir.  $\sigma_{\eta}^2$  değışitirli sıfır ortalamalı çevrimsel eklenir beyaz Gauss gürültü  $\eta_{k m i}$  ile gösterilmektedir. Eşitlik 2.1'deki ilk terim  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcıya gönderilmek istenen sinyali gösterirken, ikinci terim ilgili kullanıcının bulunduğu hücreden gelen hücreiçi girişimi, üçüncü terim diğer hücrelerden gelen girişim sinyallerinin toplamını ve son terim de gürültüyü temsil etmektedir. Dolayısıyla  $m$ 'inci hücredeki ilgili kullanıcının sinyal gücünün, gürültü girişim gücüne oranını belirten SINR

$$\gamma_{k m i}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) = \frac{\left| \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell m k i}} \mathbf{P}_{\ell m} h_{\ell m k m i} \omega_{\ell m k i} \right|^2}{\sigma_{\eta}^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^{K_m} \left| \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell m j i}} \mathbf{P}_{\ell m} h_{\ell m k m i} \omega_{\ell m j i} \right|^2 + \sum_{n=1, n \neq m}^M \sum_{j=1}^{K_n} \left| \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell n j i}} \mathbf{P}_{\ell n} h_{\ell n k m i} \omega_{\ell n j i} \right|^2}, \quad \forall k, m, i, \quad (2.2)$$

olarak bulunur ve matematiksel takibi kolaylaştırmak için matris biçiminde

$$\gamma_{k m i}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) = \frac{\boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{C}_{k m i}(\boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\alpha}}{\sigma_{\eta}^2 + \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{D}_{k m i}(\boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\alpha}} \quad \forall k, m, i, \quad (2.3)$$

olarak düzenlenebilir, burada  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1^T \alpha_2^T \cdots \alpha_N^T]^T$  güç kontrol vektörü

$$\begin{aligned} \alpha_i &= [\alpha_{1i}^T \alpha_{2i}^T \cdots \alpha_{M_i}^T]^T, \\ \alpha_{m i} &= [\alpha_{m1i}^T \alpha_{m2i}^T \cdots \alpha_{mK_{m i}}^T]^T, \\ \alpha_{m k i} &= [\sqrt{\alpha_{1 m k i}} \sqrt{\alpha_{2 m k i}} \cdots \sqrt{\alpha_{L m k i}}]^T, \\ &= [\sqrt{\alpha_{1 m k i}} \sqrt{\alpha_{2 m k i}} \cdots \sqrt{\alpha_{L_r m k i}} \sqrt{\alpha_{(L_r+1) m k i}} \cdots \sqrt{\alpha_{(L_r+L_i) m k i}}]^T, \end{aligned} \quad (2.4)$$

alt vektörlerinden oluşmaktadır. Burada  $\alpha_{m k i}$   $m$ 'inci hücredeki erişim noktalarından buldukları hücredeki  $k$ 'inci kullanıcıya  $i$ 'inci RB üzerinden gönderilen sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha_{m i}$   $m$ 'inci hücredeki erişim noktalarından buldukları hücredeki bütün kullanıcılara  $i$ 'inci RB üzerinden gönderilen sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha_i$  topaktaki erişim noktalarından buldukları hücredeki bütün kullanıcılara  $i$ 'inci RB üzerinden gönderdikleri sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\boldsymbol{\alpha}$  ise bütün sistemdeki sinyal iletiminin güç kontrolünü sağlayan elemanların hepsinden oluşmaktadır. Gönderilen sinyal kanal matrisi,

$\mathbf{C}_{kmi} \in \mathbb{C}^{LK_t N \times LK_t N}$ , ve girişim kanal matrisi,  $\mathbf{D}_{kmi} \in \mathbb{C}^{LK_t N \times LK_t N}$ ,

$$\mathbf{C}_{mki}(\omega) = \bigoplus_{u=1}^{i-1} \mathbf{0}_{LK_t} \bigoplus_{n=1}^M \bigoplus_{j=1}^{K_n} [\mathbf{c}_{nmk}]_j \mathbf{F}_{nj,mk,i}(\omega) \bigoplus_{u=i+1}^N \mathbf{0}_{LK_t}, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D}_{mki}(\omega) = \bigoplus_{u=1}^{i-1} \mathbf{0}_{LK_t} \bigoplus_{n=1}^M \bigoplus_{j=1}^{K_n} [\mathbf{d}_{nmk}]_j \mathbf{F}_{nj,mk,i}(\omega) \bigoplus_{u=i+1}^N \mathbf{0}_{LK_t}, \quad (2.6)$$

$\bigoplus$  doğrudan toplam operatörü ile blok köşegen yapısında oluşturulmaktadır. Burada  $\mathbf{0}_{LK_t}$  ( $LK_t \times LK_t$ ) boyutunda sıfır matrisini temsil etmektedir. Kanal seçim vektörleri olarak adlandırılan  $\mathbf{c}_{nmk}$  ve  $\mathbf{d}_{nmk}$  sırasıyla gönderilmek istenen sinyalin ve girişim terimlerinin (seviyesinin) seçiminde görevlidir ve  $j$ 'inci elemanları

$$[\mathbf{c}_{nmk}]_j = \delta_{nm} \delta_{jk}, \quad (2.7)$$

$$[\mathbf{d}_{nmk}]_j = (1 - \delta_{nm}) + \delta_{nm} (\delta_{SIC} \delta_{j>k} + (1 - \delta_{SIC})), \quad (2.8)$$

olarak tanımlanmaktadır.  $m \neq n$  için hücrelerarası girişim terimleri,  $m = n$  için hücreiçi kullanıcılar arası girişim terimleri seçilmektedir.  $\delta_{SIC} = 1$  durumunda sıralı girişim giderimi kullanılmakta ve hücreiçi girişim kısmi olarak giderilmektedir.  $\ell_1, \ell_2 = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq L_r + L_f\}$  için  $\mathbf{F}_{nj,km,i}$  matrisinin  $\ell_1, \ell_2$ 'inci girdileri

$$[\mathbf{F}_{nj,km,i}(\omega)]_{\ell_1 \ell_2} = \sqrt{P_{\ell_1 n} P_{\ell_2 n}} \Re \{ h_{\ell_1 n k m i} \omega_{\ell_1 n j i} h_{\ell_2 n k m i}^* \omega_{\ell_2 n j i}^* \} \quad (2.9)$$

olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra kullanıcı veri hızı

$$r_{km}(\alpha, \omega) = \sum_{i=1}^N B \log_2 (1 + \gamma_{kmi}(\alpha, \omega)), \quad \forall k, m, \quad (2.10)$$

ile elde edilir.

Eniyileme problemini basitleştirmek için hüzme yönlendirme katsayıları erişim noktaları (RRH ve LPN) ve ilgili kullanıcı arasındaki kanala,

$$\omega_{\ell m k i} \triangleq e^{-j \angle h_{\ell m k i}}, \quad \forall \ell, m, k, i \quad (2.11)$$

olacak şekilde uyumlandırılmaktadır [55]. Bu durumda  $\omega$  vektörü eniyileme probleminin bir değişkeni olmaktan çıkmaktadır.

Böylece, toplam veri hızı

$$R(\alpha) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} r_{km}(\alpha), \quad (2.12)$$

olarak elde edilir.

Erişim noktalarının kullanabileceği toplam iletim gücünü sınırlamanın yanı sıra, sistemdeki enerjinin verimli kullanılabilmesi amacıyla doğrudan sistem genelinde enerji verimliliğinin eniyileştirilmesi de irdelenebilir. Enerji verimliliğinin hesaplanabilmesi için öncelikle toplam güç tüketiminin hesaplanması gerekmektedir. Eşitlik (1.7)'de tanımlanan doğrusal güç tüketim modeli kullanılarak

$$P_T(\alpha) = \sum_{m=1}^M \sum_{\ell=1}^L (P_C + \Delta_{p,\ell m} P_{out,\ell m}), \quad (2.13)$$

$$= \sum_{m=1}^M \sum_{\ell=1}^L \left( P_{C,\ell m} + \Delta_{p,\ell m} P_{\ell m} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell m k i} \right), \quad (2.14)$$

$$= \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{\ell=1}^{L_r} \left( P_{C,r} + \Delta_{p,r} P_{r,\max} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell m k i} \right) + \sum_{\ell=1}^{L_f} \left( P_{C,f} + \Delta_{p,f} P_{f,\max} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell m k i} \right) \right], \quad (2.15)$$

$$= M (L_r P_{C,r} + L_f P_{C,f}) + \left( \mathbf{1}_{K_t}^T \otimes \left[ \Delta_{p,r} P_{r,\max} \mathbf{1}_{L_r}^T \quad \Delta_{p,f} P_{f,\max} \mathbf{1}_{L_f}^T \right] \right) \alpha, \quad (2.16)$$

olarak bulunur. Burada  $P_{C,r}$  ve  $P_{C,f}$  sırasıyla RRH ve LPN'lerin iletim yapmadığı zamanda işlemlerini devam ettirebilmesi için tükettiği güç miktarlarını,  $\Delta_{p,r}$  ve  $\Delta_{p,f}$  sırasıyla RRH ve LPN'ler için yüke bağlı güç tüketiminin eğimini,  $\alpha$  ise Eşitlik (2.4)'te tanımlanan güç kontrol katsayılarını temsil etmektedir. Topak genelinde harcanan toplam iletim gücü

$$P_{out}(\alpha) = \sum_{m=1}^M \sum_{\ell=1}^L (P_{out,\ell m}), \quad (2.17)$$

$$= \left( \mathbf{1}_{K_t}^T \otimes \left[ P_{r,\max} \mathbf{1}_{L_r}^T \quad P_{f,\max} \mathbf{1}_{L_f}^T \right] \right) \alpha,$$

olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra enerji verimliliği, toplam veri hızının toplam tüketilen güç değerine oranı ile

$$\mu_{EE}(\alpha) = \frac{R(\alpha)}{P_T(\alpha)} \quad (2.18)$$

olarak bulunur.

Kullanılabilir bantgenişliğinin sistem başarımına etkisinin ve bu bantgenişliğinin kullanılan iletim gücü ile ne kadar verimli kullanıldığının incelenmesi için, birim bantgenişliğindeki EE değeri olarak, bir başka deyişle birim güçle elde edilen izgesel verimlilik olarak tanımlanan enerji izgesel verimlilik

$$\mu_{ESE}(\alpha) = \frac{\mu_{EE}(\alpha)}{NB} = \frac{R(\alpha)}{P_T(\alpha) NB} \quad (2.19)$$

ile tanımlanmaktadır.

## 2.2 BENZETİM MODELİ

İlgili senaryoda,  $M = 2$  hücreli bir topakta, hücre başına  $L_r=4$  adet RRH ve  $L_f \leq 3$  adet LPN için kullanılmış ve başarım analizi için Monte Carlo benzetimleri düzenlenmektedir. Sonuçlar 500 gerçekleştirme üzerinden ortalama alınmaktadır. Erişim noktası ve kullanıcı arasındaki bağlantıda, log-normal gölgelemeli Rayleigh sönümlenmeli kanal kullanılmaktadır, yol kaybı değerleri [96]'deki gibi seçilmektedir. Karmaşık kanal katsayıları

$$h_{\ell n k m i} = \sqrt{\rho(d_{\ell n k m}) s_{\ell n k m}} h'_{\ell n k m i} \quad (2.20)$$

olarak bulunmaktadır, burada, aşağıdaki gibi tanımlanan  $\rho(\cdot)$  yol kaybı fonksiyonunu,  $d_{\ell n k m}$   $n$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktası ile  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcı arasındaki mesafeyi,  $s_{\ell n k m}$ , 0 dB ortalamalı, 8 dB standart sapmalı log-normal gölgelemeyi,  $h'_{\ell n k m i}$  ise sıfır ortalamalı ve birim değişintili karmaşık Gauss dağılımına sahip sönümlenme etkisini temsil etmektedir.

$$\rho(d_{\ell n k m}) = 10^{-(1.866+4.032 \log_{10}(d_{\ell n k m}))} \quad (2.21)$$



Kentsel senaryoda baz istasyonlar arası mesafe 500 m, gürültü gücü ise -174 dBm/Hz alınmış, taşıyıcı frekans 2 GHz ve RB bantgenişliği 180 KHz, RRH anten yükseklikleri 15 m, kullanıcıların ise 1.5 m yükseklikte olduğu kabul edilmektedir. Benzetim modeli özellikleri Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Benzetim Modeli Özellikleri

<b>Parametre</b>	<b>Benzetim Modeli Özellikleri</b>
Baz istasyonlar arası mesafe	500 m
Yol kaybı ve Gölgeleme modeli	UMa [96], [97]
Gürültü gücü	-174 dBm/Hz
Kullanıcı dağılımı	Birbiçimli ve rasgele dağıtılmış
Frekans / Kaynak bloğu bantgenişliği	2 GHz / 180 KHz
Anten Konfigürasyonu	Yönsüz SISO
Kanal Kestirimi	İdeal
Gerçekleme Sayısı	500
NOMA-SIC	Kısmi Girişim Giderimi
Sıfır Yük için RRH Güç Tüketimi	$P_{0,r} : 84 \text{ W}$
Sıfır Yük için LPN (Piko-hücre) Güç Tüketimi	$P_{0,f} : 6.8 \text{ W}$
Sıfır Yük için LPN (Femto-hücre) Güç Tüketimi	$P_{0,f} : 4.8 \text{ W}$
RRH Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,r} : 2.8$
LPN (Piko-hücre) Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,f} : 4.0$
LPN (Femto-hücre) Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,f} : 8.0$

## 2.3 ENİYİLEME PROBLEMLERİ ve BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ

Bu kısımda sırasıyla homojen ve heterojen ağlarda eniyileme problemleri oluşturulmuş ve başarımları değerlendirilmektedir. Homojen ağlar için taşıyıcı ve kullanıcı sayısı ile basitten karmaşığa doğru değişen çeşitli senaryolarda, farklı maliyet işlevleri ve kısıtları için RRM problemleri irdelenmektedir. Burada homojen ağlardaki tek taşıyıcılı senaryolarda hem BPM hem CPM için problemler üretilmiş olup çok taşıyıcılı senaryolarda ve heterojen ağ senaryolarında sadece CPM tasarısı için problemler düzenlenmektedir.

### 2.3.1 Homojen Ağlar

#### 2.3.1.1 Tek Taşıyıcılı ve Hücre Başına Tek Kullanıcılı Senaryo

##### Topaktaki En Düşük Veri Hızının Enbüyütülmesi

Haberleşme stratejisi sistem genelinde en düşük veri hızına sahip kullanıcının veri hızını enbüyütmektir. Problem formülasyonları BPM ve CPM için

$$\begin{aligned} \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \min r_m(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \in \{0, 1\}^{LM}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \text{CPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \min r_m(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \in [0, 1]^{LM}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

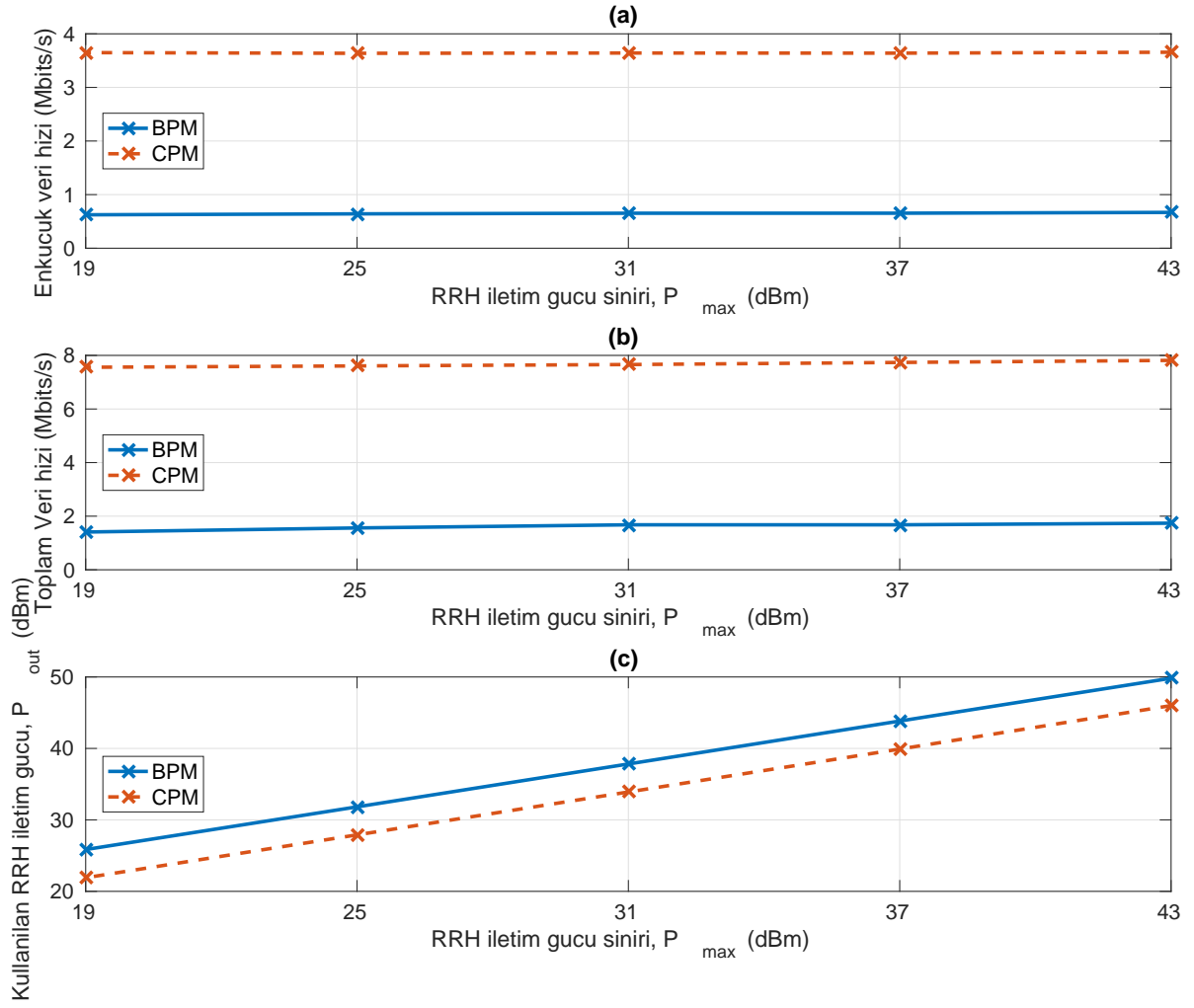
ile verilmektedir, burada BPM için  $\alpha \in \{0, 1\}^{LM}$  kısıtı RRH'lerin ya tam güçle iletim yapması ya da kapalı olmasını sağlarken, CPM için  $\alpha \in [0, 1]^{LM}$  kısıtı iletim yapan RRH'leri  $[0, P_{max}]$  arasında sınırlandırmaktadır. Bir RRH'nin kontrol katsayısının ya 0 ya 1 olması için Eşitlik (2.22)'deki kısıt her  $\ell$  ve  $m$  değeri için  $\alpha_{\ell m}(1 - \alpha_{\ell m}) = 0$  olacak şekilde değiştirilebilir. Bu durumda BPM problemi yeni haliyle

$$\begin{aligned} \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \min r_m(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \circ (\mathbf{1}_{LM} - \alpha) = \mathbf{0}_{LM}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

olarak düzenlenir. Burada  $\circ$  Hadamard çarpımını temsil etmektedir.

## Başarım Değerlendirmesi

Şekil 2.1'de BPM ve CPM yöntemlerinde RRH maksimum güç sınırı  $P_{\max}$  değerlerine karşılık gelen en küçük veri hızı değerleri, sistem genelinde toplam veri hızı değerleri ve bütün RRH'lerde kullanılan toplam iletim gücü değerleri gösterilmektedir. Gürültünün gücünün ( $N_0 = -174$  dBm/Hz , 1 RB için  $\sigma_\eta^2 \approx -122$  dBm) düşüklüğü dikkate alındığında ve her  $P_{\max}$  değeri için benzer sonuçların alındığı düşünüldüğünde girişim etkin bölge olduğu gözlemlenmektedir. CPM yöntemi her  $P_{\max}$  değeri için BPM yöntemine göre oldukça başarılıdır. Bir başka deyişle, bütün RRH'leri açıp kapatmaktansa iletim gücünü ayarlamak beklendiği üzere daha iyi başarımlar göstermektedir.



Şekil 2.1.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcılı sistemde, sadece azami güç kısıtı ile, topaktaki enküçük veri hızı enbüyütölmektedir. Problem formölasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen sistem başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Sistem genelindeki enküçük veri hızının  $P_{max}$  ile değişimi. (b) Sistem genelindeki toplam veri hızının  $P_{max}$  ile değişimi. (c) Sistem genelinde harcanan toplam iletim gücünün ( $P_{out}$ )  $P_{max}$  ile değişimi.

## Enküçük Veri Hızı Kısıtı Altında Toplam Veri Hızının Enbüyütülmesi

En düşük veri hızına sahip kullanıcının başarımını enbüyütmeye çalışmak sistemde adaleti fazlasıyla sağlamaya çalışırken, sistem kapasitesini de düşürmektedir. Bu yüzden, bir önceki senaryo ile aynı senaryonun göz önünde alındığı, ancak, sistemdeki her kullanıcının başarımının belirli bir veri hızı değerinden büyük olma kısıtı ile sistemdeki toplam kapasitenin enbüyütülmesinin amaçlandığı problem formülasyonu aşağıda verilmektedir. Problem formülasyonları BPM ve CPM için

$$\begin{aligned}
 \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \sum_{m=1}^M r_m(\alpha) \\
 & \text{s.t.} \quad \alpha \in \{0, 1\}^{LM} \\
 & \quad \quad r_m(\alpha) \geq r_0, \quad \forall m,
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \sum_{m=1}^M r_m(\alpha) \\
 & \text{s.t.} \quad \alpha \in [0, 1]^{LM} \\
 & \quad \quad r_m(\alpha) \geq r_0, \quad \forall m,
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

ile verilmektedir, burada birinci kısıtlar RRH'lerin iletim gücünü kısıtlarken, ikinci kısıtlar ise kullanıcı veri hızlarını alttan sınırlamaktadır. Eşitlik (2.25)'deki BPM problemi için birinci kısıt aynı şekilde her  $\ell$  ve  $m$  değeri için  $\alpha_{\ell m}(1 - \alpha_{\ell m}) = 0$  olacak şekilde değiştirilebilir. Bu durumda BPM problemi

$$\begin{aligned}
 \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \sum_{m=1}^M r_m(\alpha) \\
 & \text{s.t.} \quad \alpha \circ (\mathbf{1}_{LM} - \alpha) = \mathbf{0}_{LM} \\
 & \quad \quad r_m(\alpha) \geq r_0, \quad \forall m,
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

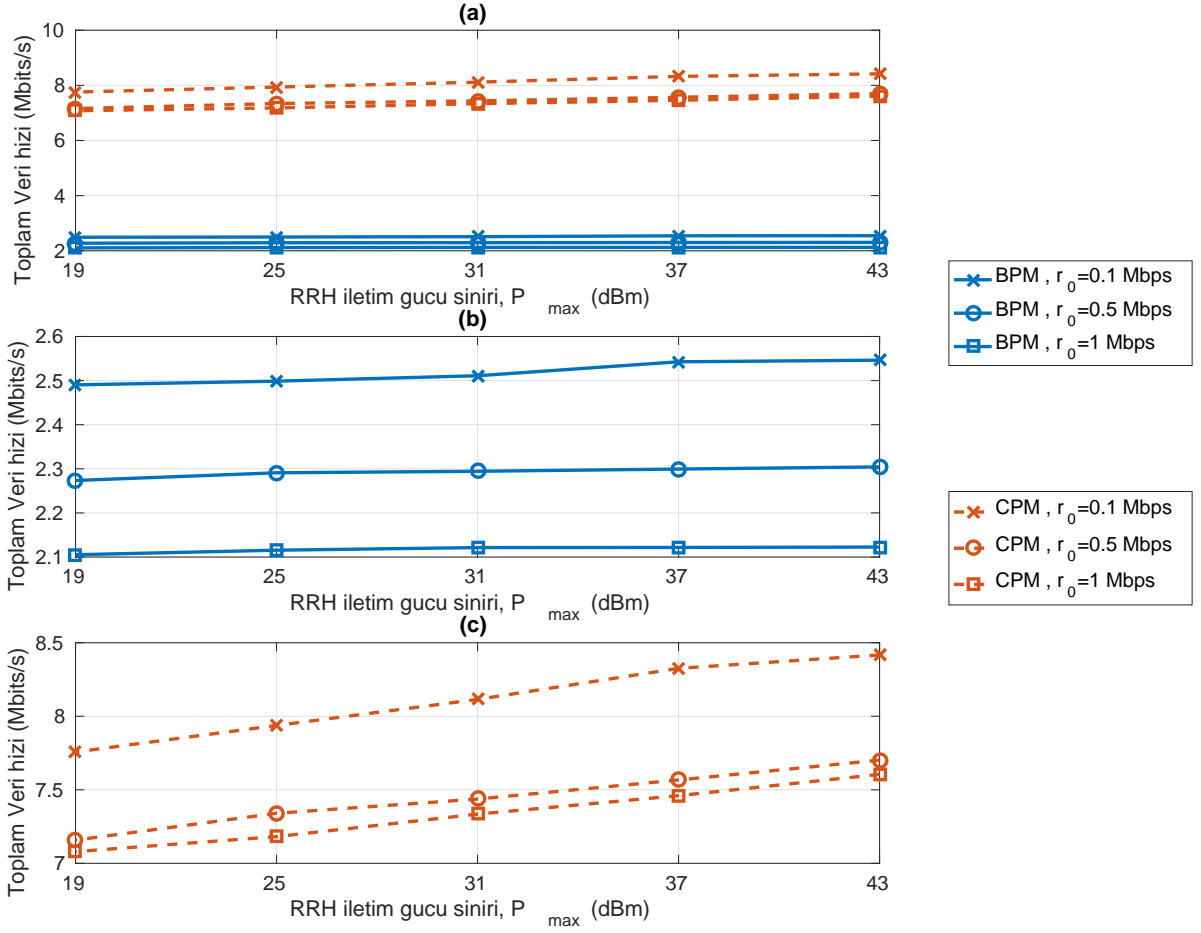
olarak düzenlenir. Burada  $\circ$  Hadamard çarpımını temsil etmektedir.

## Başarım Değerlendirmesi

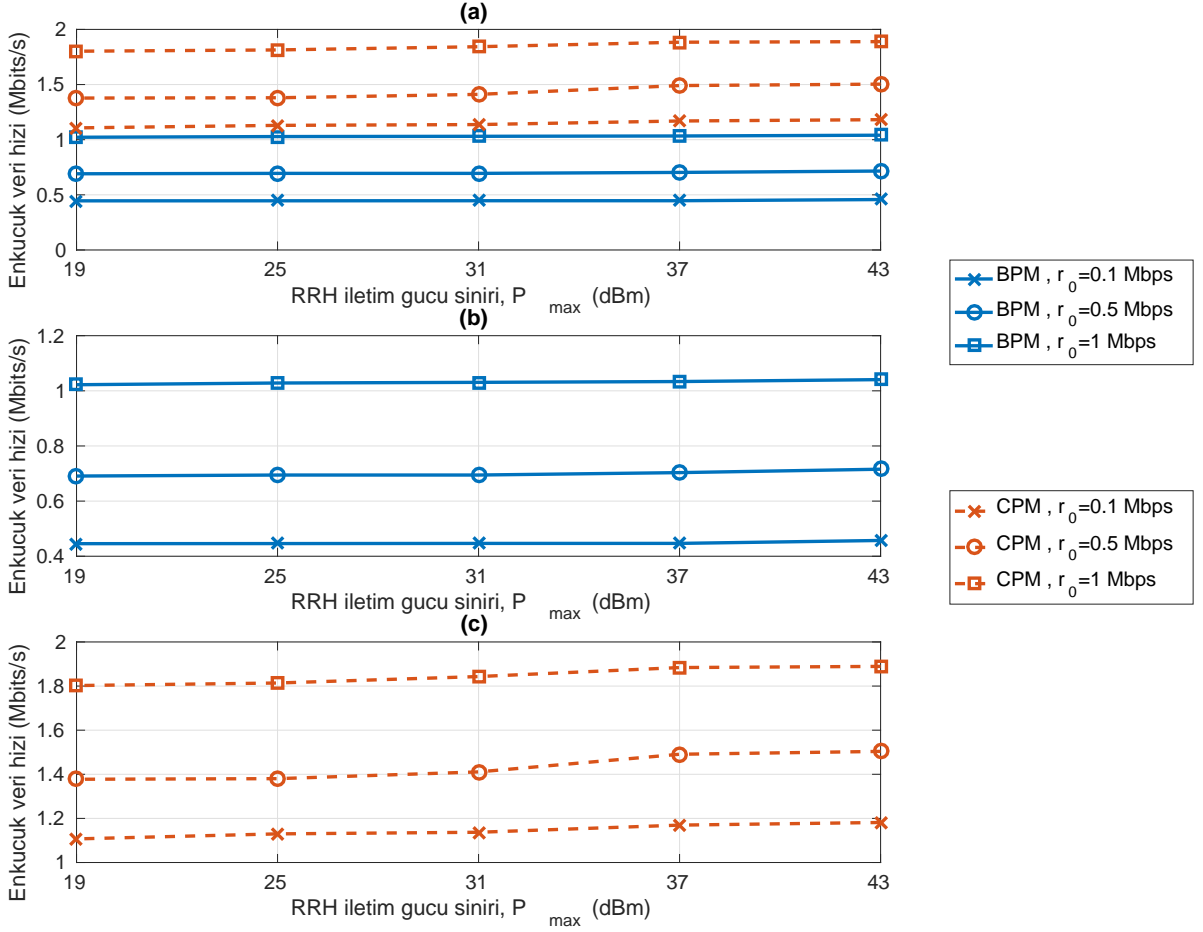
Şekil 2.2'de BPM ve CPM yöntemleri için RRH maksimum güç sınırı  $P_{max}$  değerlerine karşılık gelen toplam veri hızı değerleri incelenmektedir. Bu basit senaryoda

CPM yöntemi BPM'e göre yaklaşık 3 kat yüksek veri hızı sunmaktadır. Artan  $P_{\max}$  değerlerine göre BPM'de fazla değişim gözlenmemekte; ancak CPM yöntemi ile veri hızı artmaktadır. En düşük veri hızı kısıtı sıkılaştırıldığında, yani yüksek veri hızı istendiğinde, kötü kanala sahip kullanıcılara daha fazla güç ile iletim yaparak veri hızını artırırken toplam veri hızı düşmektedir. Şekil 2.3'te ve Şekil 2.4'te, sistemdeki en düşük veri hızının ve RRH'lerde kullanılan toplam iletim gücünün  $P_{\max}$  ve  $r_0$  değerlerine göre değişimi gösterilmektedir.

Gürültünün gücünün ( $N_0 = -174$  dBm/Hz , 1 RB için  $\sigma_\eta^2 \approx -122$  dBm) girişim değerlerine göre düşük olması sebebiyle, ve BPM yönteminin girişimi yeterince yok edememesi sebebiyle  $P_{\max}$  değeri için benzer sonuçlar alınmaktadır. Ancak CPM yönteminde, artan  $P_{\max}$  değerleri ile bir miktar da olsa başarımların artışı gözlenmektedir.

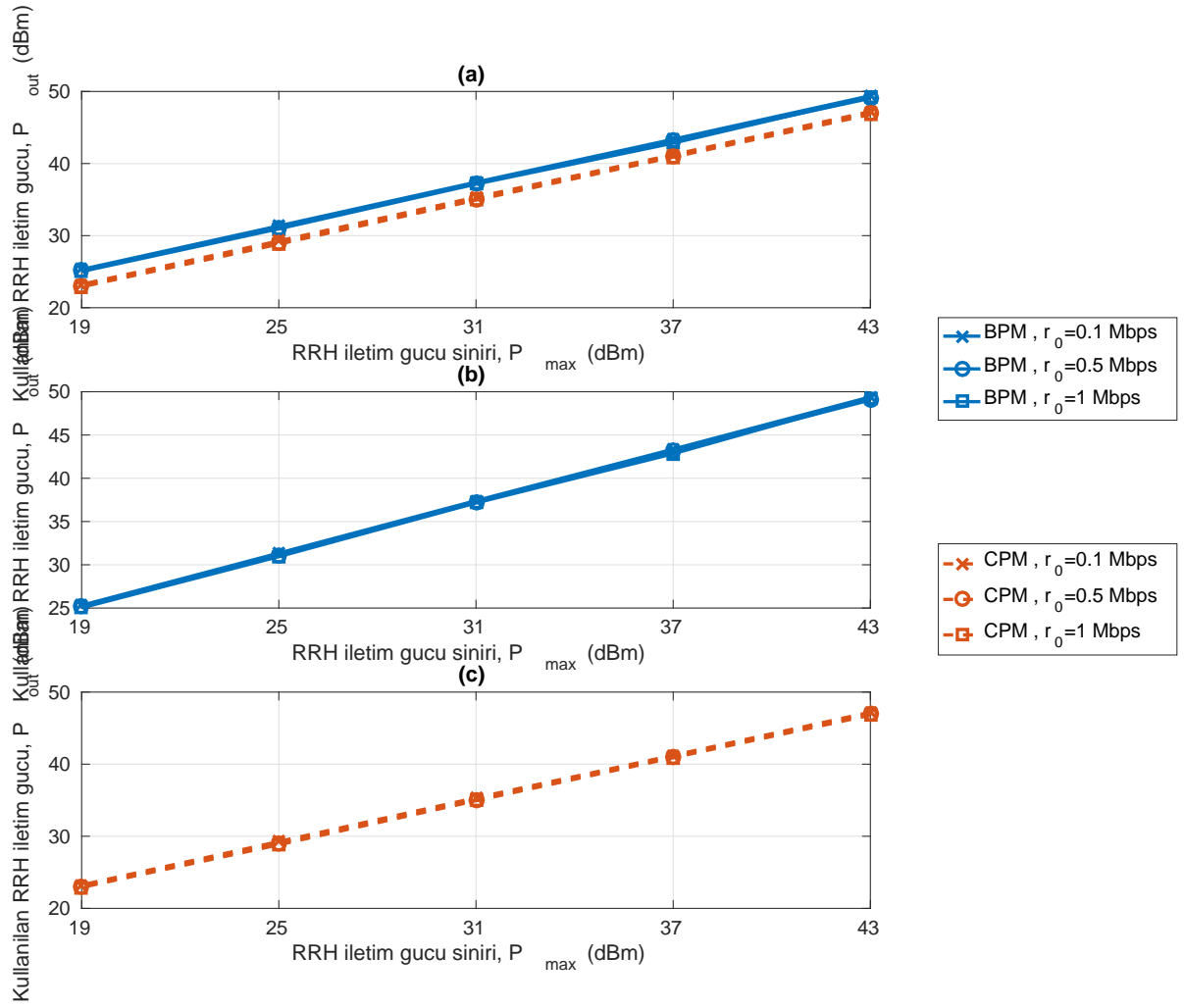


Şekil 2.2.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve farklı enküçük veri hızı ( $r_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen toplam veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için toplam veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı.



Şekil 2.3.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve farklı enküçük veri hızı ( $r_0$ ) kısıtları ile, toplaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen toplaktaki enküçük veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{\max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için enküçük veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı.





Şekil 2.4.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve farklı enküçük veri hızı ( $r_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen harcanan iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için harcanan iletim gücü başarımı. (b) BPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. (c) CPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı.

## Jain Adaletliliği Kısıtı Altında Toplam Veri Hızının Enbüyütülmesi

İletişim stratejisi yine sistem genelinde toplam veri hızını enbüyütmek olmakla birlikte, sistemde adaleti sağlamak için Jain Adaletliliği kısıtı eklenmektedir. Problem formülasyonları BPM ve CPM için

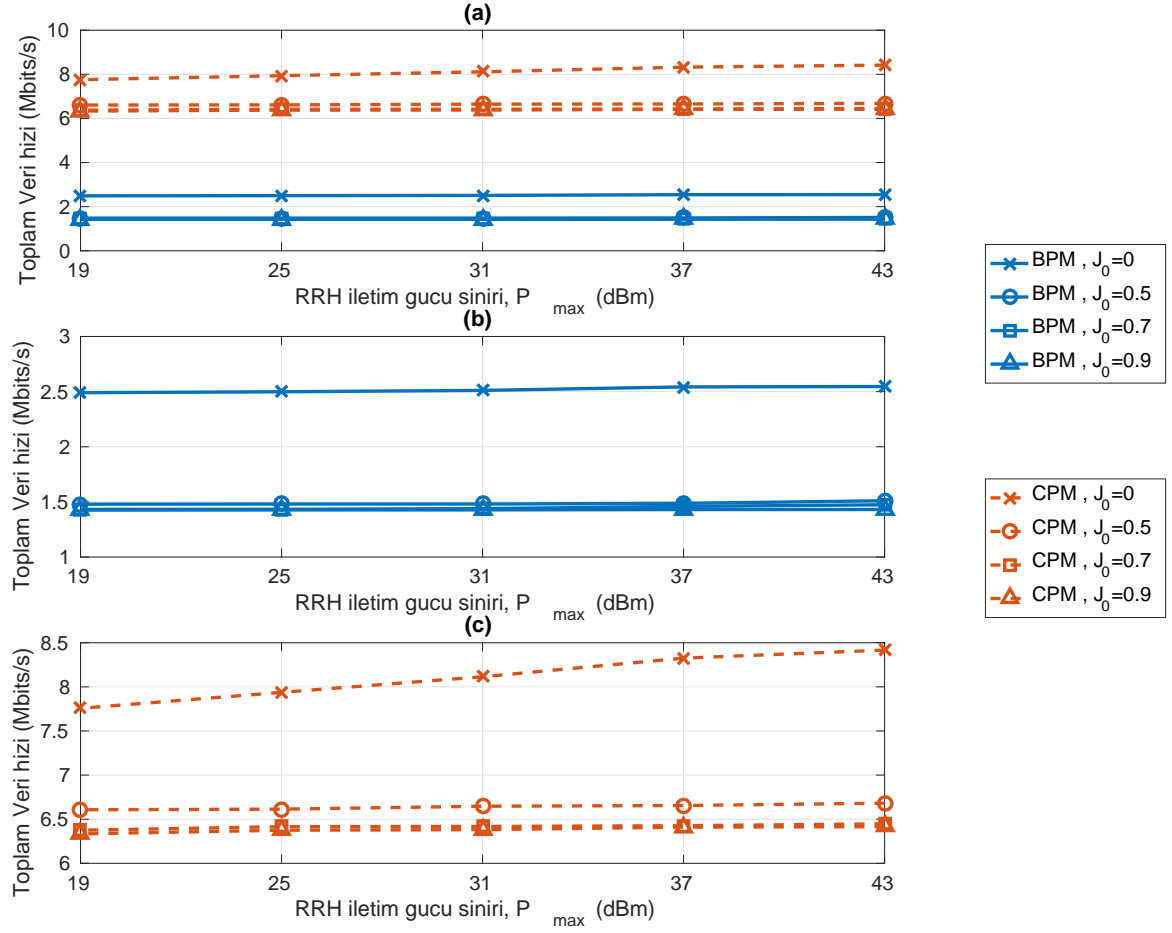
$$\begin{aligned} \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \sum_{m=1}^M r_m(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \in \{0, 1\}^{LM} \\ & \quad \quad r_m(\alpha) \geq r_0, \quad \forall m, \\ & \quad \quad J(\alpha) \geq J_0, \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \text{CPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \sum_{m=1}^M r_m(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \in [0, 1]^{LM} \\ & \quad \quad r_m(\alpha) \geq r_0, \quad \forall m, \\ & \quad \quad J(\alpha) \geq J_0, \end{aligned} \quad (2.29)$$

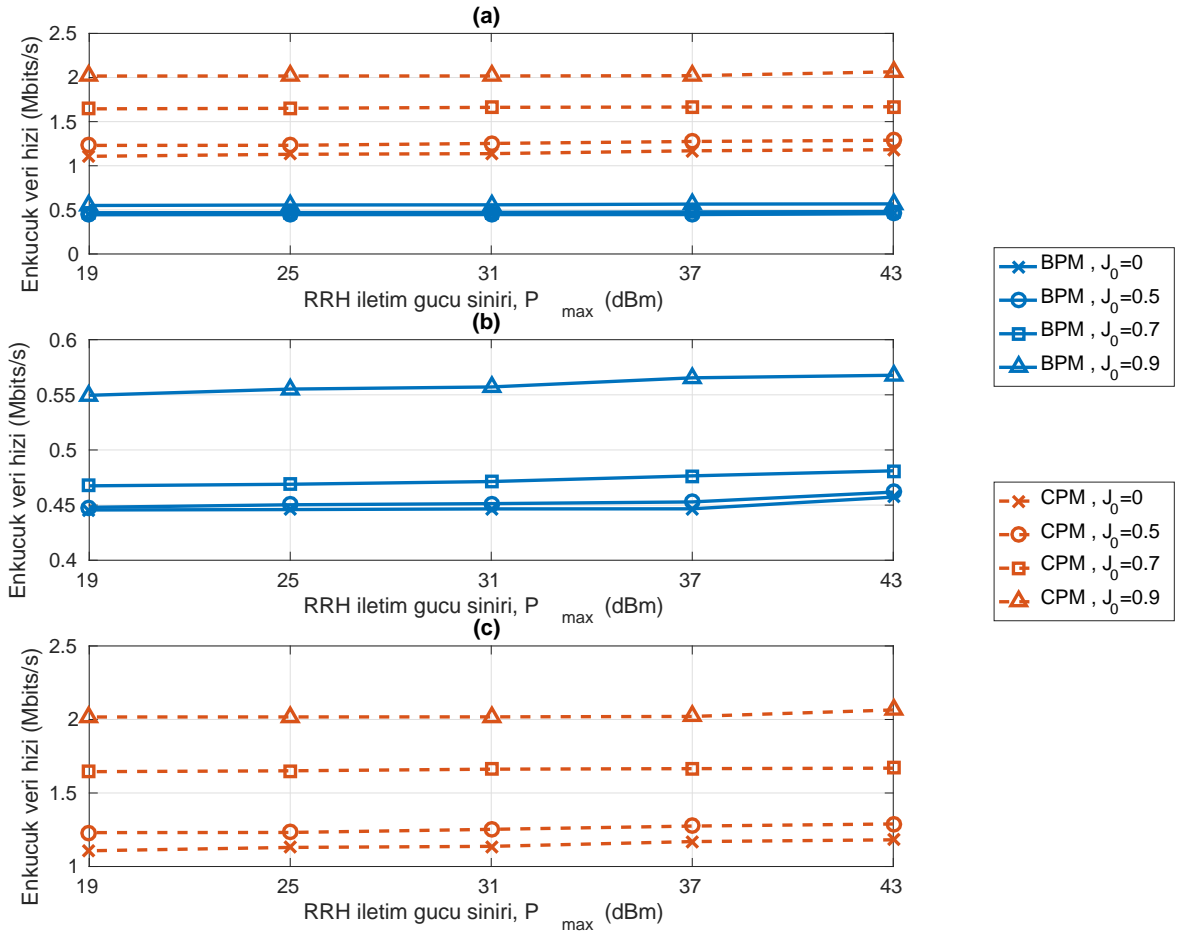
ile verilmektedir, burada birinci kısıtlar RRH'lerin iletim gücünü kısıtlamakta, ikinci kısıtlar ise kullanıcı veri hızlarını alttan sınırlamakta, üçüncü kısıt ise kullanıcılar arası adalet için Jain indeksini alttan sınırlandırmaktadır. Eşitlik (2.28)'deki BPM problemi için birinci kısıt aynı şekilde  $\alpha \circ (\mathbf{1}_{LM} - \alpha) = \mathbf{0}_{LM}$  olacak şekilde değiştirilebilir.

## Başarım Değerlendirmesi

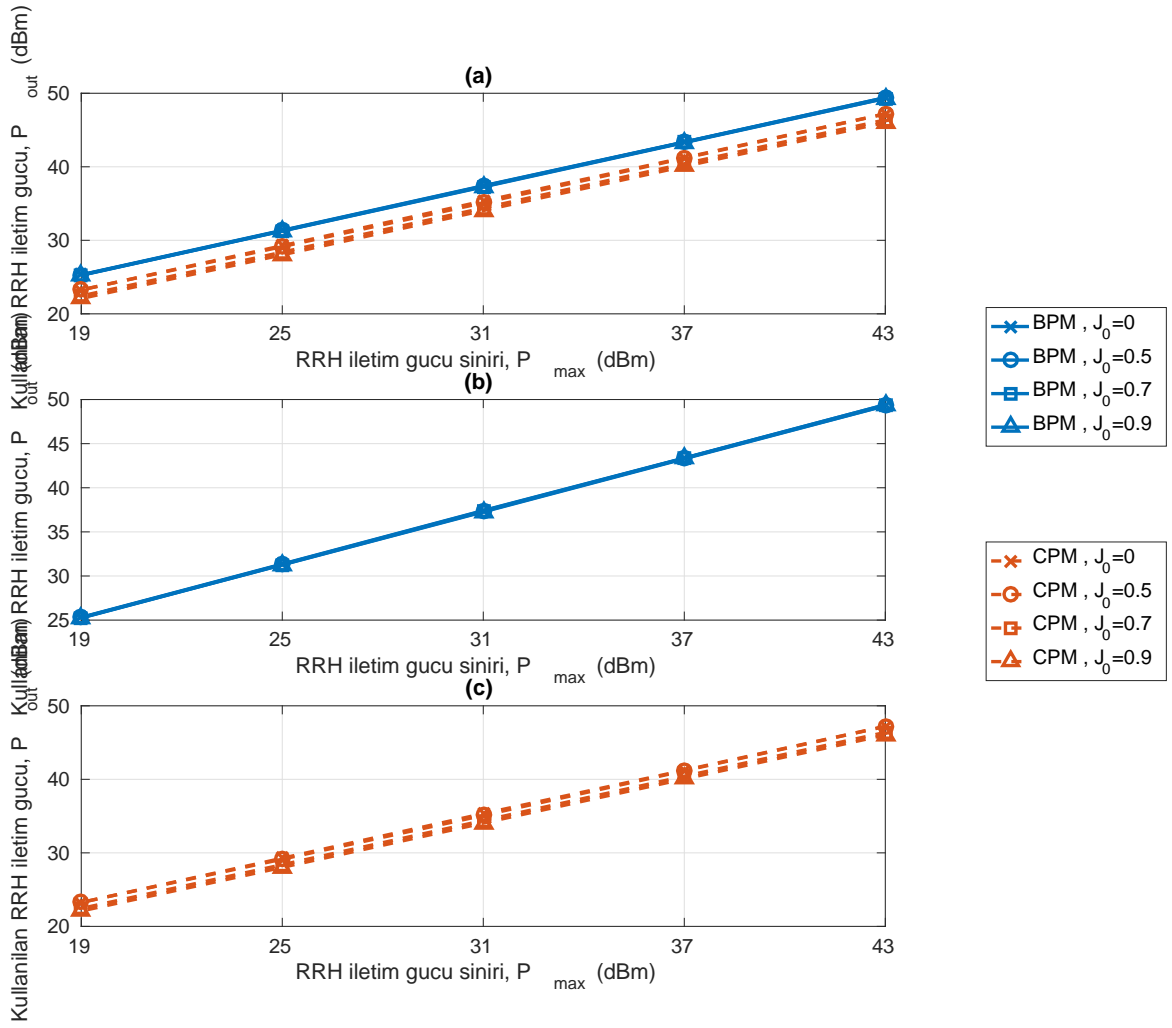
Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7, sırasıyla sistem genelindeki toplam veri hızının, en düşük veri hızının ve RRH'lerde kullanılan toplam iletim gücünün BPM ve CPM yöntemleri için RRH enbüyük güç sınırı  $P_{max}$  değerlerine göre değişimini göstermektedir. Enküçük kullanıcı veri hızı kısıtı  $r_0 = 0.1$  Mbps olarak seçilmektedir. Eniyilemeye Jain adaletliliği kısıtı eklenmesiyle  $P_{max}$  değerinin sistem başarımına etkisi azalmaktadır. Jain adaletliliği indeksinin ( $J_0$ ) artmasıyla sistem başarımı (toplam veri hızı) düşmekte, ancak en düşük kullanıcı veri hızı artmaktadır. Burada iletim gücü ve dolayısıyla girişim azaltılmakta, kullanıcıların veri hızları birbirine yaklaşmaya başlamaktadır. CPM, IM ve RRM konusunda BPM'e göre daha başarılıdır.



Şekil 2.5.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen toplam veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için toplam veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı.

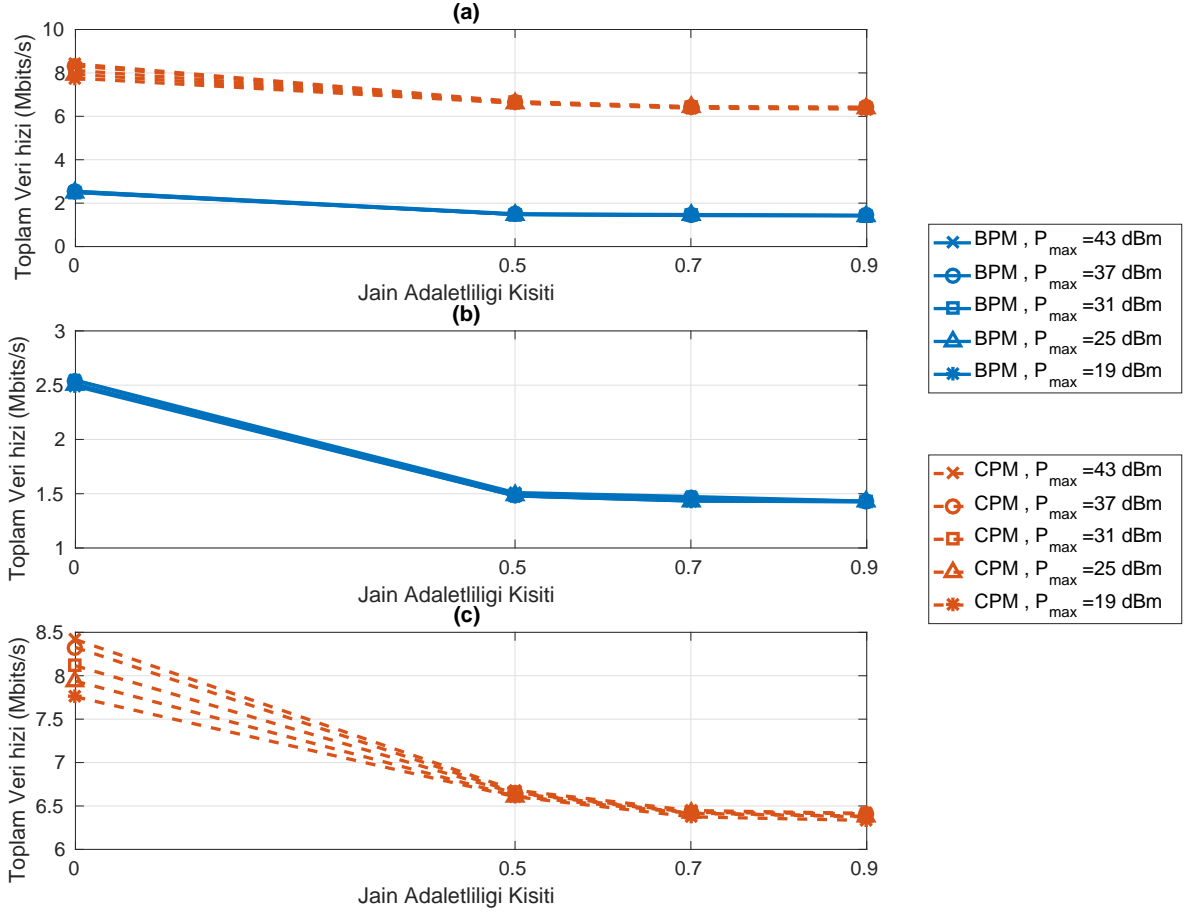


Şekil 2.6.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen topaktaki enküçük veri hızı başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için enküçük veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı.

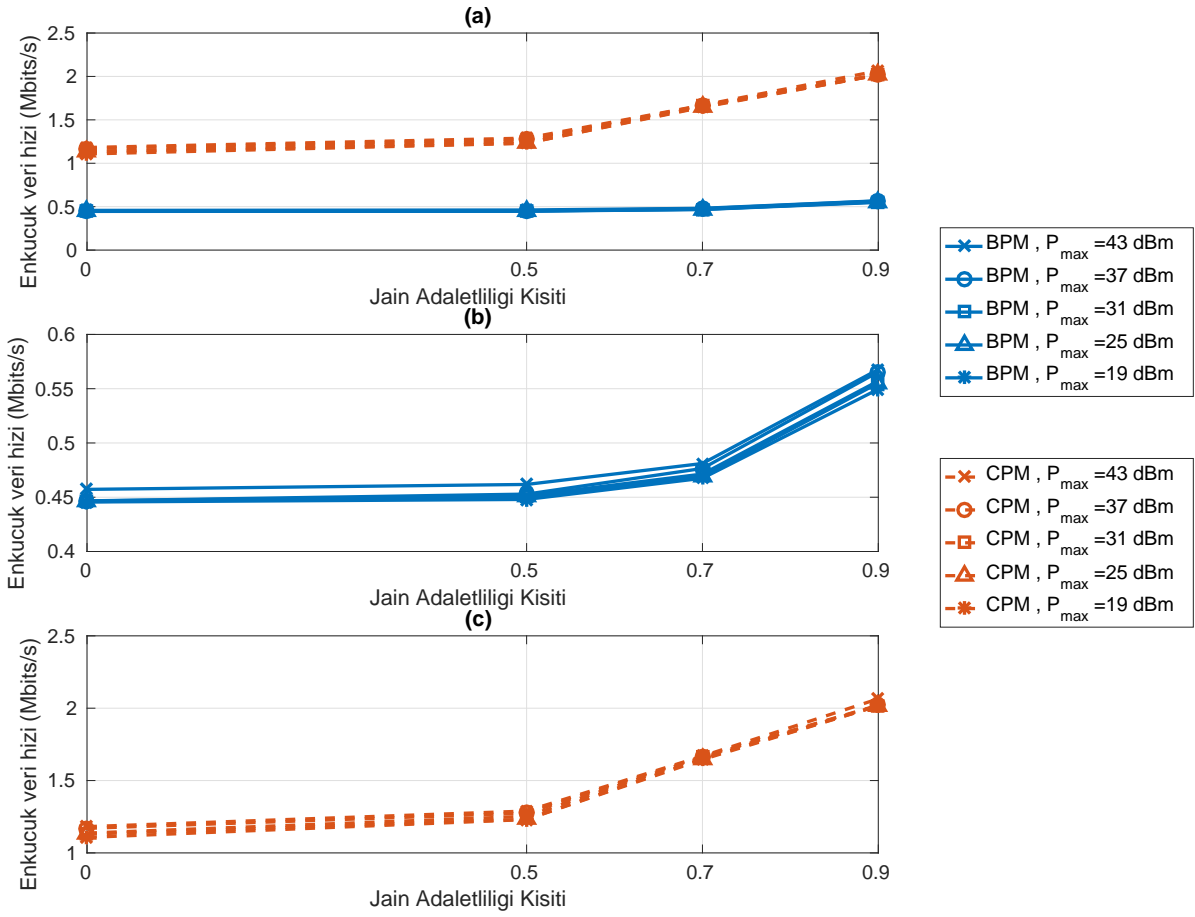


Şekil 2.7.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen harcanan iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımının azami iletim gücüne ( $P_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için harcanan iletim gücü başarımı. (b) BPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. (c) CPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı.

Şekil 2.8, Şekil 2.9 ve Şekil 2.10, sırasıyla sistem genelindeki toplam veri hızının, en düşük veri hızının ve kullanılan toplam iletim gücünün BPM ve CPM yöntemleri için farklı RRH enbüyük güç sınırı  $P_{max}$  değerleri için Jain adaletliliği indeksine göre değişimini göstermektedir. Enküçük kullanıcı veri hızı kısıtı  $r_0 = 0.1$  Mbps olarak seçilmektedir. Jain adaletliliği indeksinin ( $J_0$ ) artmasıyla sistem başarımı (toplam veri hızı) düşmekte, ancak en düşük kullanıcı veri hızı artmaktadır. Burada kullanıcıların veri hızları birbirine yaklaşılmaya başlamaktadır. CPM, IM ve RRM konusunda BPM'e göre daha olduğu için artan adaletlilik indeksi ile daha yüksek enküçük veri hızları sunmaktadır. Düşük Jain indeksi için  $P_{max}$  değerinin etkisi az da olsa görülmekte; ancak artan Jain indeksi ile toplam veri hızı başarımı belirli bir değere yakınsamaktadır. Burada oluşan girişim etkin bölgenin etkisi,  $P_{max}$  değerinin etkisinin azalmasında görülmektedir.

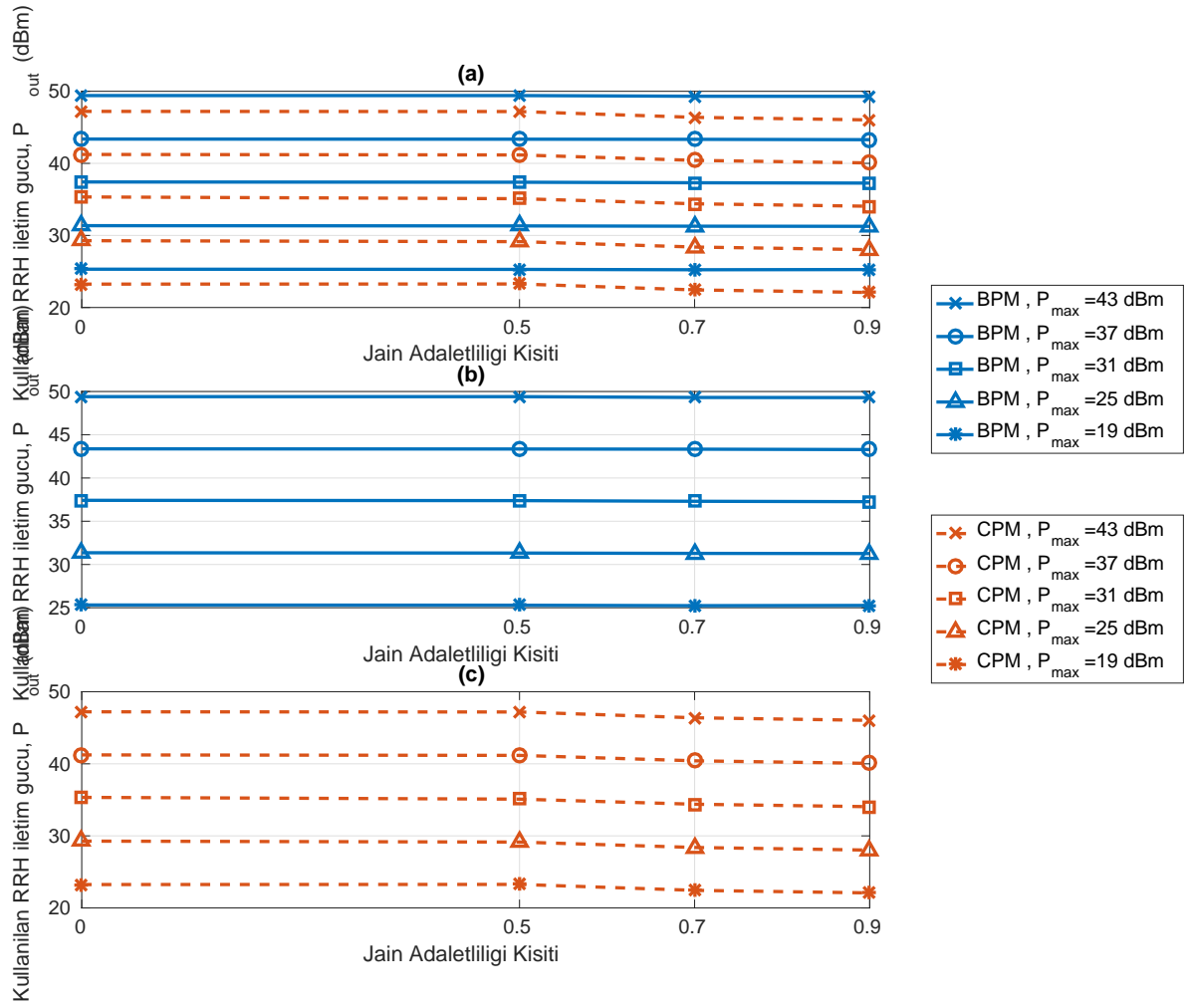


Şekil 2.8.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, toplaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen toplam veri hızı başarımının farklı azami iletim gücü ( $P_{max}$ ) değerleri için, Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için toplam veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için toplam veri hızı başarımı.



Şekil 2.9.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen topaktaki enküçük veri hızı başarımının farklı azami iletim gücü ( $P_{max}$ ) değerleri için, Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için enküçük veri hızı başarımı. (b) BPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı. (c) CPM yöntemi için enküçük veri hızı başarımı.





Şekil 2.10.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 1$  kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve farklı Jain adaletliliği indeksi kısıtları ( $J_0$ ) ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen harcanan iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımının farklı azami iletim gücü ( $P_{max}$ ) değerleri için, Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Hem BPM hem CPM yöntemleri için harcanan iletim gücü başarımı. (b) BPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı. (c) CPM yöntemi için harcanan iletim gücü başarımı.

### 2.3.1.2 Tek Taşıyıcılı ve Hücre Başına Çok Kullanıcılı Senaryo

#### Topaktaki En Düşük Veri Hızının Enbüyütülmesi

İletişim stratejisi sistem genelinde en düşük veri hızına sahip kullanıcının veri hızını enbüyütmektir. Problem formülasyonları BPM ve CPM için

$$\begin{aligned} \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \min r_{km}(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha_{\ell mk} \in \left\{ 0, \frac{1}{K_m} \right\}, \forall \ell, m, k, \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \text{CPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \min r_m(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \in [0, 1]^{LK_t}, \\ & \quad \left( \bigoplus_{n=1}^M \mathbf{1}_{K_n}^T / K_n \right) \otimes \mathbf{1}_L \alpha \leq \mathbf{1}_{LM} \end{aligned} \quad (2.31)$$

ile verilmektedir, burada her iki problem için de kısıtlar, RRH'lerin her bir kullanıcıya ayırdığı iletim gücünü kısıtlamaktadır. Eşitlik (2.30)'daki bir RRH'nin kontrol katsayısının 0 ya da  $\frac{1}{K_m}$  olması RRH'nin bütün kullanıcılar için kullandığı toplam iletim gücünü de doğası gereği  $P_{\max}$  ile kısıtlamaktadır. Bu kısıt her  $\ell$ ,  $m$  ve  $k$  değeri için  $\alpha_{\ell mk} \left( \frac{1}{K_m} - \alpha_{\ell mk} \right) = 0$  olacak şekilde, vektörel biçimde ise

$$\alpha \circ \left[ \bigoplus_{n=1}^M \frac{1}{K_n} \mathbf{1}_{LK_n}^T - \alpha^T \right]^T = \mathbf{0}_{LK_t}, \quad (2.32)$$

olarak değiştirilebilir. Burada  $\circ$  Hadamard çarpımını temsil etmektedir. Bu durumda Eşitlik (2.30)'daki BPM problemi yeni haliyle

$$\begin{aligned} \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} \quad \min r_{km}(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \circ \left[ \bigoplus_{n=1}^M \frac{1}{K_n} \mathbf{1}_{LK_n}^T - \alpha^T \right]^T = \mathbf{0}_{LK_t}, \end{aligned} \quad (2.33)$$

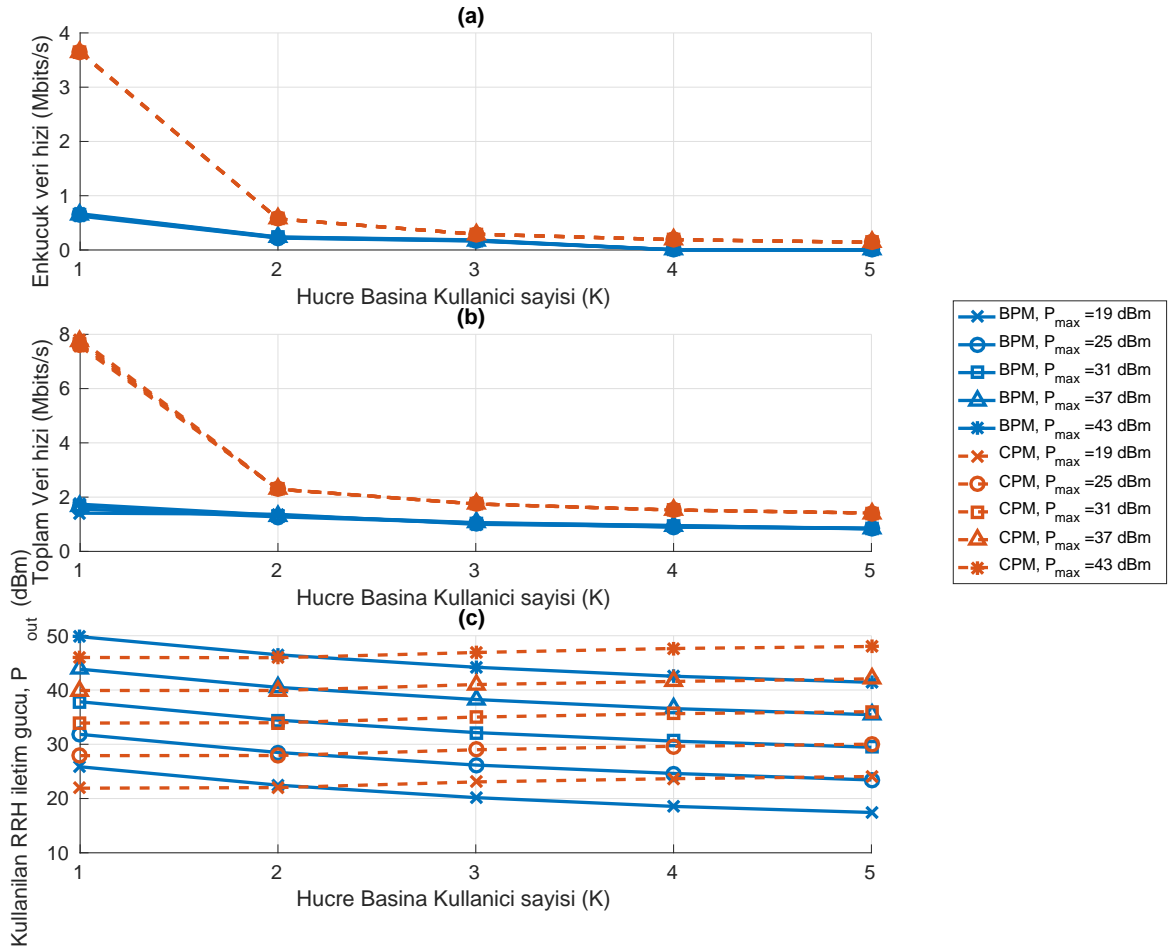
olarak düzenlenir.

Eşitlik (2.31)'de tanımlanan CPM problemi için matris formunda yazılan ikinci kısıt ise RRH'nin toplam iletim gücünü  $P_{\max}$  ile sınırlamaktadır. Her RRH için bulunan bu

kısıt açık olarak  $\ell = 1, \dots, L$  ve  $m = 1, \dots, M$  için  $\sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell km} \leq 1$  yazılır.  $\otimes$  Kronecker çarpımını,  $\oplus$  doğrudan toplam operatörünü,  $\mathbf{I}_L$  ve  $\mathbf{I}_{K_n}$ , sırasıyla  $(L \times L)$  ve  $(K_n \times K_n)$  boyutlarında birim matrisleri,  $\mathbf{1}_{K_n}$  ve  $\mathbf{1}_{LM}$ , sırasıyla  $(K_n \times 1)$  ve  $(LM \times 1)$  boyutlarında bütün elemanları bir olan sütun vektörlerini temsil etmektedirler.

### Başarım Değerlendirmesi

Şekil 2.11'de BPM ve CPM yöntemlerinde RRH enbüyük güç sınırı  $P_{\max}$  değerleri için en küçük veri hızı değerleri, sistem genelinde toplam veri hızı değerleri ve RRH'lerde kullanılan toplam iletim gücü değerlerinin kullanıcı sayısı ile değişimi gösterilmektedir. Gürültünün gücünün ( $N_0 = -174$  dBm/Hz , 1 RB için  $\sigma_{\eta}^2 \approx -122$  dBm) düşüklüğü dikkate alındığında ve her  $P_{\max}$  değeri için benzer sonuçların alındığı düşünüldüğünde girişim etkin bölge olduğu gözlemlenmektedir. CPM yöntemi her  $P_{\max}$  ve  $K$  değeri için BPM yöntemine göre oldukça başarılıdır. Bir başka deyişle, bütün RRH'leri açıp kapatmaktansa iletim gücünü ayarlamak beklendiği üzere daha iyi başarımlıdır. Kullanıcı sayısı arttıkça kısıtların etkisi artmakta ve kısıtlar daha düşük veri hızlarında sağlanabilmektedir. Kullanıcı sayısı arttıkça, BPM yönteminde girişim yönetimi için kullanılan iletim gücü düşürülmektedir, bunun yanında CPM yöntemi ile daha iyi başarımlı için bir miktar da olsa kullanılan iletim gücü artırılabilir, ancak bu artışın miktarı az olduğu için ileride tanımlanacak olan enerji verimliliğini düşürebilmektedir.



Şekil 2.11.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç kısıtı ile, topaktaki enküçük veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen farklı  $P_{max}$  değerleri için sistem başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Topaktaki enküçük veri hızı başarımı. (b) Topaktaki toplam veri hızı başarımı. (c) Topakta harcanan toplam iletim gücü ( $P_{out}$ ) başarımı.

## Enküçük Veri Hızı Kısıtı Altında Toplam Veri Hızının Enbüyütülmesi

En düşük veri hızına sahip kullanıcının başarımını enbüyütmeye çalışmak sistemde adaleti fazlasıyla sağlamaya çalışırken, sistem kapasitesini de düşürmektedir. Bu yüzden, bir önceki senaryo ile aynı senaryonun göz önünde alındığı, ancak, sistemdeki her kullanıcının başarımının belirli bir veri hızı değerinden büyük olma kısıtı ile Eşitlik (2.12)'de tanımlanan sistemdeki toplam veri hızının enbüyütülmesinin amaçlandığı problem formülasyonu aşağıda verilmektedir. Problem formülasyonları BPM ve CPM için

$$\begin{aligned}
 \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} R(\alpha) \\
 & \text{s.t.} \quad \alpha_{\ell mk} \in \left\{ 0, \frac{1}{K_m} \right\}, \quad \forall \ell, m, k, \\
 & \quad \quad r_{km}(\alpha) \geq r_0, \quad \forall k, m.
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CPM:} \quad & \max_{\alpha} R(\alpha) \\
 & \text{s.t.} \quad \alpha \in [0, 1]^{LK_t}, \\
 & \quad \quad \left( \bigoplus_{n=1}^M \mathbf{1}_{K_n}^T \mathbf{I}_{K_n} \right) \otimes \mathbf{I}_L \alpha \leq \mathbf{1}_{LM}. \\
 & \quad \quad r_{km}(\alpha) \geq r_0, \quad \forall k, m.
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

ile verilmektedir, burada kısıtlar bir önceki problem ile aynı olmakla beraber ek olarak en düşük veri hızı kısıtı getirilmektedir. Bir önceki kısımda olduğu gibi Eşitlik (2.34)'te tanımlanan BPM eniyileme probleminin birinci kısıtı

$$\alpha_{\ell mk} \left( \frac{1}{K_m} - \alpha_{\ell mk} \right) = 0, \quad \forall \ell, m, k, \tag{2.36}$$

olacak şekilde, vektörel biçimde ise

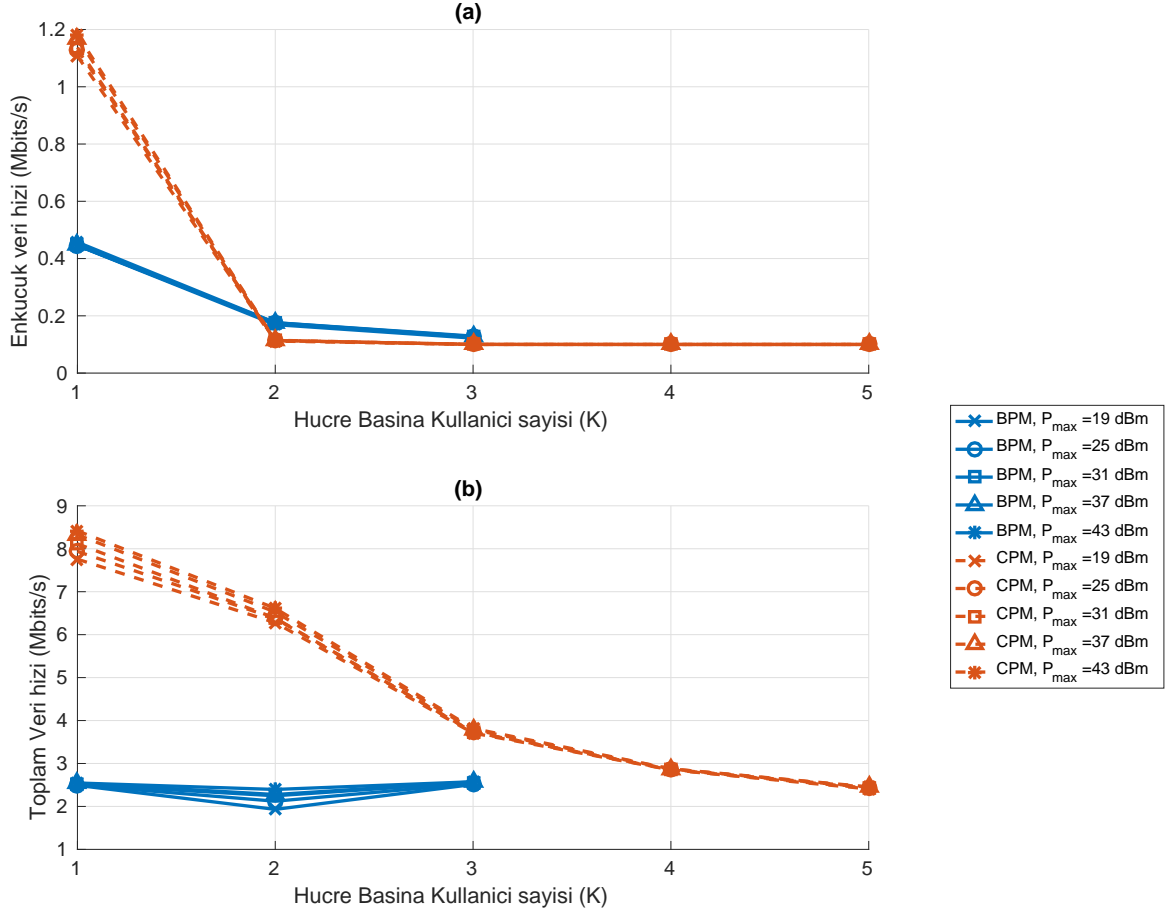
$$\alpha \circ \left[ \bigoplus_{n=1}^M \frac{1}{K_n} \mathbf{1}_{LK_n}^T - \alpha^T \right]^T = \mathbf{0}_{LK_t}, \tag{2.37}$$

olarak değiştirilebilir.

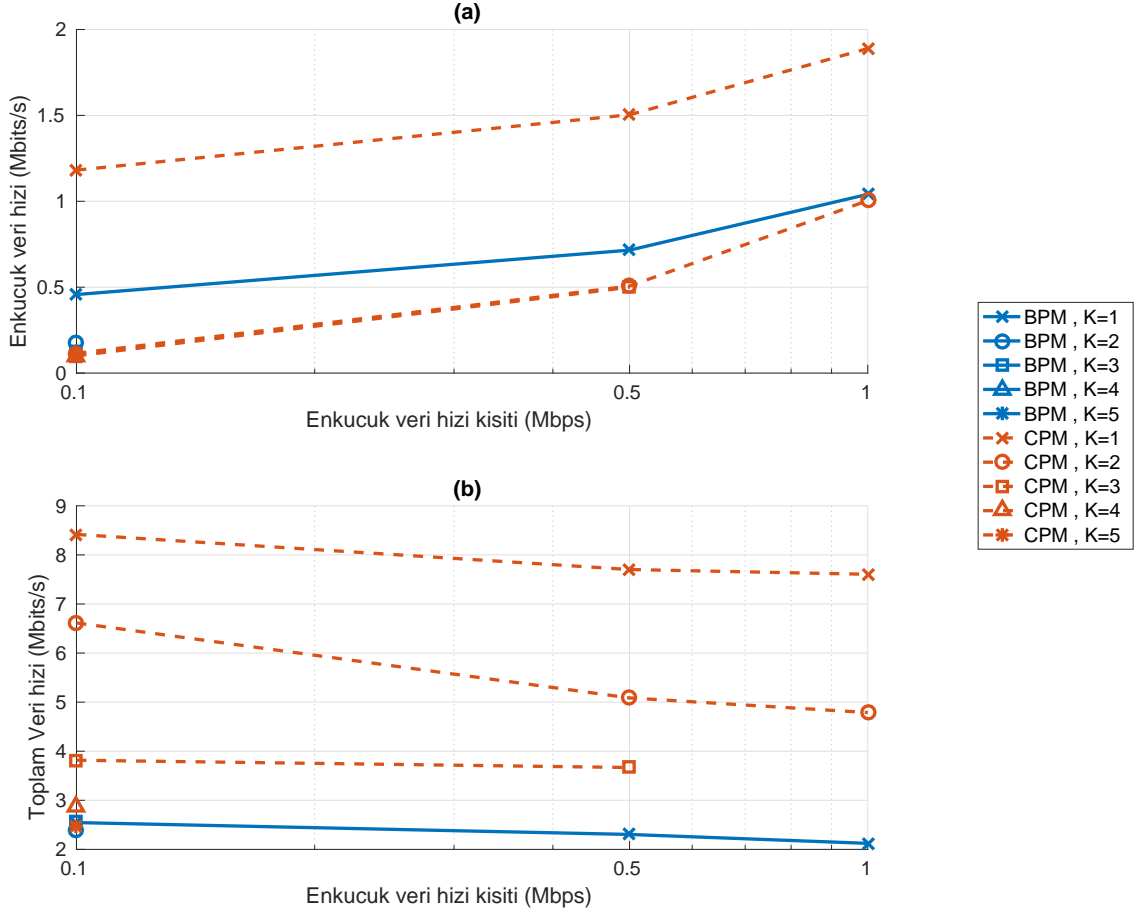
## Başarım Değerlendirmesi

Şekil 2.12'de BPM ve CPM yöntemleri için farklı RRH enbüyük güç sınırı  $P_{max}$  değerleri için toplam veri hızı değerleri ve en düşük kullanıcı veri hızının hücredeki kullanıcı sayısına göre değişimi incelenmektedir. CPM yöntemi için kullanıcı sayısı arttıkça kısıtların girişim yönetimindeki etkisi artmakta, ve hem en düşük kullanıcı veri hızı, hem de toplam veri hızı düşmektedir. BPM yönteminde BBU'lar, kullanılan iletim gücünü kullanıcılar arasında paylaştığı ve daha az güç ile iletim yaptığı için girişim yönetimi çok fazla etkilenmemektedir, bu sebeple toplam veri hızı benzer değerler almakta; ancak kullanıcı çeşitlemesi ile az da artış göstermektedir. Bu senaryoda CPM yöntemi BPM'e göre,  $K = 1$  için yaklaşık 3 kattan daha fazla yüksek veri hızı sunmaktadır, ancak kullanıcı sayısı arttıkça artan kısıtların sağlanabilmesi için veri hızları düşmekte ve dolayısıyla bu fark azalmaktadır. BPM yöntemi hücre başına en fazla  $K = 3$  kullanıcı olduğu durumu destekleyebilmektedir, daha fazlası için girişimin yeterince yok edilememesi sebebiyle kısıtlar sağlanamamaktadır. Gürültünün gücünün girişim değerlerine göre düşük olması sebebiyle farklı  $P_{max}$  değerleri için benzer sonuçlar alınmaktadır. Artan  $P_{max}$  değerlerine göre BPM'de fazla değişim gözlenmemekte; ancak CPM yönteminde, kısıtların daha esnek olduğu  $K = 1$  değeri için artan  $P_{max}$  değerleri ile bir miktar da olsa başarımlar artışı gözlenmektedir.

Şekil 2.13'te sırasıyla, sistemdeki en düşük veri hızının ve kullanılan toplam iletim gücünün  $P_{max}$  ve  $r_0$  değerlerine göre değişimi gösterilmektedir. En düşük veri hızı kısıtı sıkılaştırıldığında, yani yüksek veri hızı istendiğinde, kötü kanala sahip kullanıcılara daha fazla güç ile iletim yaparak veri hızını artırırken toplam veri hızı düşmektedir. En düşük veri hızı kısıtı artırıldığında, desteklenen kullanıcı sayıları düşmektedir. Şekil 2.12'de  $r_0 \geq 0.1$  Mbps kısıtı için BPM yöntemi hücre başına en fazla 3 kullanıcı destekleyebilmekteydi, daha büyük en düşük veri hızı kısıtları için BPM en fazla  $K = 1$  kullanıcı destekleyebilmektedir. CPM yöntemi ile,  $r_0 \geq 0.5$  Mbps için hücre başına en fazla  $K = 3$  kullanıcı,  $r_0 \geq 1$  Mbps için hücre başına en fazla  $K = 2$  kullanıcı desteklenebilmektedir.



Şekil 2.12.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle farklı  $P_{max}$  değerleri için elde edilen sistem başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı.



Şekil 2.13.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç ve enküçük veri hızı ( $r_0$  Mbps) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle  $P_{\max} = 43$  dBm için elde edilen sistem başarımının farklı hücre başına kullanıcı sayıları ( $K$ ) için enküçük veri hızı kısıtına ( $r_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı.



## Jain Adaletliliği Kısıtı Altında Toplam Veri Hızının Enbüyütülmesi

İletişim stratejisi yine sistem genelinde toplam veri hızını enbüyütme olmakla birlikte, sistemde adaleti sağlamak için Jain Adaletliliği kısıtı eklenmektedir. Bir önceki kısımda olduğu gibi BPM eniyileme probleminin kullanıcılara ayırdıkları güç kısıtı  $\alpha_{\ell mk} \in \left\{0, \frac{1}{K_m}\right\}$

$$\alpha \circ \left[ \bigoplus_{n=1}^M \frac{1}{K_n} \mathbf{1}_{LK_n}^T - \alpha^T \right]^T = \mathbf{0}_{LK_t}, \quad (2.38)$$

olarak değiştirildiğinde, problem formülasyonları BPM ve CPM için

$$\begin{aligned} \text{BPM:} \quad & \max_{\alpha} R(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \circ \left[ \bigoplus_{n=1}^M \frac{1}{K_n} \mathbf{1}_{LK_n}^T - \alpha^T \right]^T = \mathbf{0}_{LK_t}, \\ & r_{km}(\alpha) \geq r_0, \quad \forall k, m. \\ & J(\alpha) \geq J_0. \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \text{CPM:} \quad & \max_{\alpha} R(\alpha) \\ & \text{s.t.} \quad \alpha \in [0, 1]^{LK_t}, \\ & \left( \bigoplus_{n=1}^M \mathbf{1}_{K_n}^T \mathbf{1}_{K_n} \right) \otimes \mathbf{1}_L \alpha \leq \mathbf{1}_{LM}. \\ & r_{km}(\alpha) \geq r_0, \quad \forall k, m. \\ & J(\alpha) \geq J_0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

ile verilmektedir. Bu eniyileme probleminde bir önceki probleme ek olarak gelen Jain adaletlilik indeksi problem için

$$J(\alpha) = \frac{\left( \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{km}(\alpha) \right)^2}{MK \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{km}^2(\alpha)}. \quad (2.41)$$

olarak düzenlenir.

## Başarım Değerlendirmesi

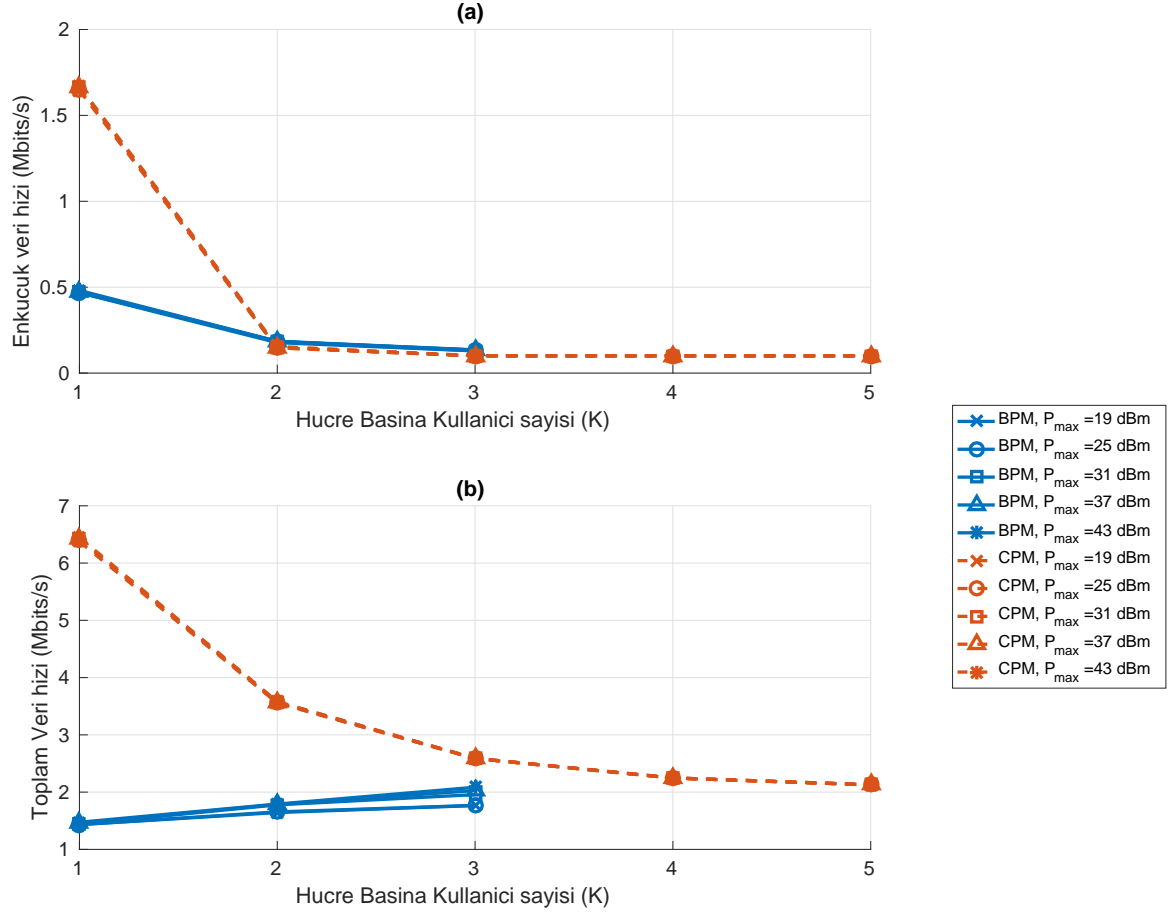
Şekil 2.14'te BPM ve CPM yöntemleri için farklı RRH enbüyük güç sınırı  $P_{\max}$  değerleri için toplam veri hızı ve en düşük kullanıcı veri hızı değerlerinin hücredeki kullanıcı sayısına göre değişimi incelenmektedir. Şekil 2.15'te ise sistemdeki en düşük veri hızının ve RRH'lerde kullanılan toplam iletim gücünün  $P_{\max}$  ve Jain adaletliliği indeksi ( $J_0$ ) kısıtı değerlerine göre değişimi gösterilmektedir. Kullanıcı sayısının artmasıyla, hem girişim artmakta hem de adaletlilik kısıtı daha da sıkılaşmaktadır, ve adaletin sağlanabilmesi için kullanıcılar daha düşük veri hızlarında servis almaya başlamaktadırlar. Artan kullanıcı sayısı ile en küçük veri hızı değeri ilgili kısıta yakın yerlere doğru yaklaşmaktadır, ve bu davranış hem BPM hem CPM yöntemi için geçerlidir.  $J_0$  değeri artırıldıkça beklendiği üzere kullanıcıların veri hızları birbirine daha yakın olmaya zorlanmakta, bu sebeple, en yüksek veri hızı düşmekte ve en düşük veri hızı artmaktadır. Ancak  $K > 1$  için, az önce bahsedilen kullanıcı sayısının adaletlilik kısıtını etkileyerek kullanıcıların veri hızlarını düşürmesi sebebiyle en küçük veri hızının artışı oldukça düşüktür.

CPM yöntemi için kullanıcı sayısı artıkça veya Jain adaletliliği indeksi büyüdükçe kısıtların girişim yönetimindeki etkisi artmakta, ve toplam veri hızı düşmektedir. BPM yönteminde Jain adaletliliği kısıtı yine benzer şekilde etki etmekte, ve artıkça toplam veri hızı düşmektedir; ancak kullanıcı sayısının etkisi farklıdır. BPM yönteminde BBU'lar, kullanılan iletim gücünü kullanıcılar arasında paylaştırdığı ve daha az güç ile iletim yaptığı için girişim yönetimi çok fazla etkilenmemektedir, hatta kullanılan iletim gücü düştüğü için oluşturduğu girişimin azalması sebebiyle toplam veri hızı değerleri (belli bir değere kadar) yükselmektedir. Kullanıcı sayısı çok arttığında ( $K > 3$ ), kısıtlar sağlanamadığı için kullanıcıları destekleyememektedir.

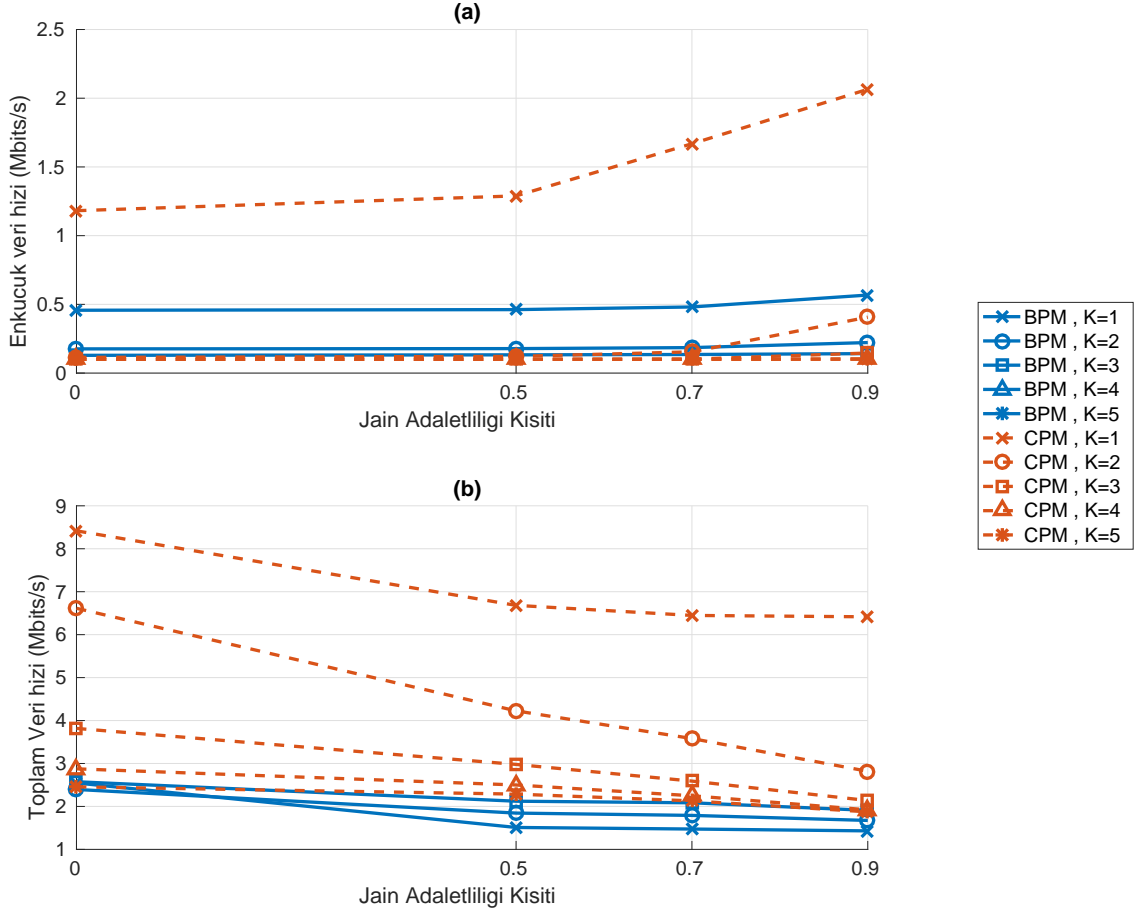
Bu senaryoda CPM yöntemi BPM'e göre,  $J_0 = 0.7$  ve hücre başına  $K = 1, 2, 3$  kullanıcı için daha fazla yüksek veri hızı sunmaktadır, ancak kullanıcı sayısı artıkça artan kısıtların sağlanabilmesi için veri hızları düşmekte ve dolayısıyla bu fark azalmaktadır. Gürültünün gücünün girişim değerlerine göre düşük olması sebebiyle her iki yöntemde de farklı  $P_{\max}$  değerleri için benzer sonuçlar alınmaktadır.

Jain adaletliliği kısıtı sıkıştırıldığında, desteklenen kullanıcı sayıları düşmektedir. Şe-

kil 2.15'te  $J_0 \leq 0.7$  için BPM yöntemi hücre başına en fazla 3 kullanıcı destekleyebilirken,  $J_0 = 0.9$  en fazla  $K = 2$  kullanıcı destekleyebilmektedir. CPM yöntemi ile, her  $J_0$  değeri için hücre başına  $K = 5$  kullanıcıya kadar hizmet verilebilmektedir.



Şekil 2.14.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle elde edilen sistem başarımının farklı  $P_{max}$  değerleri için hücre başına kullanıcı sayısı (K) ile değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı.



Şekil 2.15.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 1$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtı ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC kullanılmaktadır ve hem BPM hem CPM yöntemleriyle  $P_{\max} = 43$  dBm için elde edilen sistem başarımının farklı hücre başına kullanıcı sayıları ( $K$ ) için Jain adaletliliği indeksi kısıtına ( $J_0$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) Enküçük veri hızı başarımı. (b) Toplam veri hızı başarımı.

Tek taşıyıcı ( $N = 1$ ) senaryolar hem BBU'ların ya tam güçle çalıştığı ya da çalışmadığı BPM için hem de azami güç değerine kadar herhangi bir güç ile iletim yapabildiği CPM için incelenmektedir. İlerleyen kısımlardaki çok taşıyıcı senaryolar için sadece CPM yöntemi ile sistem eniyilemesi yapılmaktadır.

### 2.3.1.3 Çok Taşıyıcılı ve Hücre Başına Çok Kullanıcılı Senaryo

Önceki kısımlarda CPM tasarısının BPM'e göre üstünlüğü gösterilmektedir. Bu kısımda çok taşıyıcılı sisteme geçilerek, NOMA tekniğinin getirdiği avantajlar üzerinde durulmaktadır. Karmaşıklığı artırmamak ve çok sayıda kullanıcıya daha rahat hizmet verilebilmesi amacıyla, çok taşıyıcılı sistemlerde sadece sürekli güç yönetimi (CPM) tasarısı kullanılarak eniyileme problemi düzenlenmektedir. NOMA tekniğinin getirdiği kazanımın incelenebilmesi için dikgen çoklu erişim (OMA) tasarımlarıyla da sistem başarımı incelenmektedir. Bu yöntemde, bütün kullanıcıların hizmet görmesi şartıyla birlikte, her RB her hücrede sadece bir kullanıcı tarafından kullanılabilir. Zaman ve kod bölgelerinin düşünülmediği bir durumda, bu koşulun doğası gereği RB sayısı hücredeki kullanıcı sayısından fazla olmalıdır, bir başka deyişle  $N \geq K_n$  olmalıdır, ve böylece alınan sinyaldeki kullanıcılar arası girişim yok olacaktır.

#### OMA için Kullanıcı - RB Çiftlerinin Belirlenmesi

OMA tasarısı için RB tahsisi algoritması şu şekilde tanımlanmaktadır: Her kullanıcının her RB için sinyal gürültü oranı (SGO) hesaplanır, ve her hücrede en yüksek SGO değerine sahip kullanıcı bu değere ulaştığı kaynak bloğunu kullanma hakkını elde eder. Daha sonra bu kullanıcı-RB çifti hariç tutularak, her kullanıcıya RB tahsis edilene kadar bu yordam tekrar edilir. RB sayısının kullanıcı sayısından fazla olduğu durumlarda, fazlalık RB'ler tamamen tahsis edilene kadar yordam devam eder. Algoritmanın çıktısında elde edilen kullanıcı-RB çiftlerinin bilgisini taşıyan  $\pi_m \in \mathbb{R}^N$  vektörünün  $i$ 'inci elemanı ( $\pi_m(i)$ ),  $i$ 'inci RB'nin tahsis edildiği kullanıcıyı göstermektedir.

Her hücre için RB sayısının kullanıcı sayısından küçük olmama şartıyla birlikte,  $N \geq K_m, \forall m$ , OMA kaynak tahsisi yordamı, Ekler'de tanımlanan Algoritma ??'de verilmektedir.

## Eniyileme Problemi

Maliyet işlevi olarak topaktaki toplam veri hızının, enerji verimliliğinin ve ödünleşimli enerji verimliliğinin eniyileştirildiği senaryolarda, sistemde adaleti sağlamak için Jain Adaletliliği ve enküçük kullanıcı veri hızı kısıtlarının kullanıldığı, RRH'lerin azami iletim gücünün sınırlandırıldığı eniyileme problemi Sürekli Güç Yönetimi (CPM) tasarısı için

$$\begin{aligned}
 \max_{\alpha} \quad & \Psi(\alpha) \\
 \text{s.t.} \quad & \alpha \in [0, 1]^{LK_tN}, \\
 & \left[ \bigoplus_{i=1}^N \left( \bigoplus_{n=1}^M \mathbf{1}_{K_n}^T \mathbf{A}_{K_n}^i \right) \otimes \mathbf{I}_L \right] \alpha \leq \mathbf{1}_{LM}, \\
 & r_{km}(\alpha) \geq r_0, \quad \forall k, m. \\
 & J(\alpha) \geq J_0.
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

ile verilmektedir, burada  $\Psi(\alpha)$  maliyet işlevini, birinci kısıt RRH'lerin her bir kullanıcıya her RB üzerinde ayırdığı iletim gücünü  $[0, P_{\max}]$  aralığında olması ile kısıtlamaktadır. Matris biçiminde yazılan ikinci kısıt ise  $LM$  adet RRH'nin her birinin toplam iletim gücünü  $P_{\max}$  ile sınırlamaktadır. Her RRH için bulunan bu kısıt açık olarak  $\ell = 1, \dots, L$  ve  $m = 1, \dots, M$  için

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell m k i} \leq 1 \tag{2.43}$$

olarak yazılabilir.  $\bigoplus$  yatay birleştirme operatörünü,  $\otimes$  Kronecker çarpımını,  $\bigoplus$  doğrudan toplam operatörünü,  $\mathbf{I}_L$  ve  $\mathbf{I}_{K_n}$ , sırasıyla  $(L \times L)$  ve  $(K_n \times K_n)$  boyutlarında birim matrisleri,  $\mathbf{1}_{K_n}$  ve  $\mathbf{1}_{LM}$ , sırasıyla  $(K_n \times 1)$  ve  $(LM \times 1)$  boyutlarında bütün elemanları bir olan sütun vektörlerini temsil etmektedirler. Kaynak tahsisi matrisi OMA için  $\mathbf{A}_{K_n}^i = \mathbf{S}_{K_n}^{\pi_n(i)}$ , NOMA için  $\mathbf{A}_{K_n}^i = \mathbf{I}_{K_n}$  olacak şekilde seçilir. Burada  $\mathbf{S}_{K_n}^{\pi_n(i)}$ ,  $(K_n \times K_n)$  boyutlarında, sadece  $(\pi_n(i), \pi_n(i))$ 'inci elemanlarının bir, geri kalan elemanlarının sıfır olduğu tek girdi matrisidir ve Algoritma ?? ile eniyilenmektedir. Son iki kısıt ise sırasıyla kullanıcıların en düşük veri hızını ve sistem genelinde Jain adaletliliğini alttan sınırlamak için kullanılmaktadır. Jain adaletliliği indeksi, eniyileme problemi için yine

aynı şekilde

$$J(\alpha) = \frac{\left( \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{km}(\alpha) \right)^2}{MK \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{km}^2(\alpha)} \quad (2.44)$$

olarak düzenlenir.

### Toplam Veri Hızının Enbüyütülmesi

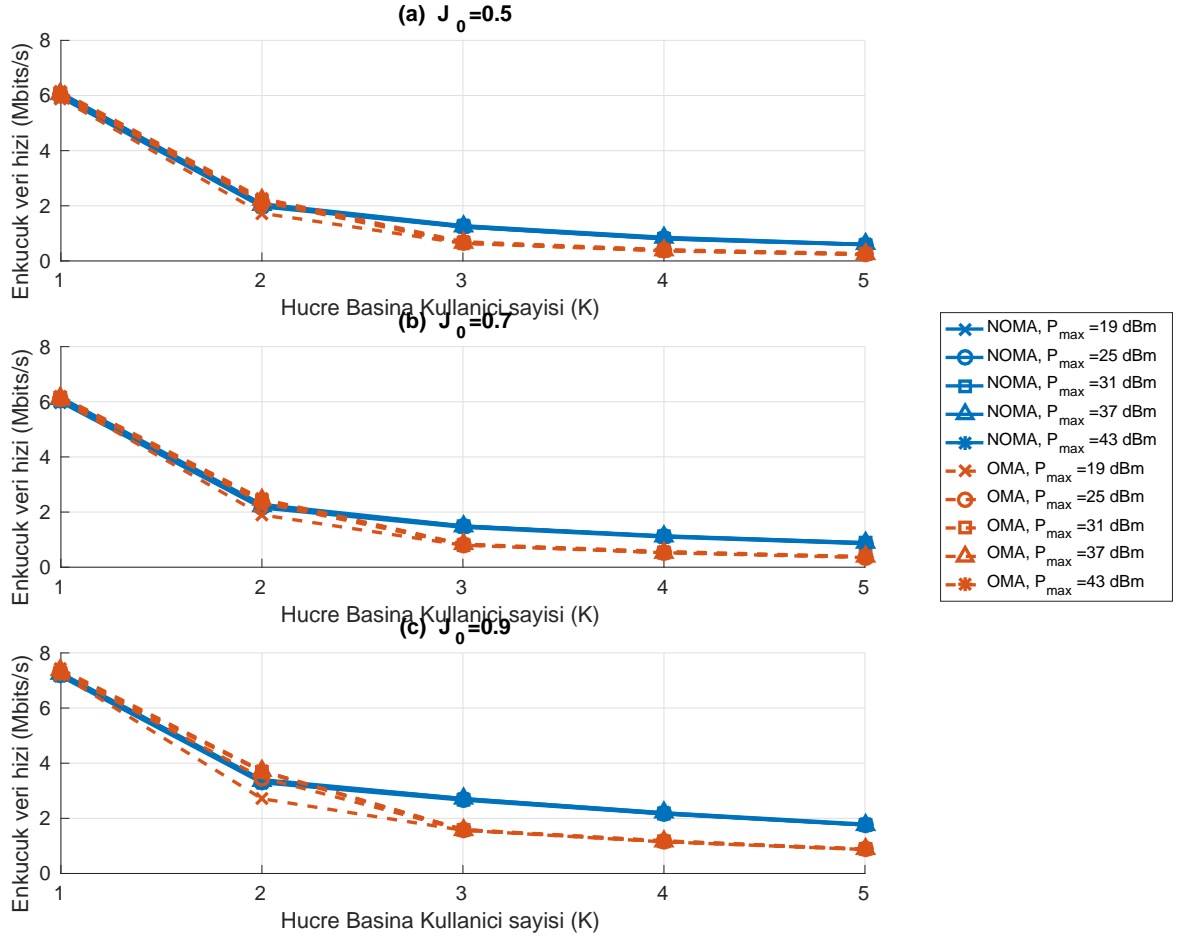
Haberleşme stratejisinin sistem genelinde toplam veri hızının enbüyütülmesi olduğu bu senaryoda, Eşitlik (2.42)'deki maliyet işlevi,  $\Psi(\alpha)$ , Eşitlik (2.12)'de tanımlanan  $R(\alpha)$  olarak seçilmektedir, yani,  $\Psi(\alpha) = R(\alpha)$ .

### Başarım Değerlendirmesi

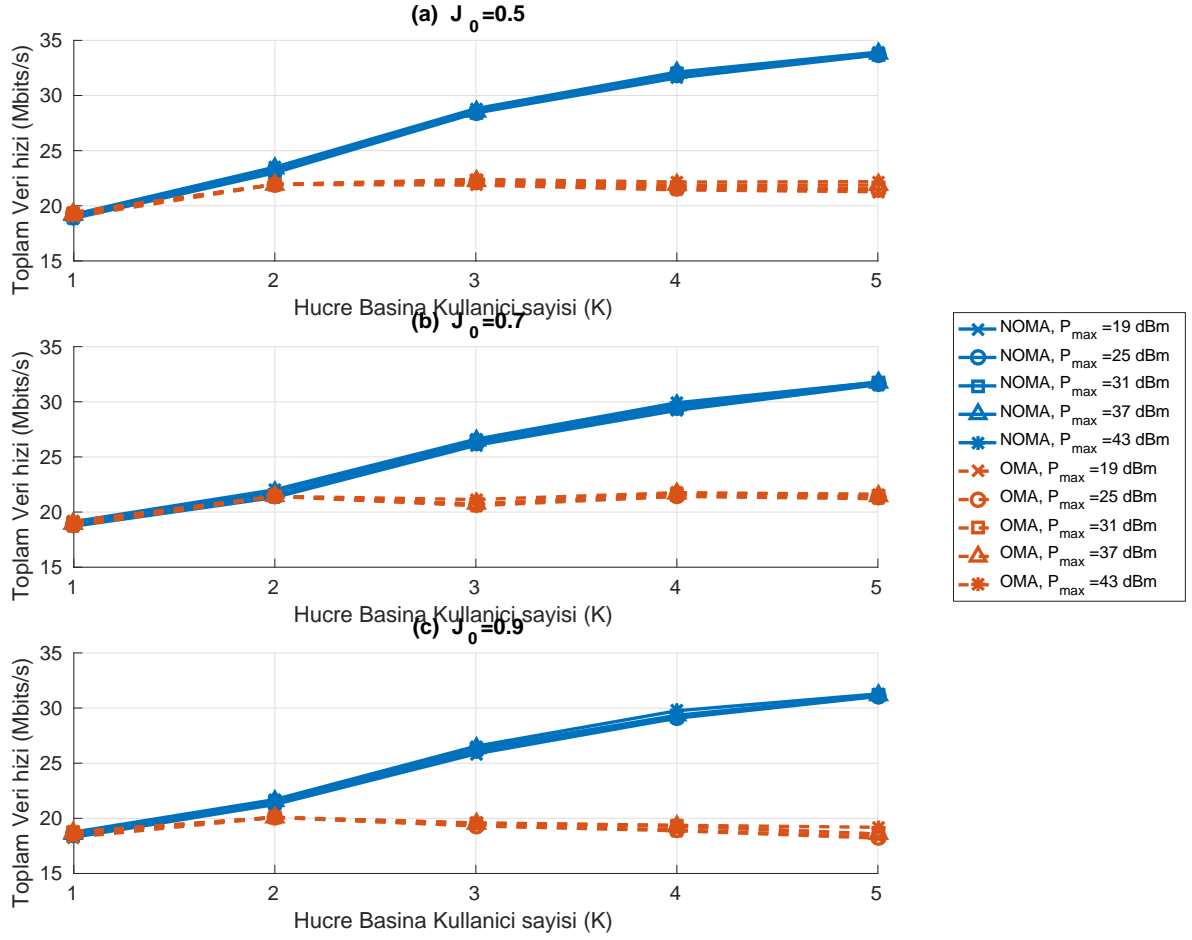
Şekil 2.16'da ve Şekil 2.17'de sistem genelindeki toplam veri hızının enbüyütüldüğü problem formülasyonunda,  $r_0 = 0.1$  Mbps, farklı  $J_0$  değerleri, ve  $N = 5$  RB için, sırasıyla en düşük kullanıcı veri hızının ve toplam veri hızının, kullanıcı sayısına göre değişimi incelenmektedir. Bu inceleme hem NOMA hem de OMA için CPM yöntemine dayanarak yapılmaktadır.  $P_{\max}$  değerinin değişmesinin, büyük ölçekte başarıımı neredeyse hiç etkilemediği gözlemlenmektedir, burada gürültünün gücünün kullanılan iletim gücüne, dolayısıyla girişim gücüne göre oldukça küçük olması ve CPM yöntemi ile her güç değerinde iletim yapılabilmesi etkilidir. Hücre başına kullanıcı sayısı arttıkça en küçük kullanıcı veri hızı azalmakta, toplam veri hızı ise NOMA için artmaktadır, burada NOMA'nın yapısı gereği sunduğu yüksek serbestlik derecesi etkilidir; ancak OMA yönteminde, her kullanıcıya en az 1 RB düşmekte ve girişim giderilse de serbestlik derecesi düşmektedir.  $K = 2$  kullanıcı için bantgenişliğinden en yüksek verimde yararlanabilmekte; ancak artan kullanıcı sayısı ile toplam veri hızı ya değişmemekte ya da az miktarda düşmektedir. bu düşüş Jain adaletliliği kısıtının sıkılaştırılmasına bağlıdır, ki adalet kısıtı sıkılaştıkça, daha önceki kısımlarda anlatılan sebeplerle en küçük kullanıcı veri hızı da artmaktadır. Burada artışın NOMA kadar olmamasının sebebi, bantgenişliğinin ve OMA'nın girişim yönetimi yeteneğinin kısıtlı olması sebebiyle iletim gücünün kullanıcılar arasında neredeyse eşit bölüştürülmesidir.



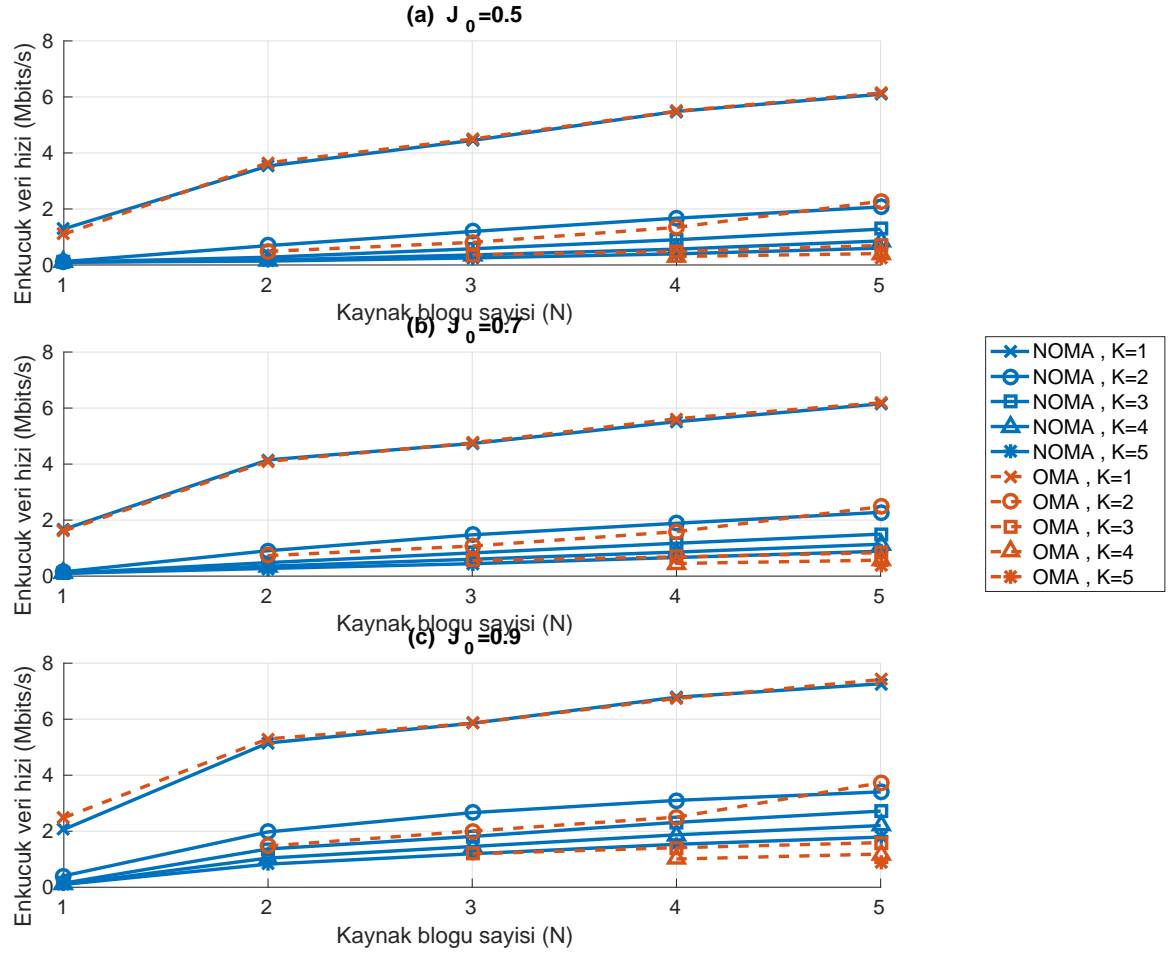
Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da sırasıyla en düşük kullanıcı veri hızının ve toplam veri hızının,  $r_0 \geq 0.1$  Mbps,  $P_{\max} = 43$  dBm ve farklı  $J_0$  değerleri için hücre başına kullanıcı sayısı ve mevcut olan toplam kaynak sayısına göre davranışları incelenmektedir. Beklenildiği üzere kullanılan kaynak bloğu sayısı arttıkça en düşük kullanıcı veri hızı ( $r_{\min}$ ) de artmaktadır. Önceki kısımlarla uyumlu olarak  $K$  değeri arttıkça  $r_{\min}$  değeri de düşmektedir. NOMA tekniği kullanıldığında,  $N = 1$  için kullanıcı sayısı arttıkça toplam veri hızı düşmekte, ancak birden fazla RB sayısı için kullanıcı sayısı ile paralel bir şekilde başarımlar da arttığı gözlemlenmektedir. OMA tekniği ise RB sayısı kadar kullanıcı desteklediği için,  $N < K$  için başarımlar sıfır olarak görünmektedir.



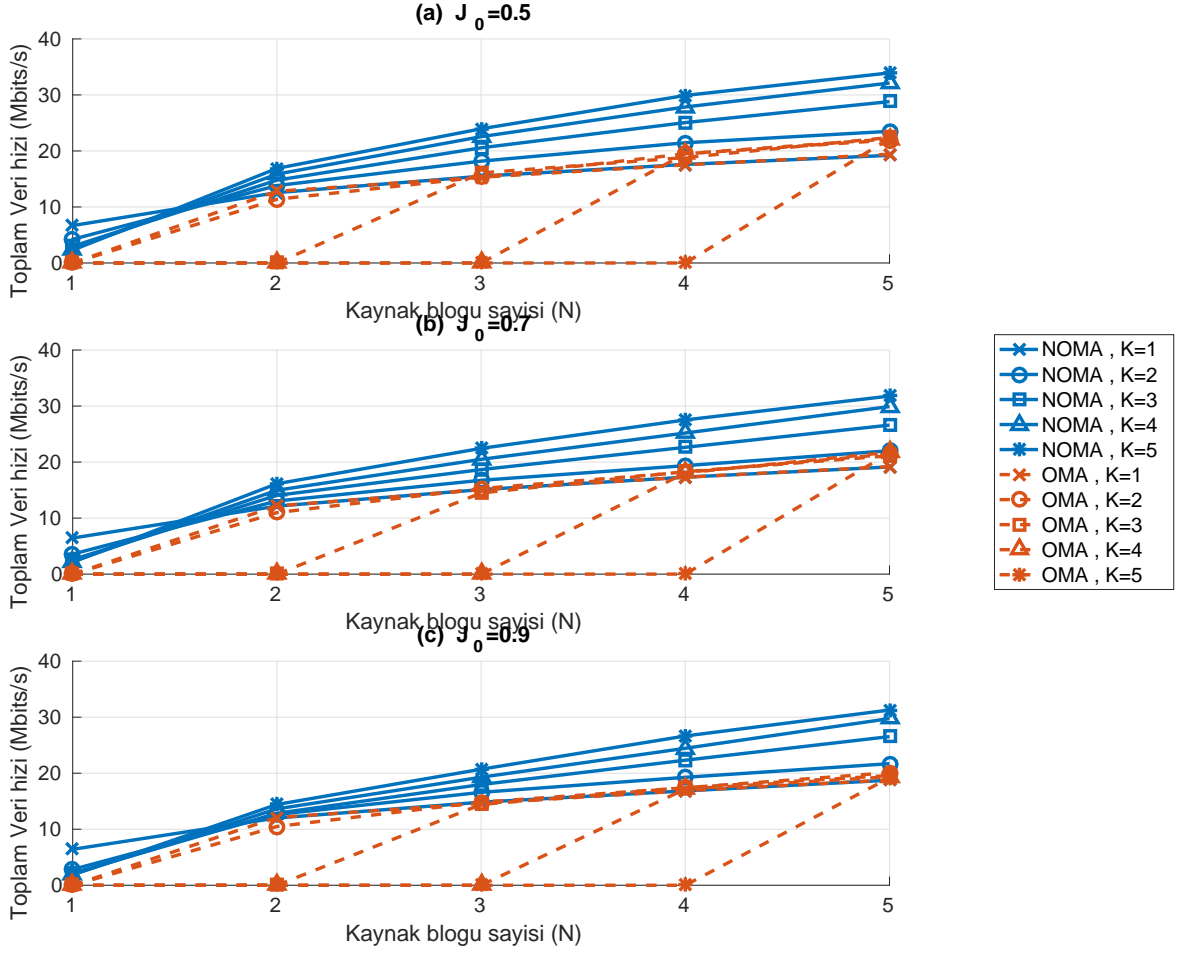
Şekil 2.16.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 5$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı  $P_{max}$  değerleri için elde edilen enküçük veri hızı başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ .



Şekil 2.17.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 5$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile, topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı  $P_{max}$  değerleri için elde edilen toplam veri hızı başarımının hücre başına kullanıcı sayısına ( $K$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ .



Şekil 2.18.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile,  $P_{\max} = 43$  dBm için topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enküçük veri hızı başarımının RB sayısına (N) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ .



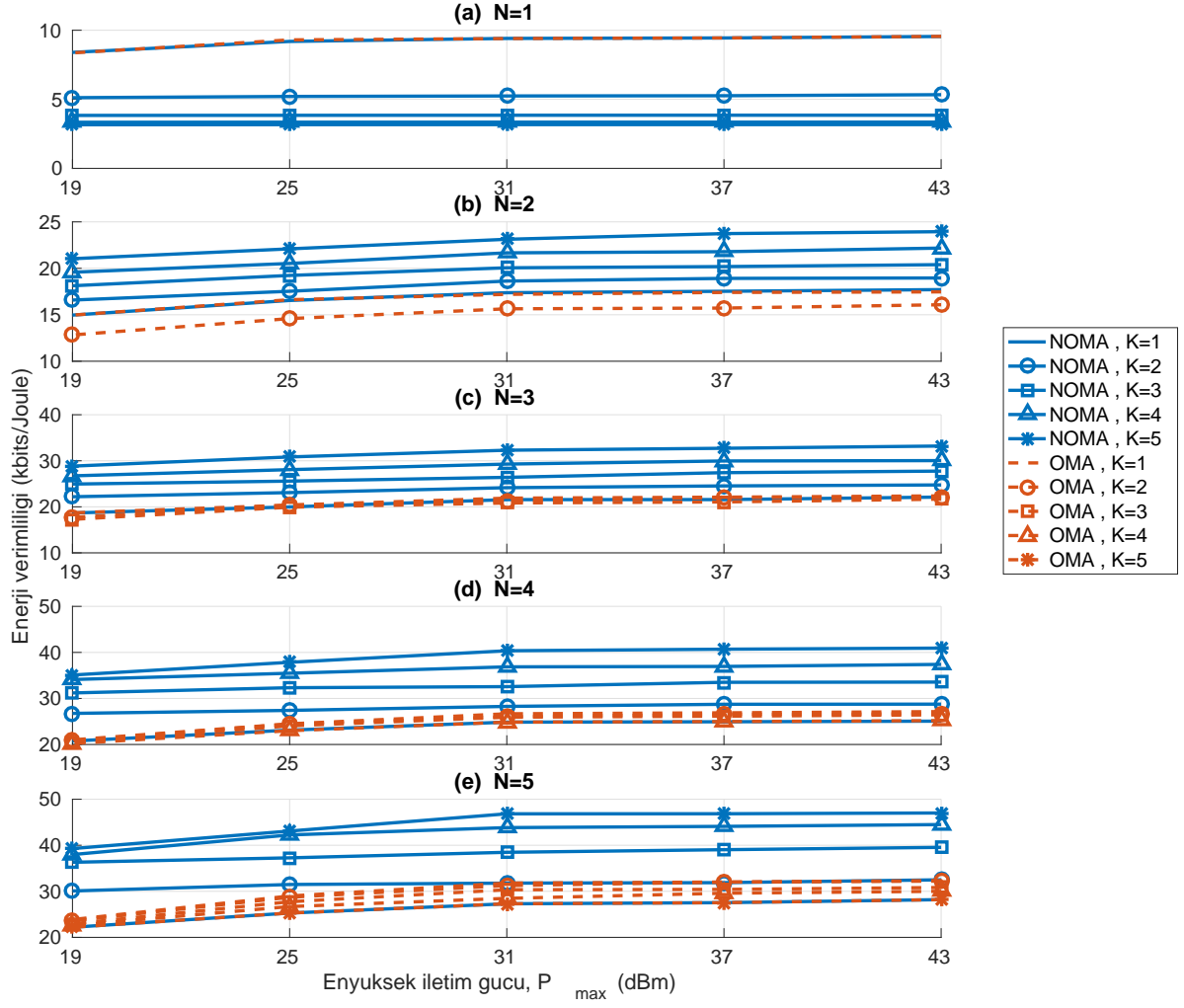
Şekil 2.19.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve çeşitli Jain adaletliliği ( $J_0$ ) kısıtları ile,  $P_{\max} = 43$  dBm için topaktaki toplam veri hızı enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen toplam veri hızı başarımının RB sayısına (N) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $J_0 = 0.5$ , (b)  $J_0 = 0.7$ , (c)  $J_0 = 0.9$ .

## Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi

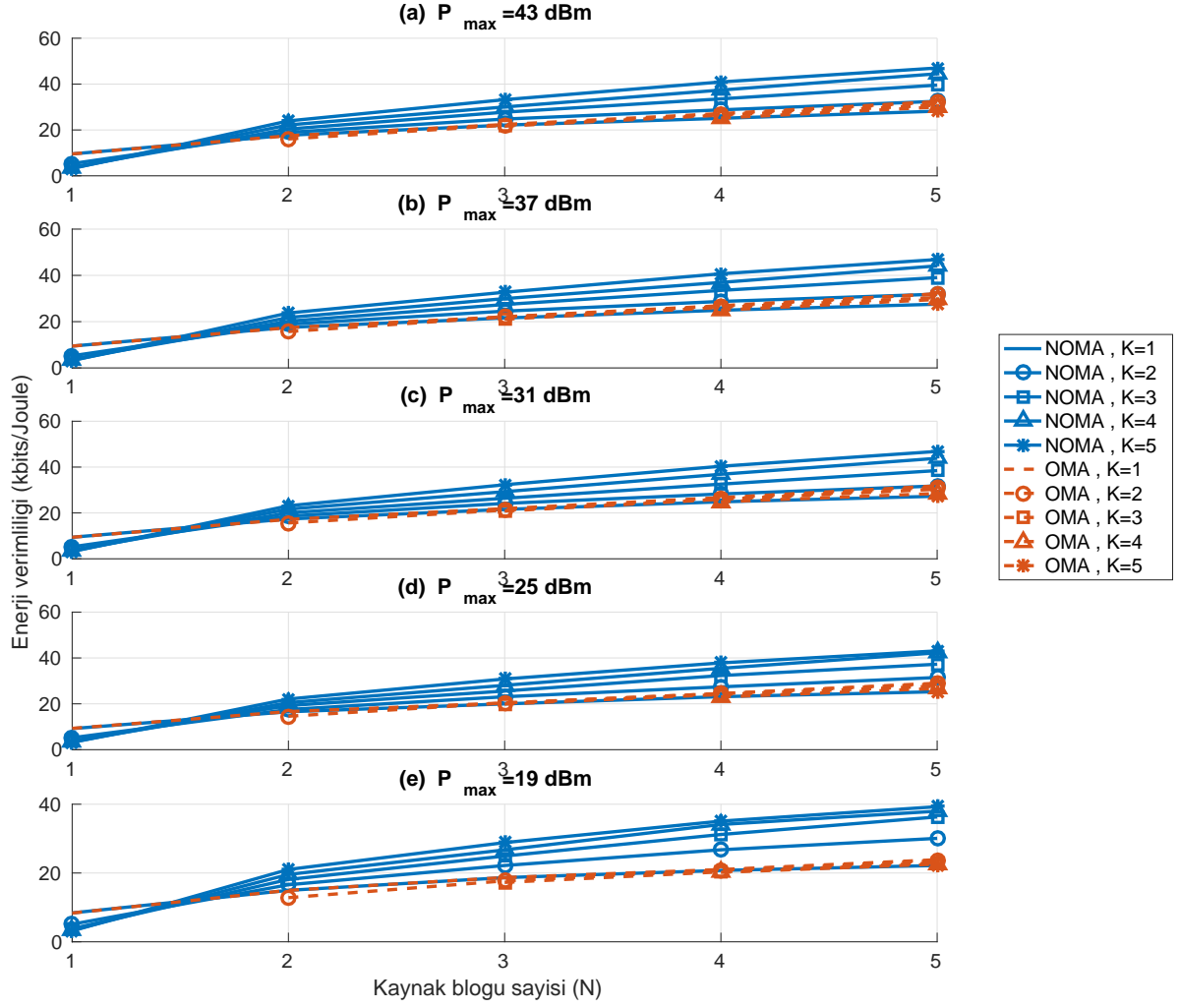
Önceki kısımda sistem genelinde toplam veri hızını artırmaya dayalı eniyileme problemleri incelenmişti. Ancak RRH'lerin kullanabileceği toplam iletim gücünü sınırlamak dışında herhangi bir güç kısıtı mevcut değildi. Bu da enerjinin verimsiz kullanılmasına yol açabilmektedir. Dolayısıyla enerjinin de verimli kullanılabilmesi amacıyla bu kısımda, sistem genelinde enerji verimliliği eniyilemesi incelenmektedir. Eşitlik (2.42)'deki maliyet işlevi,  $\Psi(\alpha)$ , Eşitlik (2.18)'de tanımlanan  $\mu_{EE}(\alpha)$  olarak kullanılmaktadır, yani,  $\Psi(\alpha) = \mu_{EE}(\alpha)$ .

## Başarım Değerlendirmesi

Şekil 2.20'de ve Şekil 2.21'de sistem genelindeki toplam enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü problem formülasyonunda,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$  ve farklı RB sayıları için, enerji verimliliğinin, hücre başına kullanıcı sayısı ( $K$ ) ve en yüksek iletim gücü sınırına ( $P_{\max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. Bu inceleme hem NOMA hem de OMA için CPM yöntemine dayanarak yapılmaktadır.  $N = 1$  RB için  $P_{\max}$  değerinin başarıma olan etkisi azken, RB sayısı arttıkça etkisi artmaktadır, burada kaynak bloğu sayısı arttıkça girişimin azalması ve düşük  $P_{\max}$  değerlerinde gürültünün etkisinin bir nebze daha fazla hissedilmesi sebebiyle, kullanılan iletim gücü de az da olsa etkili olmaya başlamaktadır. NOMA yöntemi ile  $N = 1$  durumu için, kullanıcı sayısı artışı, ve dolayısıyla ağırlaşan kısıtlar sebebiyle başarım düşmektedir, ancak daha yüksek RB mevcut olduğunda kullanıcı sayısının artması başarıma da artırmaktadır.  $N = 2$  RB için hücre başına  $K = 5$  kullanıcı olduğu durumda en iyi başarıma erişilmektedir. OMA tekniğinde her kullanıcı için en az 1 RB olsa bile, adalet kısıtının etkisiyle toplam EE düşmektedir. Ayrıca beklendiği üzere, RB sayısının artması EE'yi de artırmaktadır.



Şekil 2.20.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı ( $N$ ) sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$  dBm) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enerji verimliliğinin  $P_{\max}$  ile değişimi incelenmektedir: (a)  $N = 1$ , (b)  $N = 2$ , (c)  $N = 3$ , (d)  $N = 4$ , (e)  $N = 5$ .



Şekil 2.21.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli  $P_{\max}$  değerleri için topaktaki enerji verimliliği enbüyütölmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enerji verimliliğinin RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a)  $P_{\max} = 43$  dBm, (b)  $P_{\max} = 37$  dBm, (c)  $P_{\max} = 31$  dBm, (d)  $P_{\max} = 25$  dBm, (e)  $P_{\max} = 19$  dBm.



## Ödünleşimli Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi

Enerji verimliliği tanımı toplam veri hızının enbüyütülmesi ile harcanan toplam iletim gücünün enküçültülmesinin eşit öneme sahip olması önerisine dayanmaktadır. Bu iki uç nokta arasında bir ödünleşim oluşturularak veri hızının enbüyütülmesinden güç tüketiminin enküçültülmesine kadar uzanan bir bölgede sistemin davranışının incelenmesine olanak sağlayan farklı bir maliyet fonksiyonu da incelenebilir:

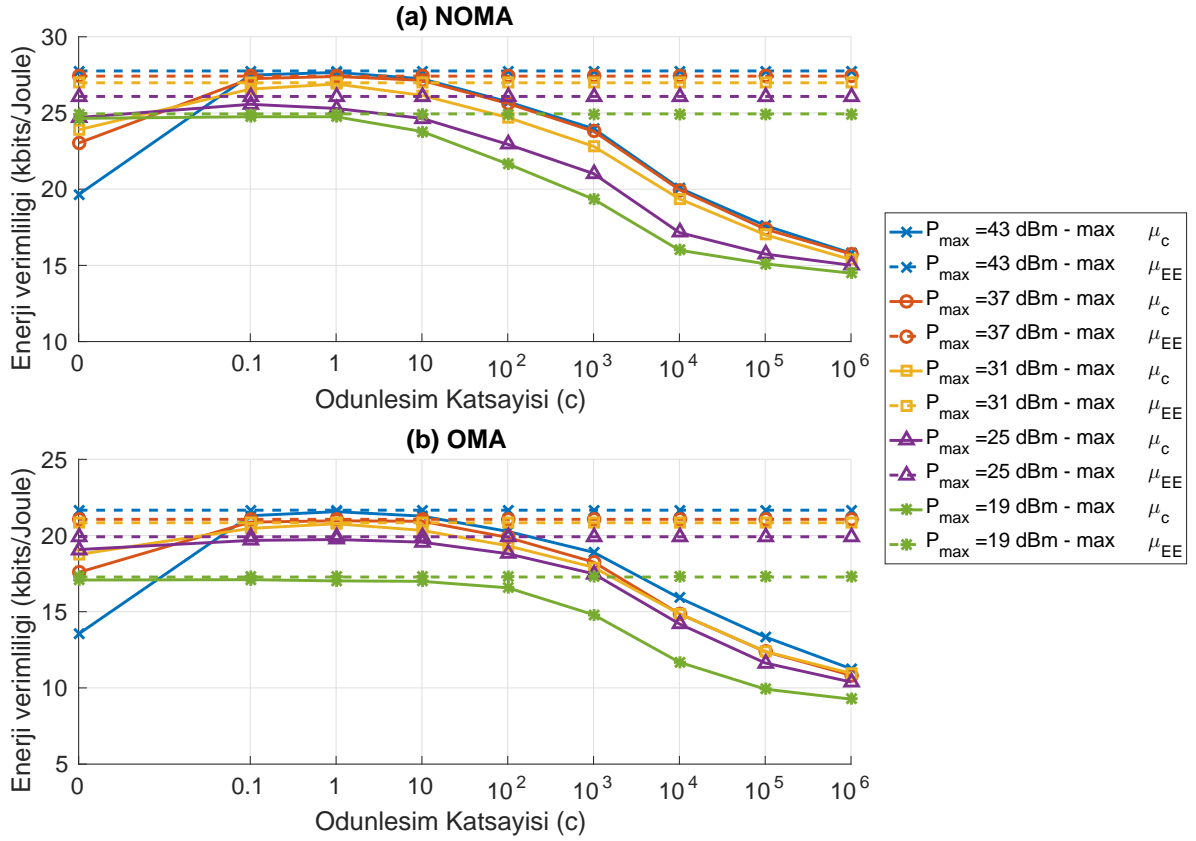
$$\mu_c(\alpha) = \frac{R(\alpha)}{1 + cP_T(\alpha)}. \quad (2.45)$$

Burada  $R(\alpha)$  Eşitlik (2.12)'de tanımlanan toplam veri hızını,  $P_T(\alpha)$  Eşitlik (2.16)'da tanımlanan toplam güç tüketimini,  $c \in \mathbb{R}^+$  ise ödünleşim parametresini temsil etmektedir.  $c$  değeri küçüldükçe ( $c \rightarrow 0$ ), problemde güç tüketiminin önemi azalarak hedef sistem kapasitesinin enbüyütülmesine doğru yönelecektir.  $c$  değeri büyüdükçe ( $c \rightarrow \infty$ ), sistem genelinde kullanılan gücün enküçültülmesinin önemi artacaktır. Bu kısımdaki incelemelerde Eşitlik (2.42)'de tanımlanan CPM eniyileme probleminde, maliyet işlevi,  $\Psi(\alpha)$ , ödünleşimli EE olarak seçilmektedir, yani,  $\Psi(\alpha) = \mu_c(\alpha)$ .

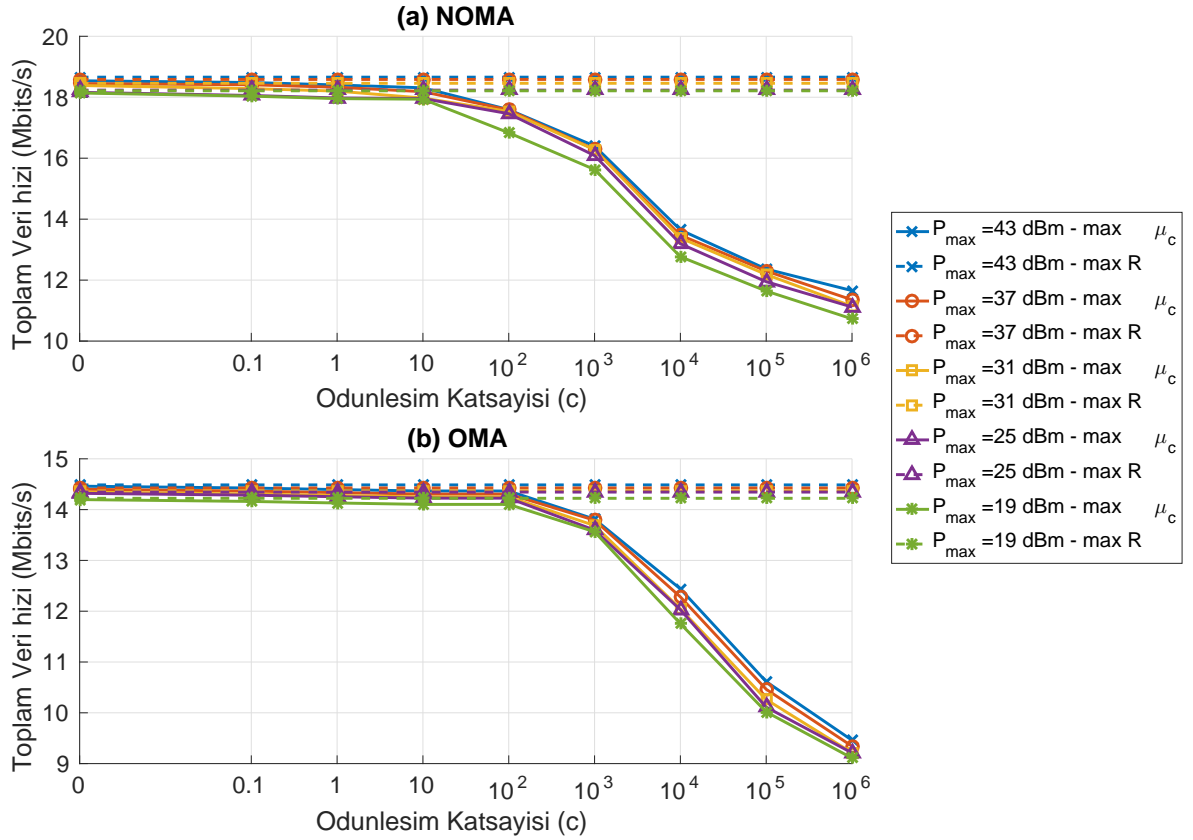
### Başarım Değerlendirmesi

Şekil 2.22'de sistem genelinde ödünleşimli EE'nin Eşitlik (2.45)'te tanımlanan  $\mu_c$  enbüyütüldüğü problem için,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$ ,  $N = 3$  RB ve hücre başına  $K = 3$  kullanıcı için enerji verimliliğinin, ödünleşim parametresi ( $c$ ) ve en yüksek iletim gücü sınırına ( $P_{\max}$ ) göre değişimi incelenmiş ve klasik EE'nin Eşitlik (2.18'de tanımlanan  $\mu_{EE}$ ) eniyileştirildiği durumla karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.23'te ise aynı senaryoda, toplam veri hızının enbüyütüldüğü durumla karşılaştırılmaktadır.  $c = 0$  durumunda, yani iletim gücünün önemsiz olduğu durumda, toplam veri hızı olabildiğince enbüyütülmekte, toplam veri hızının enbüyütüldüğü Kısım 2.3.1.3'deki problemle benzer değerlere ulaşmaktadır; ancak iletim gücü verimsiz kullanılmakta ve EE başarımı düşmektedir. Burada yüksek  $P_{\max}$  değerleri için yüksek iletim gücü kullanılmakta ve bu EE değerlerini düşürmektedir, düşük  $P_{\max}$  değerleri için girişim yönetimi ve güç kontrolü iyi bir şekilde yapılarak veri hızı enbüyütülse bile, iletim gücü haricindeki diğer BS güç tüketimi değerlerinin yüksek ve baskın olması EE değerinin göreceli olarak daha az değişmesine sebep olmaktadır.

$c$  değeri arttıkça iletim gücü enküçültülmesi önem kazanmakta ve elde edilen SR ve EE değerleri azalmaktadır. Değişen  $c$  parametresi ile EE davranışı incelendiğinde en uygun  $c$  değeri önerilebilmektedir.  $\mu_{EE}(\alpha)$  ve  $\mu_c(\alpha)$ 'nın, taranan bölge içinde birbirine matematiksel olarak en yakın olduğu  $c \in [0.1, 1]$  bölgesinde en yüksek EE değerlerine ulaşmaktadır. Burada klasik EE eniyilemesinin yapıldığı durum üst sınır oluşturmaktadır. Bu yöntem sayesinde farklı iletim gücü bölgelerinde sistem başarımının nasıl olduğu incelenebilmektedir.



Şekil 2.22.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli  $P_{\max}$  değerleri için topaktaki klasik EE (Eşitlik (2.18)'de tanımlanan  $\mu_{EE}$ ) ve ödünleşimli EE (Eşitlik (2.45)'te tanımlanan  $\mu_c$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen enerji verimliliğinin ödünleşim parametresine ( $c$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) NOMA, (b) OMA.



Şekil 2.23.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli  $P_{\max}$  değerleri için topaktaki toplam veri hızı (Eşitlik (2.12)'de tanımlanan  $R$ ) ve ödünleşimli EE (Eşitlik (2.45)'te tanımlanan  $\mu_c$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır, çoklu erişim için hem NOMA hem OMA yöntemleriyle farklı hücre başına kullanıcı sayıları için elde edilen sistem başarımının ödünleşim parametresine ( $c$ ) göre değişimi incelenmektedir: (a) NOMA, (b) OMA.

### 2.3.2 Heterojen Ağlar

Bu kısımda sadece sürekli güç yönetimi (CPM) tasarısı kullanılarak, çok taşıyıcılı ve çok kullanıcılı bir sistemde eniyileme problemi incelenmektedir. NOMA tekniğinin başarımı, dikgen çoklu erişim (OMA) başarımı ile karşılaştırılmaktadır. OMA'yı tekrar etmek gerekirse, tek bir zaman ve kod bölgesi için, bütün kullanıcıların hizmet görmesi şartıyla birlikte, her RB her hücrede sadece bir kullanıcı tarafından kullanılabilir. Bu koşulun doğası gereği RB sayısı hücredeki kullanıcı sayısından fazla olmalıdır, bir başka deyişle  $n = 1, 2, \dots, M$  için  $N \geq K_n$  olmalıdır, ve dolayısıyla alınan sinyaldeki kullanıcılar arası girişim yok olacaktır.

OMA kaynak tahsisi yordamı, Ekler'de tanımlanan Algoritma ?? ile verilmektedir.

#### 2.3.2.1 Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi

Haberleşme stratejisi sistem genelinde toplam enerji verimliliğini enbüyütmek olmakla birlikte, sistemde adaleti sağlamak için Jain Adaletliliği ve en düşük kullanıcı veri hızı kısıtları, ve erişim noktalarının (RRH ve LPN) azami iletim güçleri sınırlaması mevcuttur.

Eşitlik (2.18)'de tanımlanan EE kullanılarak Sürekli Güç Yönetimi (CPM) için eniyileme problemi

$$\begin{aligned}
& \max_{\alpha} \quad \mu_{EE}(\alpha) \\
& \text{s.t.} \quad \alpha \in [0, 1]^{LK_t N}, \\
& \quad \left[ \bigoplus_{i=1}^N \left( \bigoplus_{n=1}^M \mathbf{1}_{K_n}^T \mathbf{A}_{K_n}^i \right) \otimes \mathbf{I}_L \right] \alpha \leq \mathbf{1}_{LM}, \\
& \quad c_{MC} \left( \mathbf{I}_{K_t} \otimes \left[ \mathbf{1}_{L_r}^T \quad \mathbf{0}_{L_f}^T \right] \alpha \right) \circ \left( \mathbf{I}_{K_t} \otimes \left[ \mathbf{0}_{L_r}^T \quad \mathbf{1}_{L_f}^T \right] \alpha \right) = \mathbf{0}_{K_t} \\
& \quad r_{km}(\alpha) \geq r_0, \quad \forall k, m, \\
& \quad J(\alpha) \geq J_0.
\end{aligned} \tag{2.46}$$

ile verilmektedir, burada birinci kısıt erişim noktalarının her bir kullanıcıya her RB üzerinde ayırdığı iletim gücünü kısıtlamaktadır, CPM için bu sınır  $P_{\max}$  olarak belirlenmektedir. İkinci kısıt ise her erişim noktasının bütün bantgenişliği boyunca bütün kullanıcılara harcayabileceği toplam iletim gücünü kendi güç sınırı ile sınırlamaktadır. Her erişim noktası için bulunan bu kısıt açık olarak  $\ell = 1, \dots, ML$  ve  $m = 1, \dots, M$

için  $\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell mki} \leq 1$  yazılır.  $\ominus$  yatay birleştirme operatörünü,  $\otimes$  Kronecker çarpımını,  $\oplus$  doğrudan toplam operatörünü,  $\mathbf{I}_L$  ve  $\mathbf{I}_{K_n}$ , sırasıyla  $(L \times L)$  ve  $(K_n \times K_n)$  boyutlarında birim matrisleri,  $\mathbf{1}_{K_n}$  ve  $\mathbf{1}_{LM}$ , sırasıyla  $(K_n \times 1)$  ve  $(LM \times 1)$  boyutlarında bütün elemanları bir olan sütun vektörlerini temsil etmektedirler. Kaynak tahsisi matrisi OMA için  $\mathbf{A}_{K_n}^i = \mathbf{S}_{K_n}^{\pi_n(i)}$ , NOMA için  $\mathbf{A}_{K_n}^i = \mathbf{I}_{K_n}$  olacak şekilde seçilir. Burada  $\mathbf{A}_{K_n}^i$  matrisi ile  $n$ 'inci hücredeki  $K_n$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci RB'yi kullanma izninin olup olmasını belirler. Burada Algoritma ?? ile eniyilenen  $\mathbf{S}_{K_n}^{\pi_n(i)}$ ,  $(K_n \times K_n)$  boyutlarında, sadece  $(\pi_n(i), \pi_n(i))$ 'inci elemanlarının bir, geri kalan elemanlarının sıfır olduğu tek girdi matrisidir. Üçüncü kısıt Çoklu-Bağlantıya izin verilip verilmemesi ile ilgilidir. Eğer  $c_{MC}$  katsayısı sıfır olarak seçilirse kısıtın etkisi kalmamakta ve Çoklu-Bağlantıya izin verilmekte, yani kullanıcılar hem RRH'lere hem de LPN'lere aynı anda bağlanabilmektedirler. Ancak  $c_{MC}$  sıfırdan farklı seçilirse, aldığı değerın büyüklüğüyle doğru orantılı bir şekilde Çoklu-Bağlantıya ceza uygulamaktadır. Burada  $\circ$  Hadamard çarpımını tanımlar.  $\mathbf{0}_L$  ise  $(L \times 1)$  boyutunda sıfır vektörü oluşturmaktadır. Bu kısıt

$$c_{MC} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\ell=1}^{L_r} \alpha_{\ell mki} \right) \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\ell=L_r+1}^{L_r+L_f} \alpha_{\ell mki} \right) = 0, \quad \forall k, m, \quad (2.47)$$

olacak şekilde her  $k$  ve  $m$  değeri için daha açık olarak yazılabilir. Son iki kısıt ise sırasıyla kullanıcıların en düşük veri hızını alttan sınırlamakta ve sistem genelinde Jain adaletliliği için kullanılmaktadır. Jain adaletlilik indeksi, eniyileme problemi için

$$J(\alpha) = \frac{\left( \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{km}(\alpha) \right)^2}{MK \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{km}^2(\alpha)} \quad (2.48)$$

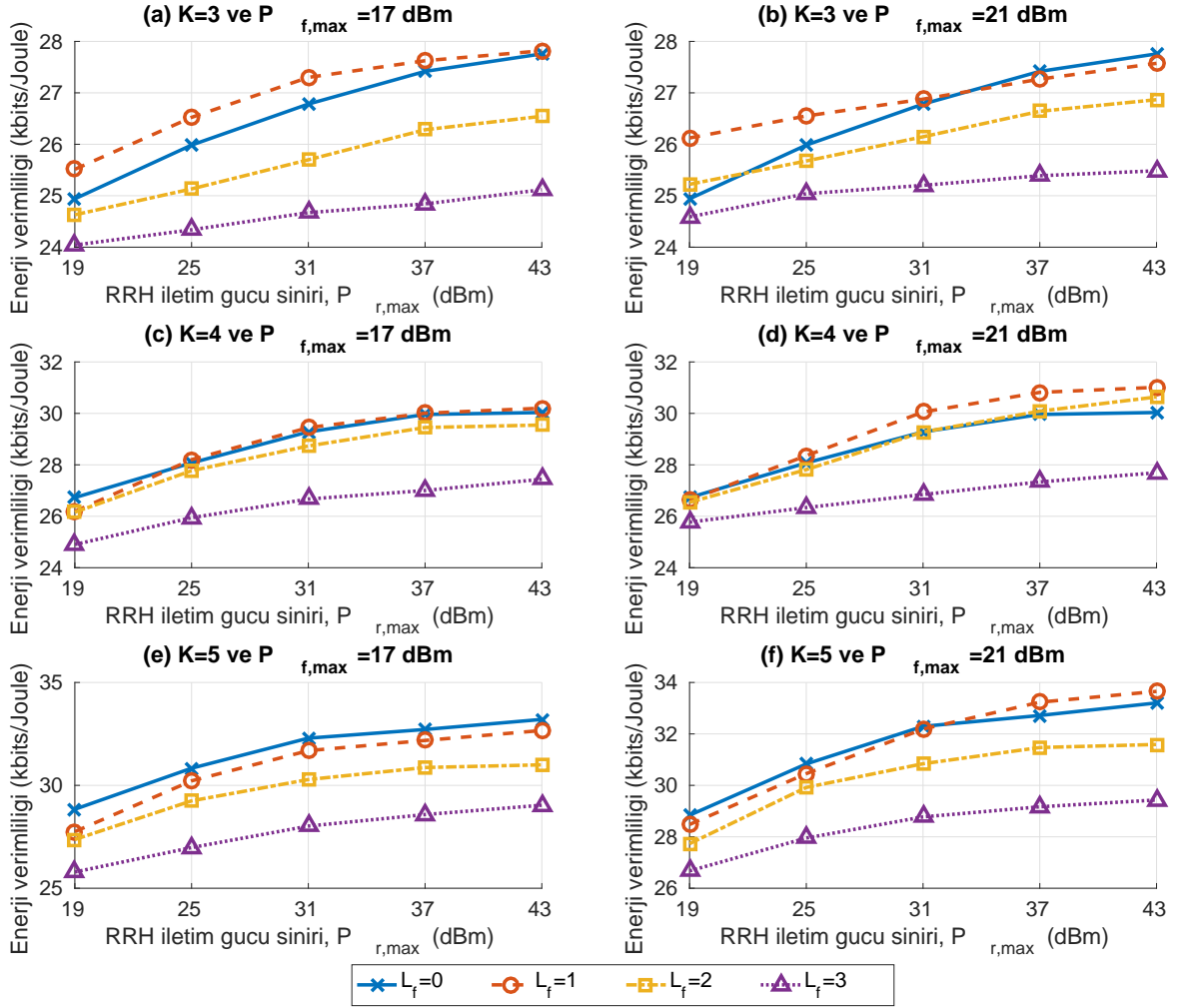
olarak düzenlenmektedir.

### Başarım Değerlendirmesi

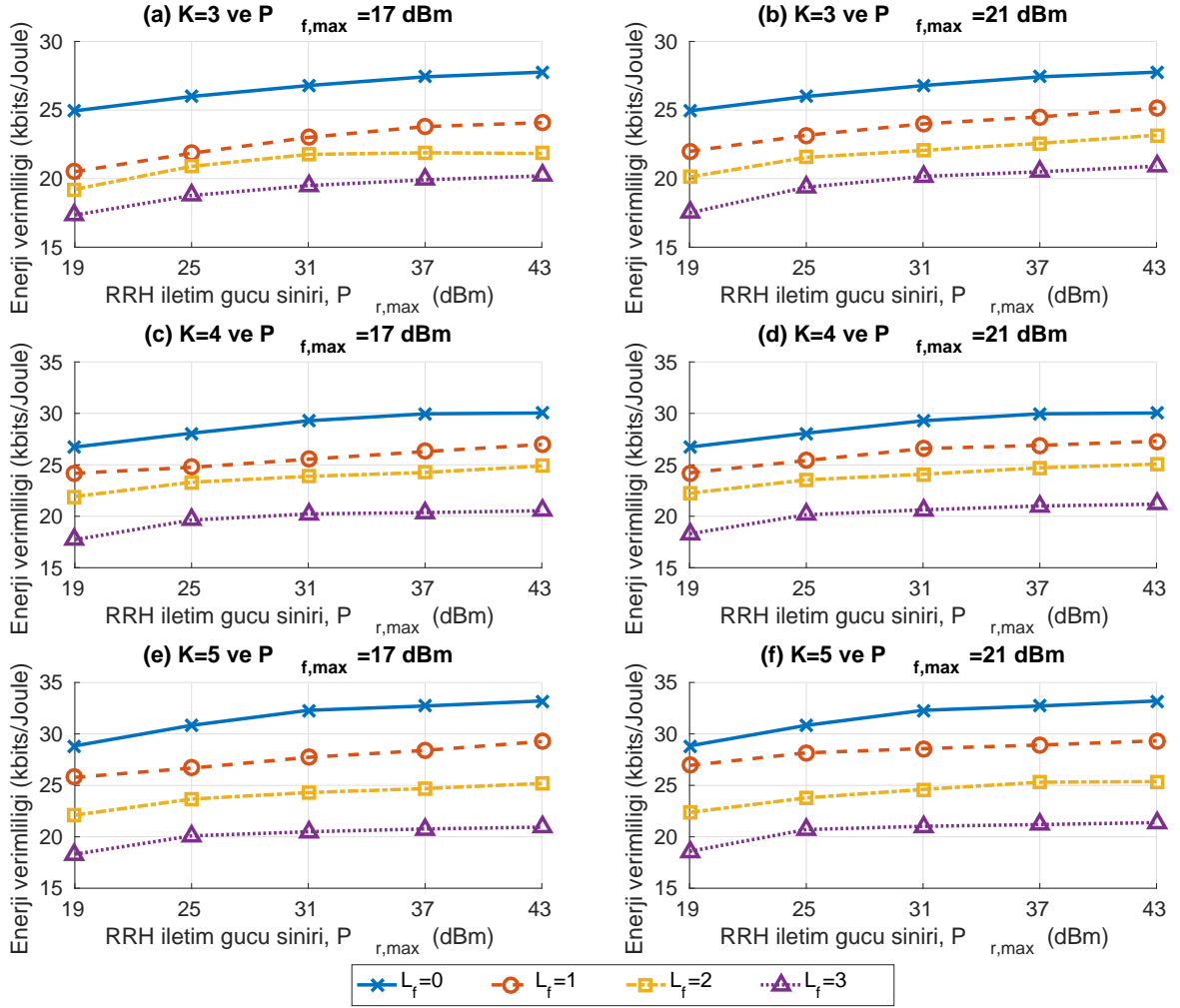
Burada sistem genelinde en düşük veri hızı, Jain adaletliliği ve erişim noktası azami güç kısıtları altında enerji verimliliği enbüyütüldüğü senaryolar incelenmektedir. Ağ modeline farklı güç değerleri ile küçük hücreler (LPN) de eklenmektedir. Femto-hücreler  $P_{f,\max} = 17$  dBm, piko-hücreler  $P_{f,\max} = 21$  dBm güç değerleri ile sınırlanmaktadır, ve bu hücrelerin BS'lerinin doğrusal güç modellerinin farklı olduğunu

hatırlatmakta fayda vardır. Sistem incelemesi farklı çoklu erişim modelleri (NOMA, OMA) için ve çoklu bağlantının (MC) aktif olup olmamasına göre ayrıca incelenmektedir. LPN sayısını artırmak genellikle kapsamayı artırmak amaçlıdır, bu çalışmada bu dikkate alınmadan, LPN sayısının ağ fonksiyonları ile birlikte başarımı nasıl etkilediği incelenmektedir. Şekil 2.24, Şekil 2.25, Şekil 2.26 ve Şekil 2.27 sırasıyla NOMA'nın kullanıldığı ve MC'nin aktif olduğu, NOMA'nın kullanıldığı ve MC'nin aktif olmadığı, OMA'nın kullanılarak MC'nin aktif olduğu ve son olarak OMA'nın kullanılarak MC'nin aktif olmadığı durumlarda EE'nin farklı küçük BS çeşidi ve sayıları için, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K$ ) için RRH güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre nasıl değiştirdiğini göstermektedir. OMA yöntemi için hücre başına en fazla  $K = N$  kullanıcı desteklenebildiği unutulmamalıdır. Burada  $N = 3$  seçilmektedir.

Her bir durumda  $P_{r,max}$  arttıkça sistem başarımı EE artmaktadır. Burada eniyileme probleminin olurlu bölgesinin genişlemesi etkindir. Artış hızı, yüksek  $P_{r,max}$  değerlerinde azalmaktadır. MC fonksiyonunun kullanılmadığı durumlarda, aktif olan LPN sayısının artmasıyla, her  $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$  değeri için EE'nin düştüğü gözlemlenmektedir. Ancak MC fonksiyonu kullanıldığında, LPN kullanımının bazı durumlarda başarımı iyileştirdiği görülmektedir. Birden fazla RB olması sebebiyle ( $N = 3$ ), NOMA için  $K = 5$  kullanıcıya kadar kullanıcı çeşitlemesi başarımı artırmaktadır, NOMA'nın başarılı girişim yönetimi ile kullanıcı çeşitlemesi bu başarımların esas sebebidir. Unutmamak gerekir ki, en fazla  $K = 5$  kullanıcı incelenmektedir, bir noktadan sonra kısıtların etkinliği çok daha fazla olacaktır. Kullanıcı sayısının artmasıyla, erişim noktalarının iletim gücü sınırlarına göre değişimi azalmaktadır. Ayrıca,  $K = 3$  kullanıcı durumu gibi az sayıda kullanıcı olduğunda 1 aktif LPN enerji verimliliğini artırırken, kullanıcı sayısının artması ile LPN sayısının EE başarımını düşürdüğü gözlemlenmektedir. Bu başarımların düşüşü  $P_{f,max} = 21$  dBm için daha geç gelmektedir. OMA kullanımında ise, LPN'lerin başarıma olan katkısı daha fazla olduğu gözükmektedir.

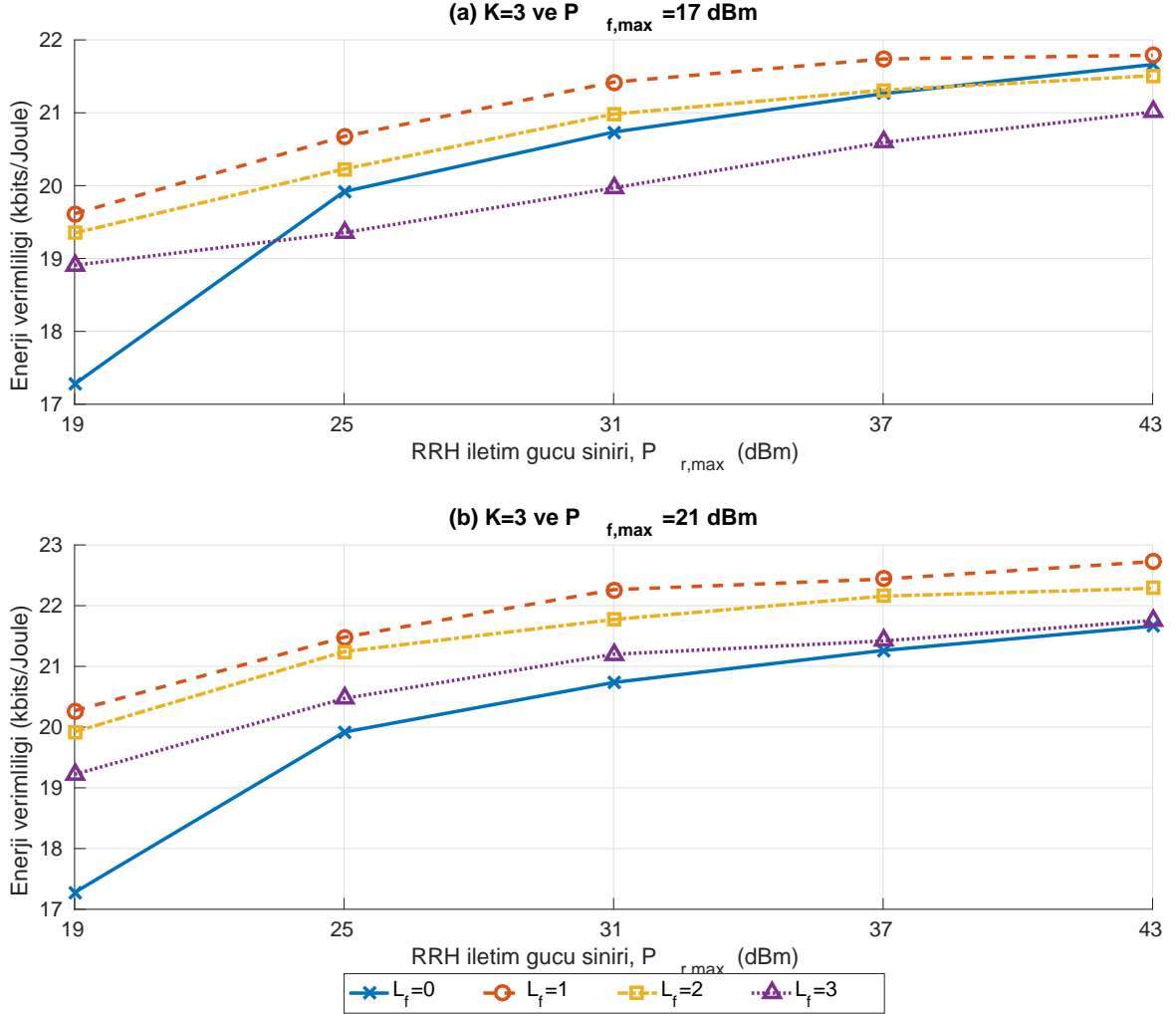


Şekil 2.24.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm.

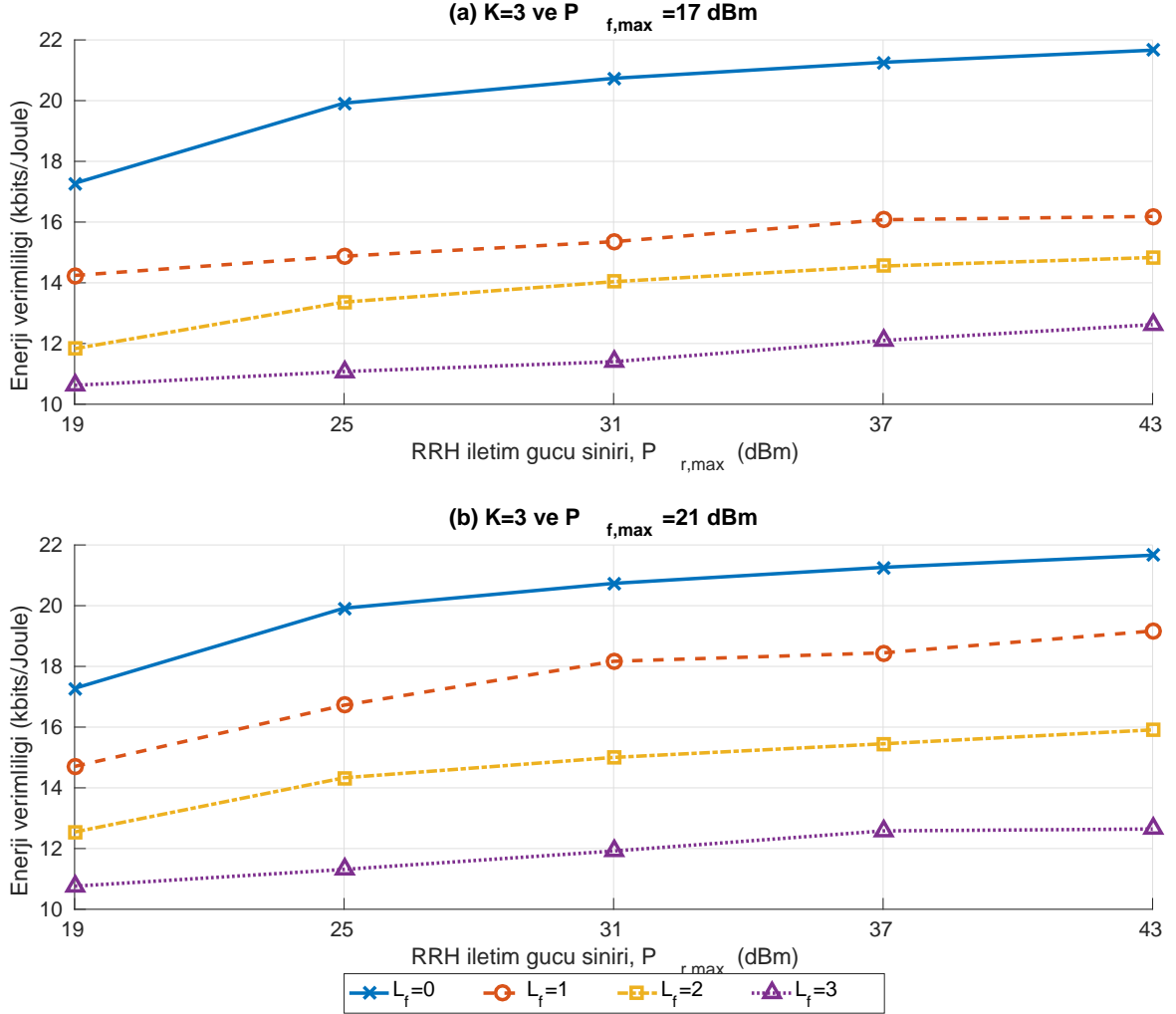


Şekil 2.25.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA kullanılmaktadır; ancak MC fonksiyonu aktif değildir: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm.





Şekil 2.26.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA kullanılmamaktadır; ancak MC fonksiyonu aktiftir: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm.



Şekil 2.27.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, çeşitli hücre başına kullanıcı sayısı ( $K \in [3, 5]$ ) ve azami LPN güç sınırı ( $P_{f,max}$ ) değerleri için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen enerji verimliliğinin RRH azami güç sınırına ( $P_{r,max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. NOMA ve MC fonksiyonları kullanılmamaktadır: (a)  $K = 3$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $K = 3$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (c)  $K = 4$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (d)  $K = 4$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm, (e)  $K = 5$  ve  $P_{f,max} = 17$  dBm, (f)  $K = 5$  ve  $P_{s,max} = 21$  dBm.

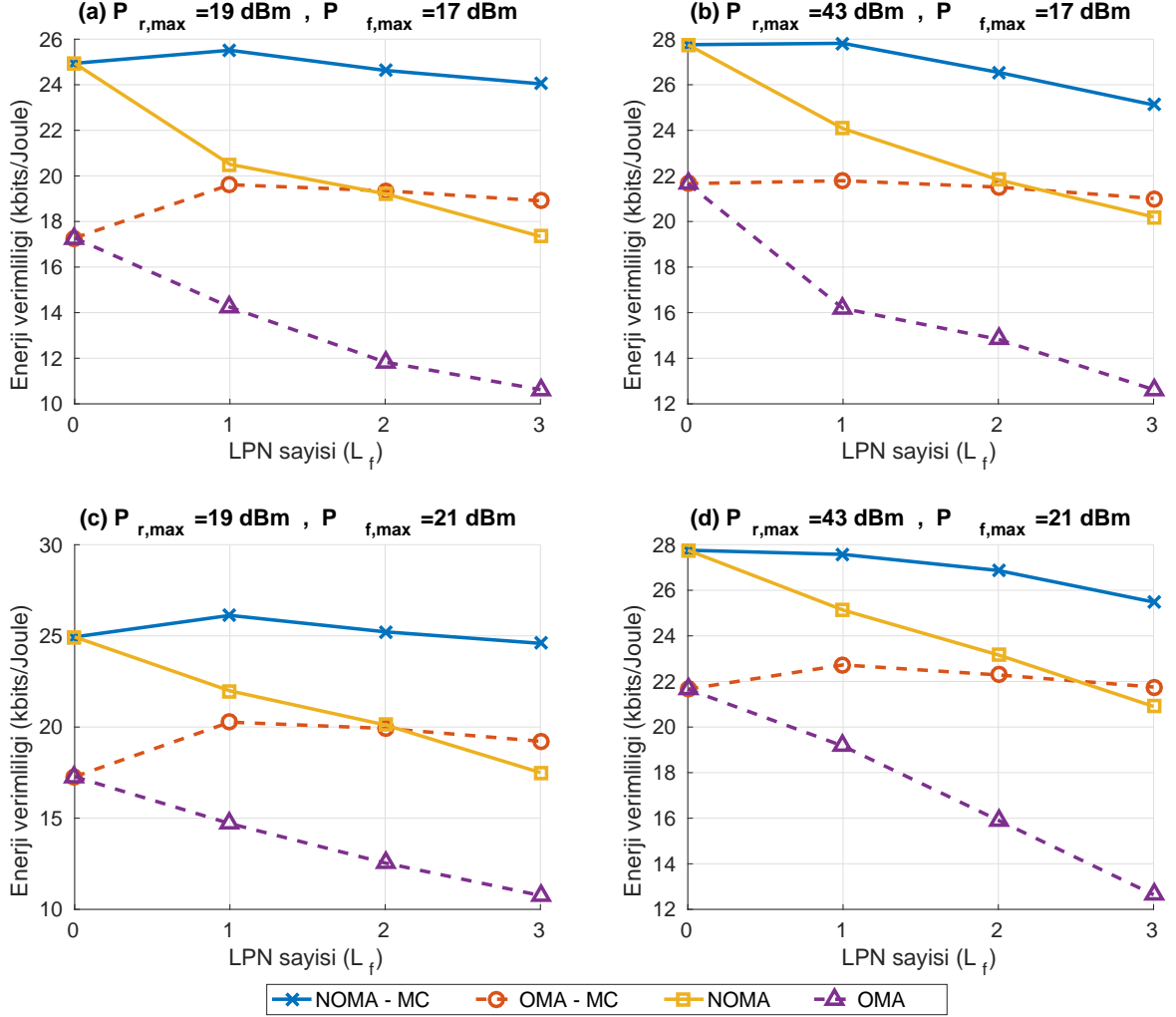
Şekil 2.28’de  $N = 3$  RB ve hücre başına  $K = 3$  kullanıcı için, NOMA’nın kullanılıp kullanılmadığı, MC’nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, uç noktadaki farklı  $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$  değerleri için,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$  kısıtlarıyla EE’nin LPN sayısına ( $L_f$ ) göre değişimi incelenmektedir. Her iki grafik için de LPN en yüksek güç sınırlamaları (a)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm (b)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm (c)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm ve (d)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm olarak ayrıca incelenmektedir. Aynı şekilde, Şekil 2.29 ve Şekil 2.30’da sırasıyla, RRH ve LPN’lerin iletim gücünün LPN sayısı ile olan değişimi gösterilmektedir.

LPN sayısının EE başarımını nasıl etkilediği incelendiğinde, MC fonksiyonunun etkisi ön plana çıkmaktadır. MC kullanılmadığı durumda, bütün  $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$  değerleri için, EE başarımı LPN sayısı ile düşmektedir. Burada kullanıcılar hem yüksek çıkış gücüne sahip olan hem de hali hazırda aktif olarak çalışan  $ML_r = 8$  adet RRH’e yönlendirilmektedirler. Beklenildiği üzere, NOMA’nın OMA’ya göre önemli bir başarımla kazancı mevcuttur. MC fonksiyonu aktifleştirildiğinde, OMA’daki aktif LPN kaynaklı başarımla kaybı telafi edilebilmektedir.  $P_{r,max} = 19$  dBm için, LPN ve RRH çıkış gücü sınırları birbirine yakın olduğu durumda, LPN kullanımı ile daha yüksek başarımla elde edilebilmektedir, ancak  $L_f = 1$ ’den fazlasının getirdiği kazanç kullandığı fazladan güçlerin EE’ye olan etkisinden daha azdır.  $P_{r,max} = 19$  dBm için ise, LPN kullanımı, OMA-MC durumu için başarımla çok değiştirmemektedir. NOMA kullanıldığında ise, LPN yerleştirmenin katkısı ya oldukça azdır, ya da olumsuz olarak EE’yi etkilemektedir. Burada, serbestlik derecesi yüksek olan ve başarılı girişim yönetimi yeteneğine sahip olan NOMA’da eklenen LPN’ler, veri hızına yaptıkları katkıdan ziyade iletim gücü dışında harcadıkları güçler sebebiyle EE başarımını düşürmektedir. Örneğin, NOMA ve MC’nin birlikte kullanıldığı durumda,  $L_f = 2$  veya daha fazla LPN kullanımı, hiç kullanılmadığı duruma göre daha düşük EE başarımını sunmaktadır. Burada LPN’lerin kapsamayı artırdığını tekrar hatırlatmakta fayda vardır. Hesaplama karmaşıklığının fazla artması istenmediği durumlarda, kapsamayı artırmak amaçlı eklenen LPN sayısına göre değişecek şekilde, NOMA veya MC fonksiyonundan herhangi birisi aktifleştirilebilir. Örneğin,  $L_f = 1$  için NOMA daha faydalı gözükürken,  $L_f = 3$  için MC daha fazla kazanç sağlamaktadır.

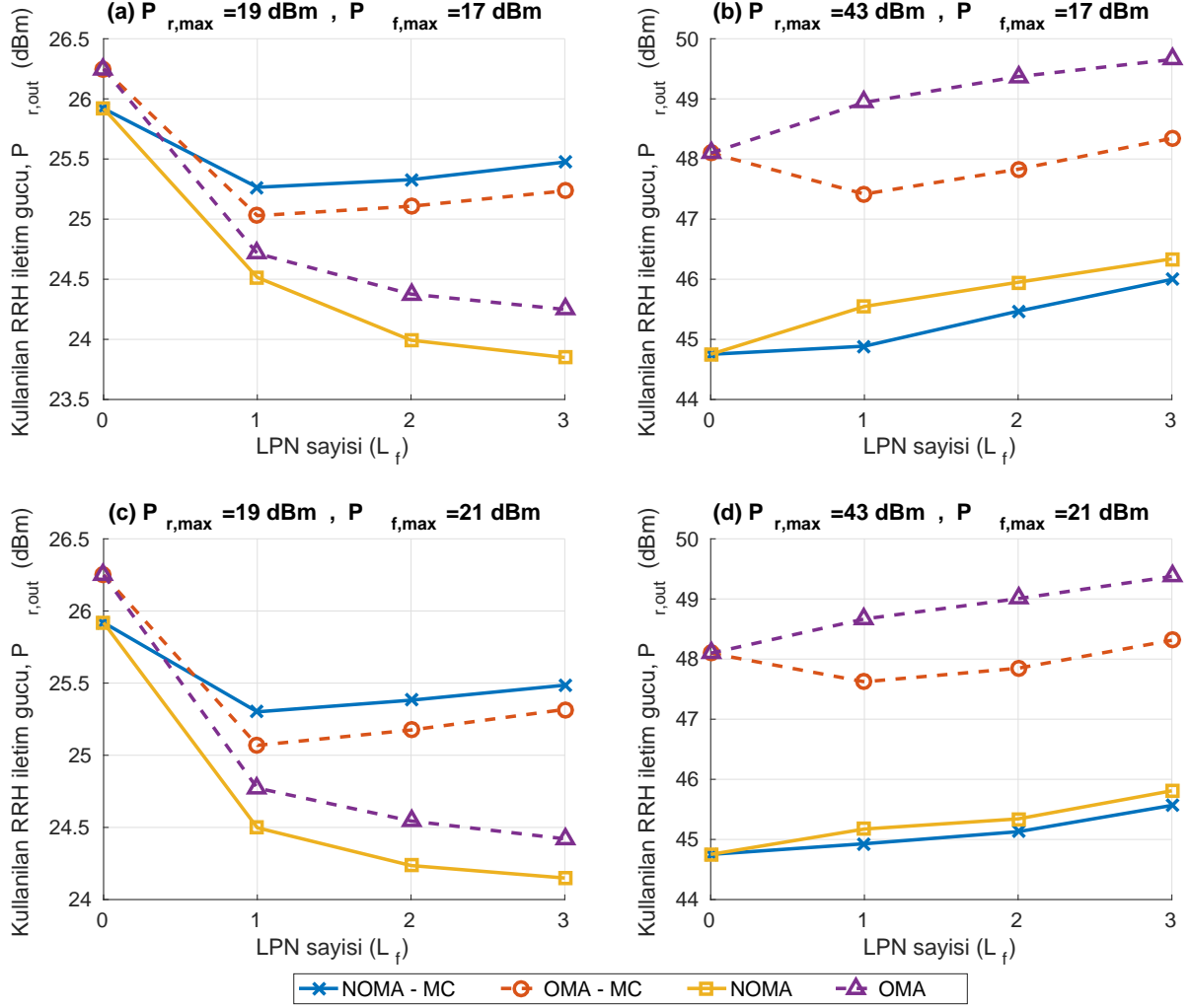
İletim güçlerinin aktif olan LPN sayısı ile nasıl değiştiği de ayrıca incelenmektedir.

Şekil 2.29 incelendiğinde,  $P_{r,max} = 19$  dBm için LPN iletim gücüne yakın RRH iletim gücü harcanmaktadır, ve MC'nin kullanılmadığı durumda LPN sayısının artmasıyla kullanılan RRH iletim gücü hep azalmaktadır. Burada hiç LPN kullanılmadığı duruma kıyasla, MC aktif değilken, bazı kullanıcıların LPN seçimi ile RRH iletim gücü azalmaktadır. MC fonksiyonunun aktifleştirilmesiyle  $L_f = 1$  LPN kullanımı ile yine iletim yükünün bir kısmı RRH'lerden LPN'lere geçmektedir; ancak aktif LPN sayısının daha da artmasıyla RRH iletim gücü tekrar artmaya başlamaktadır. Hiç LPN kullanılmadığı duruma kıyasla, kullanıcıların her iki erişim noktası çeşidine bağlanarak RRH iletim gücü artmaktadır.  $P_{r,max} = 43$  dBm için daha farklı bir yorumlama gerekmektedir. Burada RRH iletim gücü oldukça baskın olduğu için, girişim yönetimi, ve dolayısıyla, NOMA tekniği daha çok ön plana çıkmaktadır, NOMA'nın kullanıldığı durumda, kullanılan RRH iletim gücü NOMA kullanılmayan duruma göre yaklaşık olarak yarı yarıya azalmaktadır. MC'nin aktifleştirilmesiyle bu güç bir miktar daha düşürülebilmektedir, NOMA ile zaten daha düşük RRH iletim gücü ile çalışılmasından dolayı, MC'nin etkisi NOMA'da daha az olmaktadır.. Ayrıca,  $L_f = 1$  LPN için, OMA yönetiminde kullanılan RRH iletim gücü en az iken, NOMA ile homojen ağlara yakın bir güç tüketimi sunmaktadır. LPN sayısının artmasıyla harcanan RRH iletim gücü de artmaktadır. MC'nin aktif olmadığı durumda ise artan LPN sayısı ile harcanan RRH iletim gücü de artmaktadır.

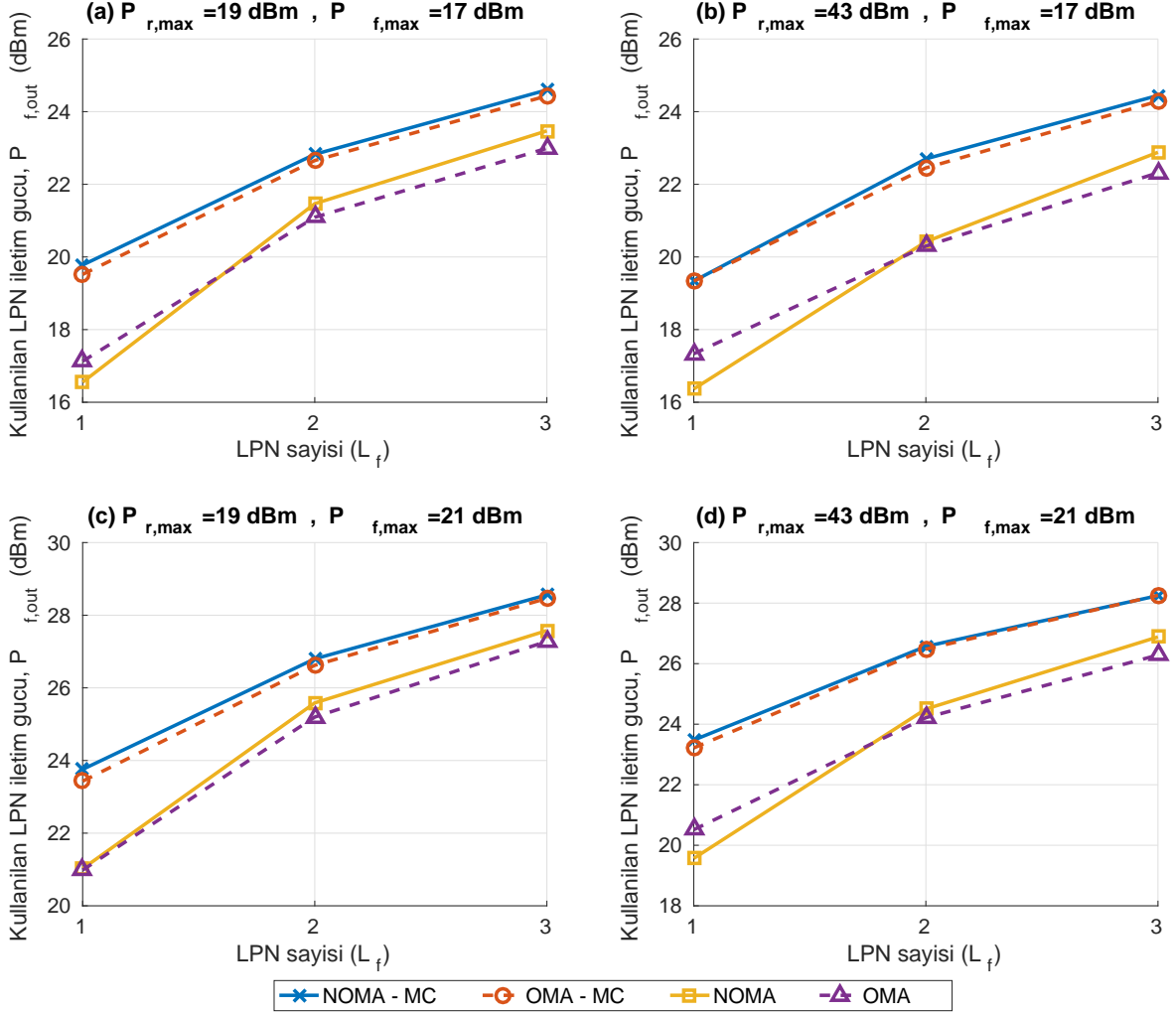
Şekil 2.30 incelendiğinde, MC aktif olduğu durumlarda daha fazla LPN iletim gücü kullanılırken, MC aktif olmadığı durumda kullanılan LPN iletim gücü azalmaktadır, MC aktif değilken,  $P_{r,max} = 19$  dBm için daha yüksek LPN iletim gücü kullanılırken,  $P_{r,max} = 43$  dBm için LPN iletim gücü düşmektedir, bu da yüksek RRH iletim gücü olduğunda ve MC aktif olmadığı durumda, kullanıcıların LPN'leri daha az tercih ettiğini göstermektedir.



Şekil 2.28.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, farklı RRH ve LPN güç sınırları ( $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$ ) için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda, enerji verimliliğinin ( $\mu_{EE}$ ) hücre başına LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (c)  $P_{r,max} = 19$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm, (d)  $P_{r,max} = 43$  dBm ,  $P_{f,max} = 21$  dBm.



Şekil 2.29.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, farklı RRH ve LPN güç sınırları ( $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$ ) için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda, topakta tüketilen toplam RRH iletim gücünün ( $P_{r,out}$ ) hücre başına LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $P_{r,max} = 19$  dBm,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (b)  $P_{r,max} = 43$  dBm,  $P_{f,max} = 17$  dBm, (c)  $P_{r,max} = 19$  dBm,  $P_{f,max} = 21$  dBm, (d)  $P_{r,max} = 43$  dBm,  $P_{f,max} = 21$  dBm.

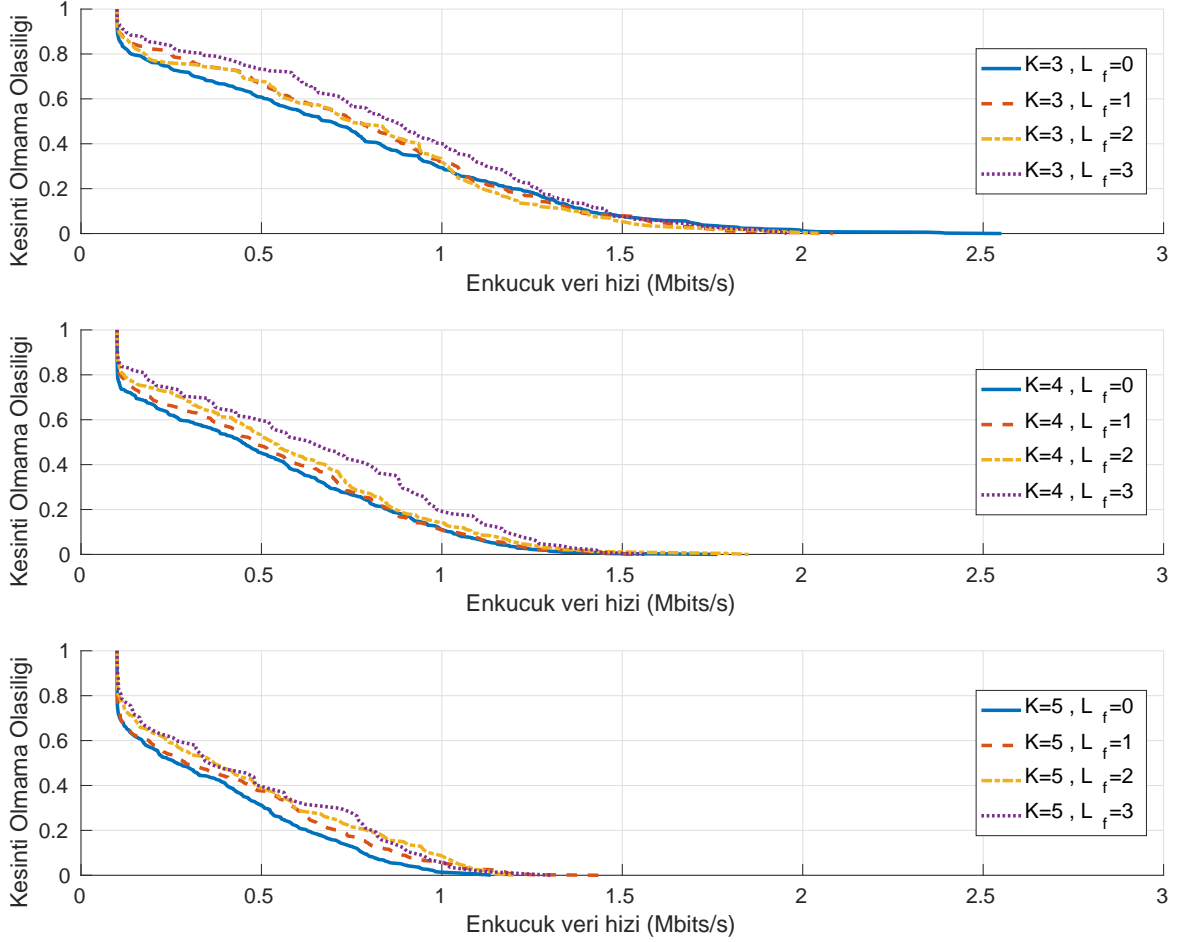


Şekil 2.30.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, farklı RRH ve LPN güç sınırları ( $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$ ) için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda, topakta tüketilen toplam LPN iletim gücünün ( $P_{f,out}$ ) hücre başına LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. Farklı hücre başına LPN sayıları ( $L_f \in [0, 3]$ ) için elde edilen NOMA ve MC fonksiyonlarının aktif durumdadır: (a)  $P_{r,max} = 19 \text{ dBm}$  ,  $P_{f,max} = 17 \text{ dBm}$ , (b)  $P_{r,max} = 43 \text{ dBm}$  ,  $P_{f,max} = 17 \text{ dBm}$ , (c)  $P_{r,max} = 19 \text{ dBm}$  ,  $P_{f,max} = 21 \text{ dBm}$ , (d)  $P_{r,max} = 43 \text{ dBm}$  ,  $P_{f,max} = 21 \text{ dBm}$ .

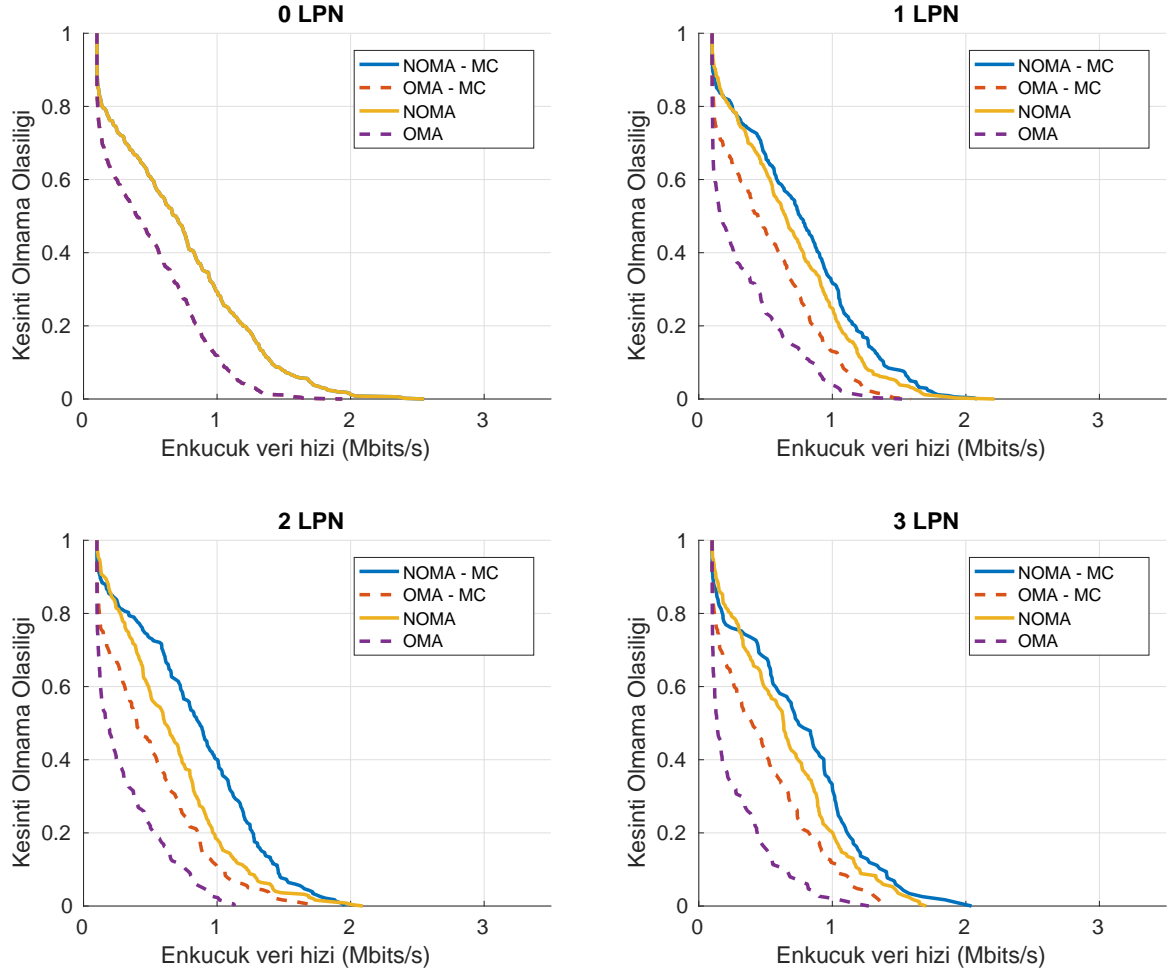
Şekil 2.31'de EE'nin ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütüldüğü problem formülasyonunda,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$ ,  $N = 3$  RB,  $P_{r,max} = 43$  dBm için, NOMA ve MC'nin aktif olduğu durumda, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için enküçük veri hızına sahip kullanıcının ( $r_{min}$ ) servis kesintisine uğramama olasılığı,  $\Pr(r(\alpha) \geq r_{min})$ , incelenmektedir. Sisteme dahil edilen kullanıcı sayısı arttıkça daha düşük  $r_{min}$  değerlerinin elde edildiği ve bu değerlerin daha düşük olasılıklara sahip olduğu gözükmektedir, yani kullanıcı sayısının artmasıyla kısıtlar daha da sıkılaşmakta ve eniyileme sonucunda kullanıcılar daha düşük veri hızlarında çalışmaktadırlar. Ağda aktif durumda olan LPN sayısı arttıkça,  $r_{min}$  değerleri genel olarak yükselmektedir. Burada eniyileme probleminin amacının  $r_{min}$ 'i enbüyütmek olmadığını, ancak belirli bir değerden büyük olması ( $r_{min} \geq r_0$ ) gerektiğini hatırlatmakta fayda görülmektedir.

Şekil 2.32'de farklı LPN sayıları için, NOMA ve MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, enküçük veri hızına ( $r_{min}$ ) sahip kullanıcının servis kesintisine uğramama olasılığı,  $\Pr(r(\alpha) \geq r_{min})$ , gösterilmektedir. Beklenildiği üzere NOMA'nın OMA'dan yüksek girişim yönetimi becerisi (daha geniş olurlu bölgeye sahip olması) ile kısıtları daha iyi sağlamasından dolayı, aynı sebeple MC'nin aktif olması da, daha yüksek  $r_{min}$  değerleri sunmaktadır. Kullanıcıların enküçük veri hızı, bir bakıma kapsamı açısından, yukarıda EE grafikleriyle uyumlu olarak, NOMA'nın katkısının MC fonksiyonuna göre daha fazla olduğu gözükmektedir. Bununla birlikte her iki fonksiyonun da kullanımı  $r_{min}$  değerini yükseltmektedir.





Şekil 2.31.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda enküçük veri hızına ( $r_{min}$ ) sahip kullanıcının servis kesintisine uğramama olasılığının,  $\Pr(r(\alpha) \geq r_{min})$ , LPN sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .



Şekil 2.32.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Enküçük veri hızına ( $r_{min}$ ) sahip kullanıcının servis kesintisine uğramama olasılığının,  $\Pr(r(\alpha) \geq r_{min})$ , NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda çeşitli LPN sayıları için incelenmektedir. (a)  $L_f = 0$ , (b)  $L_f = 1$ , (c)  $L_f = 2$ , (d)  $L_f = 3$ .

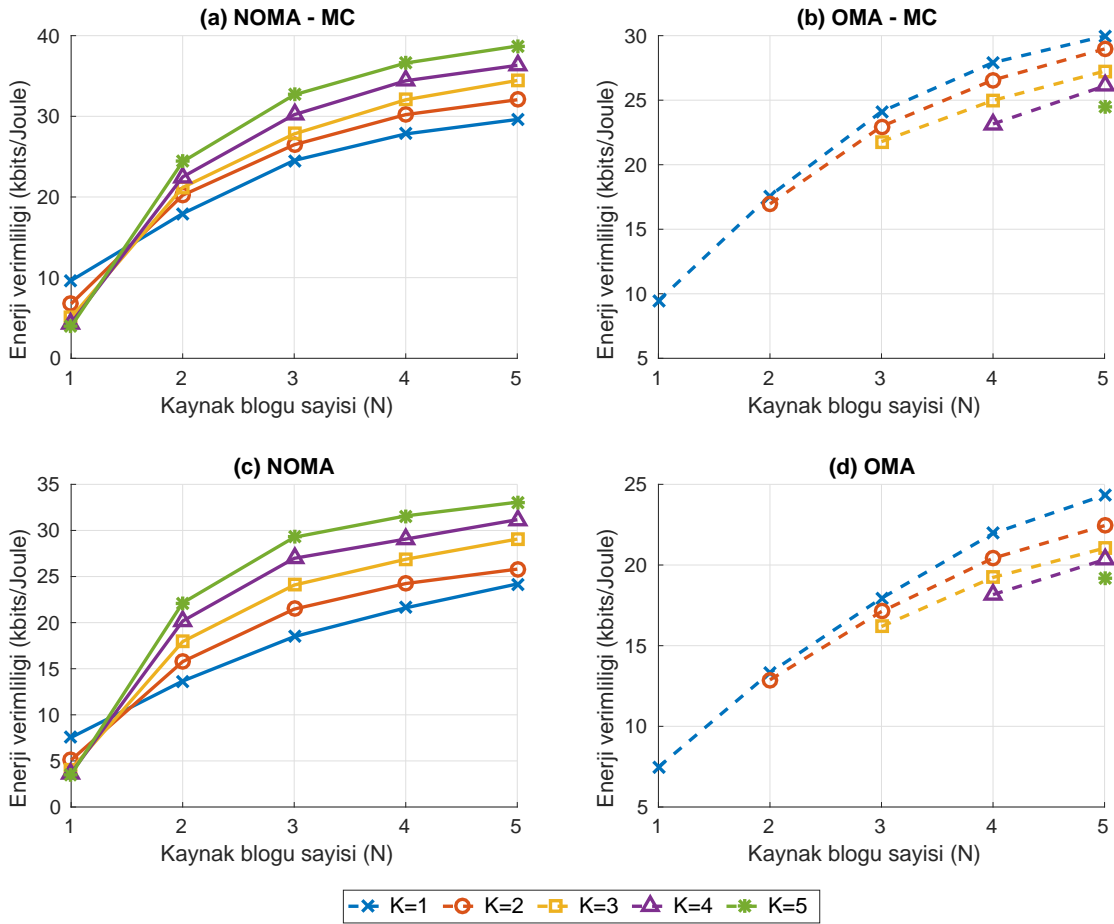
Şekil 2.33 ve Şekil 2.34'te sistem genelinde EE'nin ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütüldüğü problem formülasyonunda,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$ ,  $L_f = 1$  LPN ve  $P_{r,max} = 43$  dBm için, NOMA ve MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, sırasıyla, EE ve SE'nin kullanılabilir RB ve hücre başına kullanıcı sayısına göre değişimi incelenmektedir.

EE başarımı her NOMA, OMA ve MC kombinasyonu için RB sayısı ile paralel olarak artmaktadır. NOMA tekniğinin kullanıldığı durum incelendiğinde,  $N = 1$  RB için,  $K = 1$  kullanıcı durumu en iyi başarımı sağladığı gözükmektedir, kullanıcı sayısının artmasıyla başarımlar düşmektedir. Burada, tek taşıyıcı senaryoda, kullanıcı sayısının artması Jain adaletliliği kısıtının sağlanmasını zorlaştırmaktadır, ve bu sebeple daha düşük veri hızı değerlerinde bu kısıt sağlanmaktadır. Kullanıcı çeşitlenmesinden kazanılan kazanç, Jain adaletliliği sebebiyle başarımların kaybolmasından daha düşük olduğu için, kullanıcı sayısı arttıkça EE başarımının düştüğü gözlemlenmektedir.  $N > 1$  için, EE başarımı kullanıcı sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Burada çok taşıyıcının olması, kullanıcı çeşitlenmesi kazancını daha etkin kılmaktadır. OMA durumunda, RB sayısı arttıkça EE başarımı da artmaktadır, ancak desteklenen kullanıcı sayısı arttıkça başarımlar düşmektedir. Burada bütün RB sayıları için  $K = 1$  durumu üst sınır olarak çalışmaktadır.

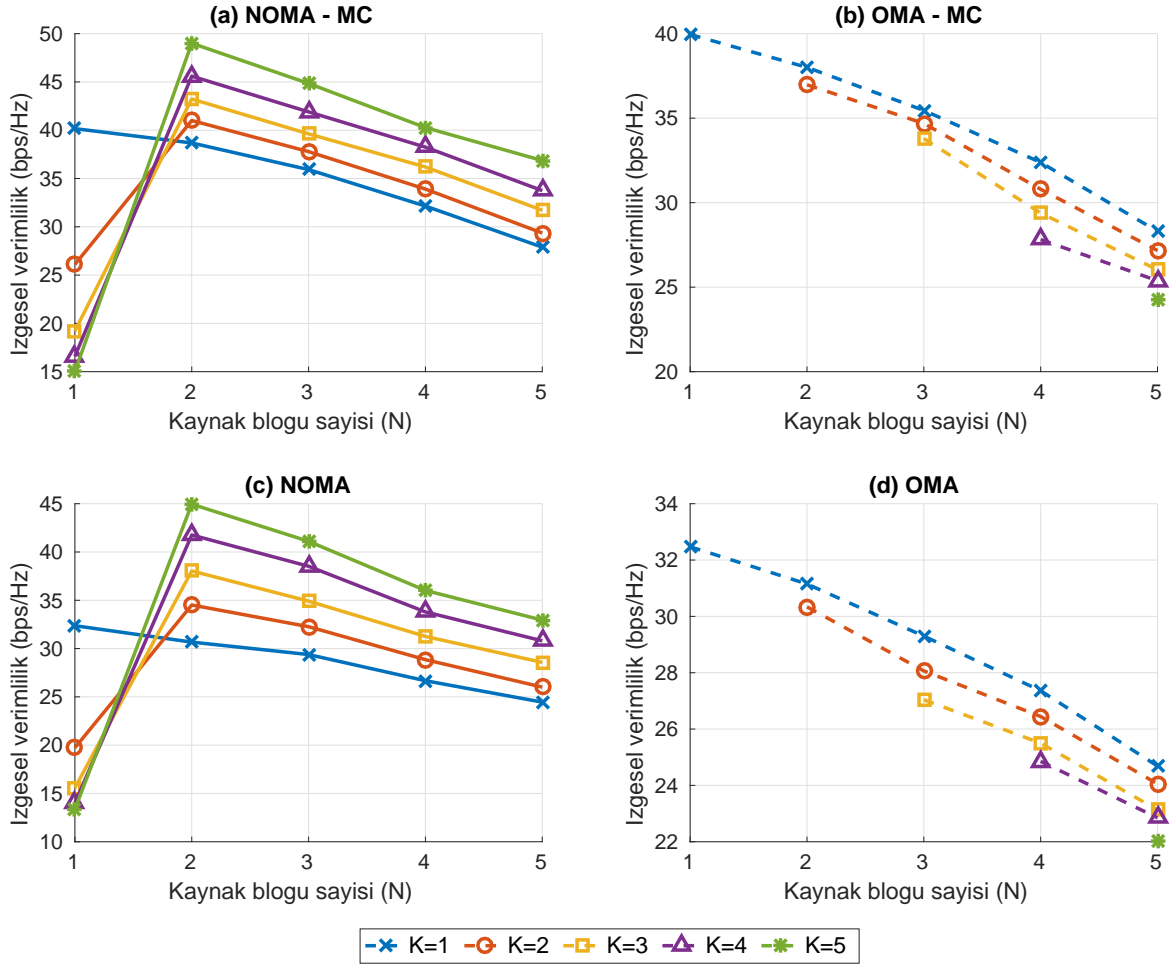
EE'nin enbüyütüldüğü problemde, izgesel verimlilik (SE), RB sayısının artmasıyla genel olarak her durum için düşmektedir. Tek istisnası, NOMA yönteminde  $N = 1$  RB'den  $N = 2$  RB'ye artış olduğunda gözlemlenmektedir.  $N = 1$  iken,  $K = 1$  kullanıcı durumu yine üst sınır olarak çalıştığı gözükmektedir, ve kullanıcı sayısı arttıkça SE artmaktadır.  $N > 1$  RB için, SE başarımı, kullanıcı sayısı ( $K$ ) ile paralel olarak artmaktadır; ancak bu artış yüksek bantgenişliği için azaldığı gözlemlenmektedir.

NOMA yönteminde, RB sayısı arttıkça  $N \neq 1$  ve  $\frac{K}{N} = 1$  için SE başarımı yaklaşık olarak aynı değerleri almaktadır. MC'nin aktif olduğu durumda yaklaşık olarak 38 bps/Hz civarlarında iken MC'nin aktif olmadığı durumda yaklaşık olarak 34 bps/Hz değerlerindedir. NOMA ile kullanıcı sayısının artmasından daha fazla faydalanılmakta; ancak OMA yönteminde  $K$  arttıkça SE başarımların artışı azalmaktadır. NOMA tekniği kullanıcılara bütün izgeyi kullanma izni vermesine rağmen hücre ve RB başına kullanıcı sayısına göre başarımlar değişmektedir. Bu sebeple (EE'nin eniyileştirildiği durumda) SE'nin  $\frac{K}{N}$  değerine göre nasıl değiştiği de incelenmektedir. Burada

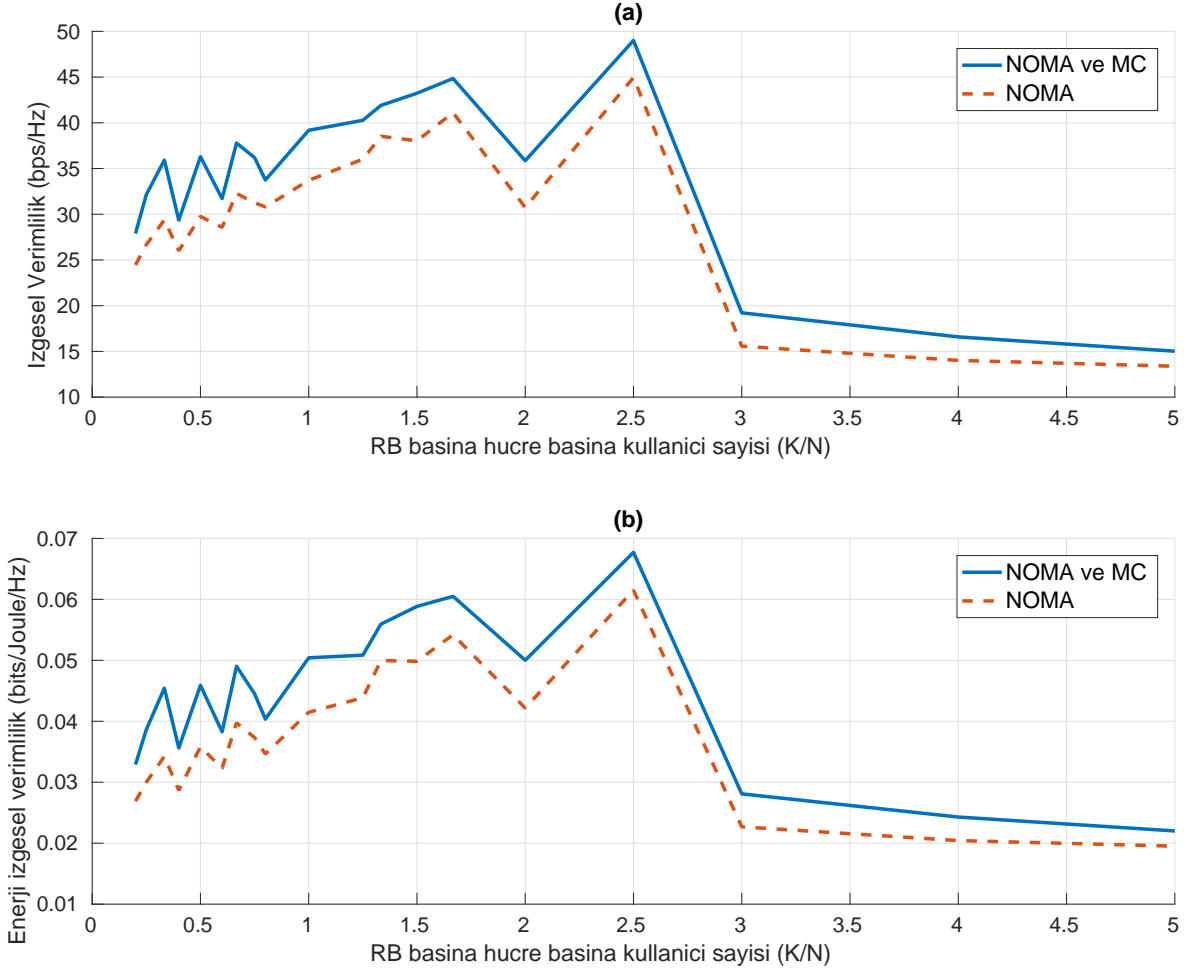
$\frac{K}{N}$  bir değişken olmamakla birlikte, Şekil 2.34'teki verilerden,  $\frac{K}{N}$ 'e göre SE değerleri bulunmuş ve aynı  $\frac{K}{N}$  değerleri için karşılık gelen SE değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu başarımlar  $1 \leq N \leq 5$  RB için Şekil 2.35'te gösterilmekte, buradaki  $N$  ve  $K$  sayısı sınırlı olduğu için,  $\frac{K}{N}$  değerleri de sınırlıdır, ve dolayısıyla, aynı  $\frac{K}{N}$  değerleri için örneklem setleri aynı değildir. Bu sebeple, pürüzsüz bir eğri çıkmamaktadır. NOMA'nın tercih edildiği senaryoda, RB'lerin en verimli kullanıldığı durum, ortalama hücredeki kullanıcı sayısının RB sayısına oranının yaklaşık olarak ( $\frac{K}{N} = 2.5$ ) olduğu durumda gözlemlenmektedir.



Şekil 2.33.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütölmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

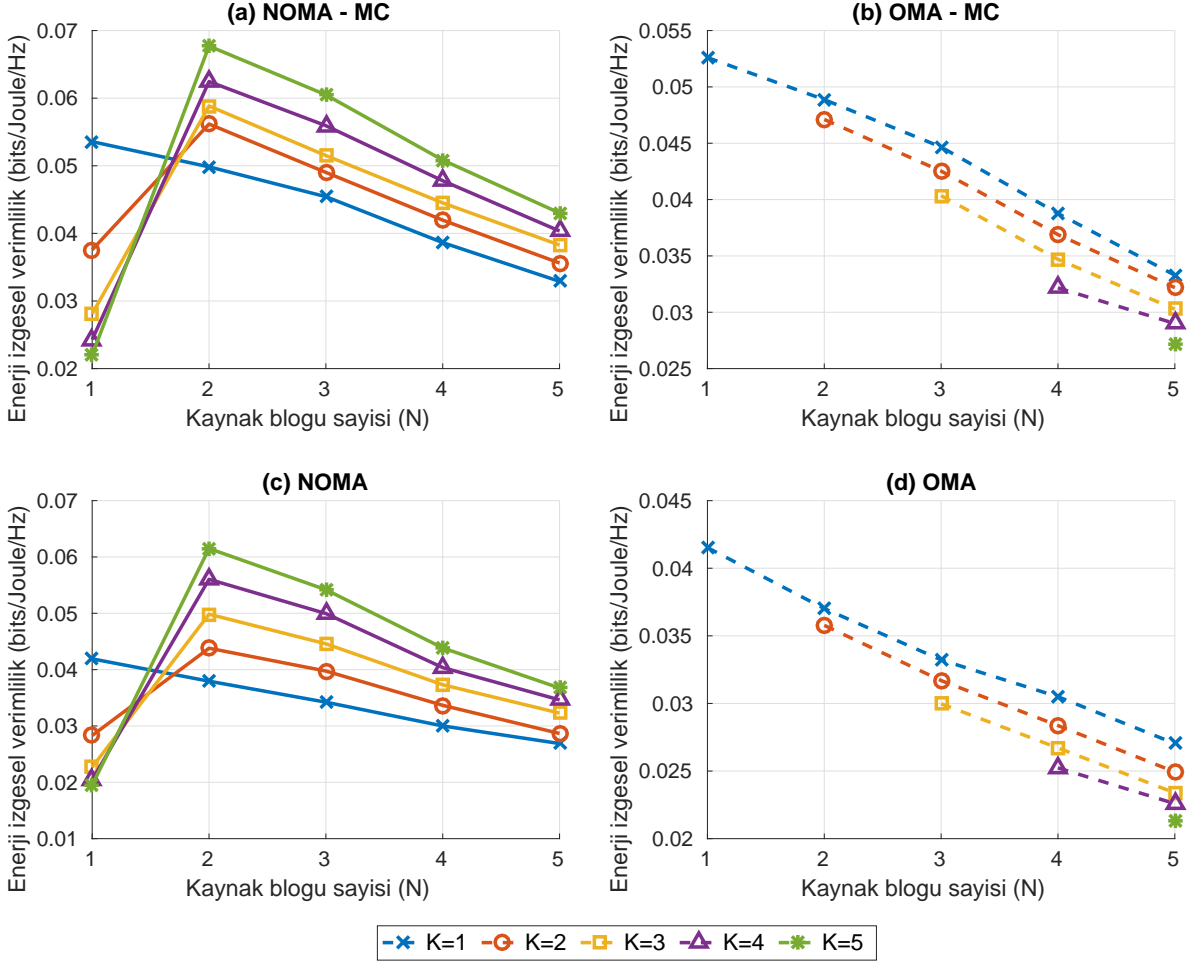


Şekil 2.34.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



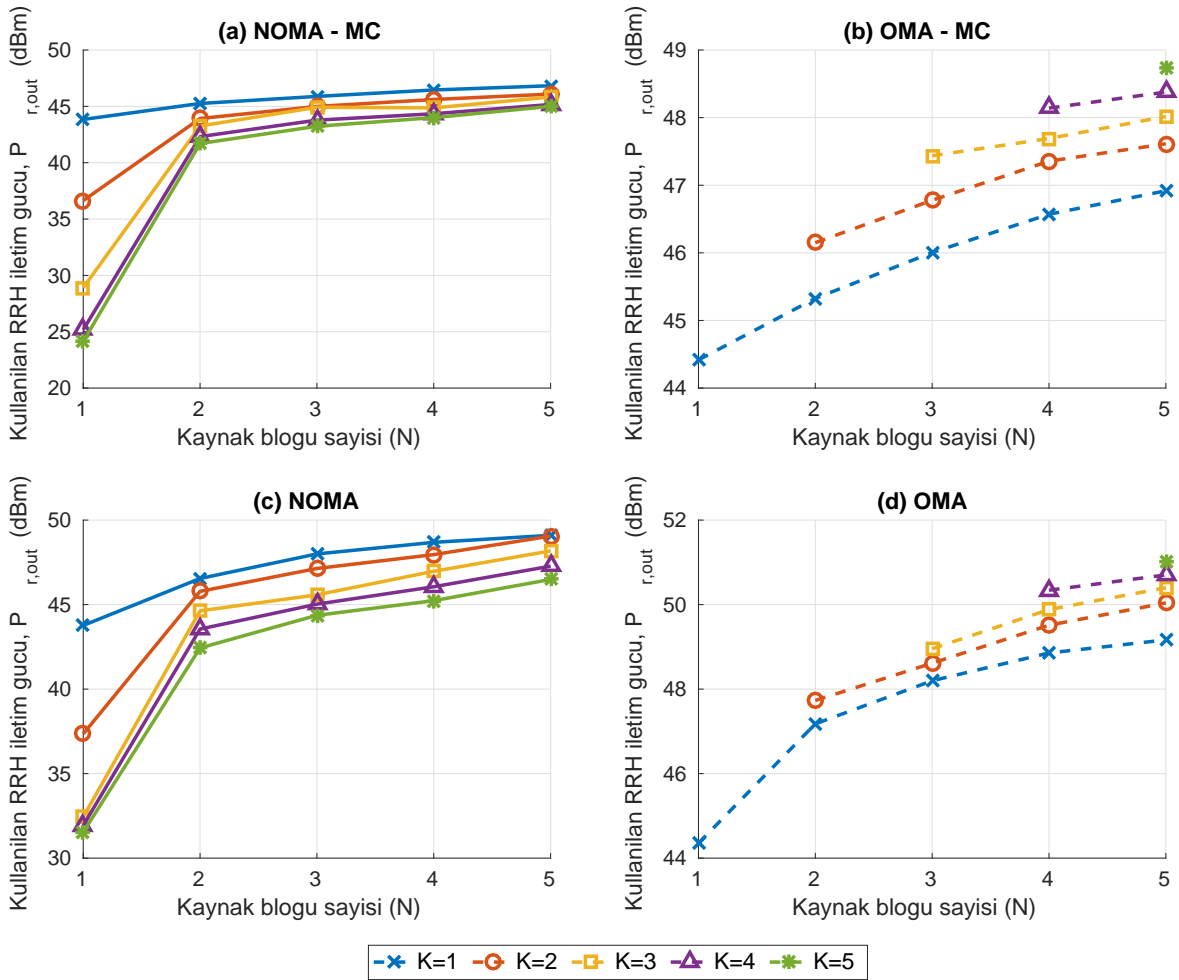
Şekil 2.35.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA'nın kullanıldığı, MC fonksiyonunun aktif olup olmadığı iki ayrı durum için izgesel verimliliğin, her hücrede RB başına düşen kullanıcı sayısına ( $K/N$ ) göre değişimi incelenmektedir.

Şekil 2.36'da ESE'nin kullanılabilir RB sayısı ile değişimi gösterilmektedir. NOMA'nın kullanıldığı durumda,  $N = 1$  için ESE,  $K$  ile azalmaktadır. Ancak  $N > 1$  için RB sayısının artması önce ESE değerini artırmakta, yani bantgenişliği daha verimli kullanılmakta, fakat daha sonra ESE düşmektedir. Burada MC'ye bağlı olmaksızın, en yüksek ESE değerine  $K = 2$  ile ulaşılmaktadır. Ancak, beklenildiği üzere, her durumda MC aktif olarak kullanıldığı durumda daha iyi başarımlara erişilmektedir. OMA tekniği kullanıldığında ise, RB sayısı ile doğrusal olarak azalan bir ESE gözükmektedir. MC fonksiyonu aktifleştirildiğinde, beklenildiği üzere başarımların artışı elde edilmektedir.



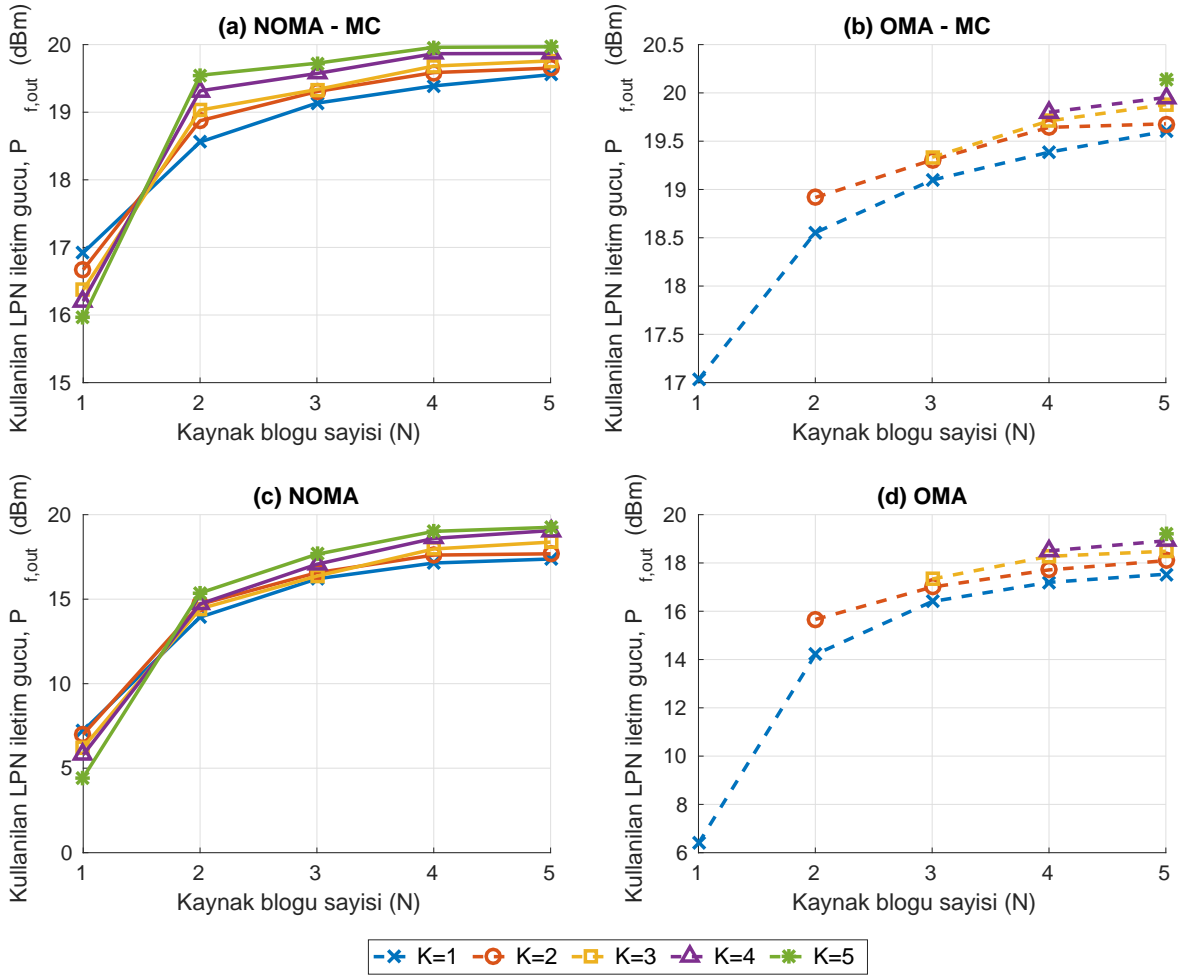
Şekil 2.36.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) en büyük olmaktadır. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

Şekil 2.37 ve Şekil 2.38'de ise kullanılan RRH ve LPN iletim güçlerinin kullanılabilir RB sayısı ile değişimi gösterilmektedir. Kullanıcı sayısının artmasıyla NOMA'nın kullanıldığı durumda kullanılan RRH iletim gücünün azaldığı, LPN gücünün ise arttığı görülmektedir. Burada kullanıcı sayısının artması ile artan girişimin yönetimi için RRH iletim gücü kısılmaktadır, ve kullanıcı çeşitlenmesi EE'deki artışın temel sebebidir. OMA tasarısının girişim yönetimindeki eksikliği sebebiyle yüksek iletim gücü kullanımı ile başarımlar artırılmakta, dolayısıyla kullanıcı sayısı arttıkça kullanılan RRH iletim gücü de artmaktadır.



Şekil 2.37.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.





Şekil 2.38.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

## 2.4 SONUÇLAR

Bu bölümde, Dinamik Dağıtık RAN (DD-RAN) mimarisinde, erişim noktalarını işbirliği içinde çalıştıran CoMP teknolojisinin kullanıldığı ağlarda, merkezi RRM ve IM uygulanmaktadır. Öncelikle, homojen ağlarda özdeş erişim noktaları, RRH, kullanılarak problemin çözümü aranmakta, ilerleyen aşamalarda ise farklı erişim noktalarının (RRH, femto-hücre, piko-hücre) birlikte yerleştirildiği heterojen ağlara uygun RRM problemleri irdelenmekte ve eniyi veya eniyiye yakın çözümler önerilmektedir. Tek taşıyıcılı senaryolar hem BPM hem CPM yöntemi ile incelenmiş; ancak çok taşıyıcılı sistemler sadece CPM yöntemi ile çalışılmıştır. Basitten karmaşığa çeşitli senaryolarda ve uygun kısıtlar altında (örn., enküçük veri hızı, azami güç, adalet) RRM problemi irdelenmekte ve eniyi veya eniyiye yakın çözümler önerilmektedir.

**İlk olarak homojen ağlarda, tek taşıyıcılı, hücre başına tek kullanıcı ve çok kullanıcı senaryolar, sırasıyla, Kısım 2.3.1.1 ve Kısım 2.3.1.2’de incelenmektedir.** Çok kullanıcı sistemde, kullanıcılar NOMA sayesinde aynı kaynak bloğunu aynı zaman diliminde kullanabilmektedirler. Her iki kısımdaki sistem modelinde, maliyet işlevi olarak öncelikle topaktaki enküçük veri hızına sahip kullanıcının veri hızı enbüyütülmüş, daha sonra uygun kısıtlar altında toplam veri hızı enbüyütülmüştür. Erişim noktalarının doğası gereği azami güç kısıtı problemde mevcut olmakla birlikte, sırayla enküçük veri hızı kısıtı, daha sonra Jain adaletliliği kısıtı da probleme eklenerek, sistem başarımlarının (toplam veri hızı, kullanılan RRH iletim gücü, topaktaki enküçük veri hızı) bu kısıtlarla nasıl değiştiği irdelenmektedir. Enküçük veri hızı veya adalet kısıtları sıkılaştırıldığında, toplam veri hızının düştüğü ve enküçük veri hızının da problemin doğası gereği arttığı gözlemlenmektedir. Kullanıcı sayısının artması da, gerek girişim değerlerinin artması, gerekse adalet kısıtlarını sıkılaştırmasından dolayı, toplam veri hızını düşürmektedir. CPM tasarısının BPM tasarısına göre her durumda (herhangi  $P_{max}$  değeri veya kullanıcı sayısı için) daha iyi başarımlar sunduğu, RRH iletim gücü limitindeki,  $P_{max}$ , artıştan BPM tasarısının çok fazla etkilenmediği, ancak CPM tasarısında ise başarımın arttığı gözlemlenmiştir. Bir başka deyişle, bütün RRH’lerini açıp kapatmaktansa iletim gücünü ayarlamak beklendiği üzere daha iyi başarımlar göstermektedir. Kısıtların gevşek olduğu durumda enbüyük değerlere ulaşan CPM yöntemi, kısıtlar sıkılaştırıldığında daha fazla başarımlar kaybetmekte;

ancak beklenildiği üzere BPM'den hala daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Ayrıca kısıtlı girişim giderimi yeteneği sebebiyle BPM yöntemi belirli kullanıcı sayısından sonra servis sağlayamamaktadır. Enküçük veri hızı kısıtı sağlanabilecek değerlerin üzerinde artırıldığında, hizmet verilen kullanıcı sayısı yine düşmektedir.

**Daha sonra, Kısım 2.3.1.3'te çok taşıyıcılı sistemde çok kullanıcıli senaryolar irdelenmektedir.** Önceki kısımlarda kullanılan NOMA, burada çok taşıyıcılı NOMA olarak güncellenmektedir ve herhangi bir kullanıcı birden fazla NOMA topağına aynı anda dahil olabilir. NOMA'nın getirdiği kazanımın incelenebilmesi için OMA tasarısı ile sistem başarımları karşılaştırılmaktadır. Bu yöntemde, bütün kullanıcıların hizmet görmesi şartıyla birlikte, her RB her hücrede sadece bir kullanıcı tarafından kullanılabilir. Bu koşul gereği, her hücrede en fazla RB sayısı kadar kullanıcıya hizmet verilebilmektedir. Çok taşıyıcılı sistem için sadece CPM tasarısı kullanılarak eniyileme problemi düzenlenmektedir. Azami iletim gücü, enküçük veri hızı ve adalet kısıtları altında toplam veri hızı, enerji verimliliği ve bu çalışmada önerilen ödünleşimli enerji verimliliği enbüyütülmüştür.

Çok taşıyıcılı durumda, belirli RB sayısı için hücre başına kullanıcı sayısı arttıkça enküçük kullanıcı veri hızları kısıtlar sebebiyle enküçük değere doğru azalmaktadır. Kullanılan kaynak bloğu sayısı arttıkça, problemin olurlu bölgesinin de büyümesi sebebiyle, enküçük kullanıcı veri hızının arttığı gözlemlenmektedir. Yüksek serbestlik derecesine sahip NOMA için, kullanıcı çeşitlemesi ve bantgenişliğinin artması, maliyet işlevini (toplam veri hızı, enerji verimliliği) artırmaktadır. Burada, tek taşıyıcı için (önceki kısımlarla uyumlu olarak) kullanıcı sayısı arttıkça toplam veri hızı (veya enerji verimliliği) düşmekte, ancak birden fazla RB sayısı için kullanıcı sayısı ile paralel bir şekilde başarımın da arttığı gözlemlenmektedir. Ancak OMA yönteminde, kullanıcı çeşitlemesi, belirli sayıda kullanıcıya kadar başarımı artırmakta, daha sonra iletim gücünün paylaşımı sebebiyle ya değişmemektedir ya da ufak miktarlarda düşmektedir, bu düşüş Jain adaletliliği kısıtının sıkılaşmasına bağlıdır, ki adalet kısıtı sıkılaştıkça, daha önceki kısımlarda anlatılan sebeplerle enküçük kullanıcı veri hızı da artmaktadır.

Ayrıca, toplam veri hızının enbüyütülmesi ile kullanılan iletim gücünün enküçültülmesi arasında bir ödünleşim oluşturularak sistem davranışının incelenebildiği bir

maliyet işlevi önerilmektedir. Azami iletim gücü, en küçük veri hızı ve adalet kısıtları altında, bir ödünleşim parametresine ve  $P_{\max}$  değerine karşı enerji verimliliğinin ve toplam veri hızının nasıl davrandığı incelenmektedir. Parametrenin etkisiz olduğu durumda, iletim gücünün en küçültülmesinin önemsiz olduğu görülmekte ve toplam veri hızının en büyüldüğü durumla benzer sonuçlar elde edilmektedir. Ancak bu durumda, enerji verimliliğinin düştüğü, yani iletim gücünün verimsiz kullanıldığı gözlemlenmektedir. Parametre değeri değiştirilerek, hem toplam veri hızının hem de enerji verimliliğinin en büyüldüğü bölgeler elde edilebilmektedir. Arzu edildiği takdirde, parametre değiştirilerek, iletim gücünün en küçültüldüğü bölgeye ulaşılabilir; ancak bu durumda enerji verimliliği ve toplam veri hızı düşmektedir.

**Kısım 2.3.2.1’de ise çok kullanıcı ve çok taşıyıcı heterojen ağlarda, CPM tasarısı kullanılarak enerji verimliliği başarıyı yine aynı kısıtlar altında incelenmektedir.** Bu kısımda, kullanıcıların RRH’lere ve farklı güç değerlerine sahip LPN’lere aynı anda bağlanıp sinyal alabilmesine olanak sağlayan MC fonksiyonunun kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak yeni bir kısıt eklenmiştir. NOMA ile MC fonksiyonlarının katkıları irdelenmiş, aktif olan LPN sayısının, tüketilen iletim güçlerini, enerji ve izgesel verimliliği nasıl etkilediği incelenmiştir. İlk olarak EE’nin kullanıcı sayısı ve erişim noktalarının güç sınırları ( $P_{r,\max}$ ,  $P_{f,\max}$ ) ile nasıl değiştiği incelenmiş,  $P_{\max}$  değerlerinin artması ve dolayısıyla problemin olurlu bölgesinin büyümesi sebebiyle, NOMA ve MC’nin aktif olup olmamasına bağlı olmaksızın, sistem başarımının arttığı gözlemlenmiştir.

Artan LPN sayısının, MC fonksiyonunun kullanılmadığı durumlarda başarıyı (her  $P_{\max}$  değeri için) düşürdüğü, MC fonksiyonunun aktif olduğu durumlarda ise başarıyı çok fazla etkilemediği görülmektedir. MC fonksiyonu aktif değilken, yerleştirilen LPN’lerin iletilen kullanıcı sinyaline çok fazla katkısı olmadığından, ancak çalışması için gereken (iletim harici) gücün sürekli tüketilmesi sebebiyle başarı düşmektedir. MC fonksiyonu ile RRH ve LPN’lerden aynı anda yararlanarak bu zararı giderebilmektedirler. Tek taşıyıcı durumunda, kullanıcı sayısı artarken kullanıcılar arasındaki adalet kısıtının etkisi daha çok etkili olarak başarıyı düşürürken, çok taşıyıcı durumunda genişleyen olurlu bölge ile kısıtların sağlanması kolaylaşmakta ve kullanıcı çeşitlenmesi ile başarımın arttığı görülmüştür. Girişim yönetimi becerisi ve serbest-

lik derecesi daha düşük olan OMA tasarısında, aktif LPN sayısının başarıma etkisi NOMA'ya kıyasla daha belirgin olarak gözükmemektedir. NOMA veya MC fonksiyonlarının aynı anda aktif olarak kullanılmasıyla alıcıda artacak olan hesaplama karmaşıklığının istenmediği durumlarda, aktif olan LPN sayısına göre değişecek şekilde, NOMA veya MC fonksiyonundan herhangi birisinin seçilebileceği gözlemlenmektedir.

İletim güçlerinin aktif olan LPN sayısı ile nasıl değiştiği de ayrıca incelenmiştir. RRH iletim gücü sınırı LPN iletim gücüne yakın olduğunda ( $P_{r,max} = 19$  dBm), RRH ve LPN'ler beklendiği üzere benzer güç tüketmektedirler. MC'nin kullanılmadığı durumda LPN sayısının artmasıyla kullanılan RRH iletim gücünün sürekli azaldığı gözlemlenmiştir. Burada hiç LPN kullanılmadığı homojen ağlara kıyasla bazı kullanıcıların LPN seçimi ile RRH iletim gücü azalmaktadır. MC fonksiyonunun aktifleştirilmesiyle bir LPN kullanımı ile yine iletim yükünün bir kısmı RRH'lerden LPN'lere aktarılmakta; ancak aktif LPN sayısının daha da artmasıyla RRH iletim gücü tekrar artmaya başladığı görülmektedir. Yüksek RRH güç sınırlamaları için ( $P_{r,max} = 43$  dBm) için durum biraz daha farklıdır. Burada, NOMA'nın kullanıldığı durumda, kullanılan RRH iletim gücü NOMA kullanılmayan duruma göre yaklaşık olarak yarı yarıya azaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, tek LPN için, OMA yönetiminde kullanılan RRH iletim gücü en az iken, LPN sayısının artmasıyla harcanan RRH iletim gücü de artmaktadır. MC'nin aktif olmadığı durumda ise artan LPN sayısı ile harcanan RRH iletim gücü de artmaktadır. NOMA ile zaten daha düşük RRH iletim gücü ile çalışılmasından dolayı, MC'nin etkisi net olarak görülmemektedir. MC aktif olduğu durumlarda daha fazla LPN iletim gücü kullanılırken, MC aktif olmadığı durumda kullanılan LPN iletim gücünün azaldığı görülmüştür. Yüksek RRH iletim gücü kullanıldığında ve MC aktif olmadığı durumda, kullanıcıların LPN'leri daha az tercih ettiği gözlemlenmektedir.

Enküçük veri hızına ( $r_{min}$ ) sahip kullanıcının kesintiye uğramama olasılığı incelenmekte, hizmet alan kullanıcı sayısı arttıkça daha düşük  $r_{min}$  değerlerinin elde edildiği ve bu değerlerin daha düşük olasılıklara sahip olduğu görülmektedir. Burada, kullanıcı sayısının artmasıyla adalet kısıtı daha da sıkılaşmakta ve kullanıcılar daha düşük veri hızlarında çalışmaktadırlar. Ağda aktif durumda olan LPN sayısı arttıkça,  $r_{min}$  değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Farklı LPN sayıları için, NOMA ve MC'nin

aktif olup olmadığı çeşitli durumlarda, enküçük veri hızına sahip kullanıcının servis kesintisine uğramama olasılığı incelendiğinde, NOMA ve MC tekniklerinin enküçük veri hızını daha fazla artırabildiği gözlemlenmektedir. Burada bu tekniklerle eniyileme probleminin olurlu bölgesinin genişlemesi ve kısıtların daha rahat bir şekilde sağlanması temel sebeptir.

EE başarımı her NOMA, OMA ve MC kombinasyonu için RB sayısı ile paralel olarak artmaktadır. Ancak farklı RB sayıları için kullanıcı sayısına bağlı olarak başarımlar değişebilmektedir. NOMA tekniğinin kullanıldığı durum incelendiğinde,  $N = 1$  RB için,  $K = 1$  kullanıcı durumu en iyi başarımları sağladığı gözlemlenmektedir, kullanıcı sayısının artmasıyla başarımlar düşmektedir. Burada, tek taşıyıcı senaryoda, kullanıcı sayısının artması adaletlilik kısıtının sağlanmasını zorlaştırmakta ve kullanıcı çeşitlenmesine rağmen daha düşük EE değerlerinde bu kısıtın sağlandığı gözlemlenmektedir. Aynı şekilde homojen ağlarda tek taşıyıcı sistemlerde de bu sonuç görülmektedir.  $N > 1$  RB için olurlu bölge genişlemekte ve EE başarımının kullanıcı sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir. Burada çok taşıyıcının olması, kullanıcı çeşitlenmesi kazancını daha etkin kılmaktadır. OMA durumunda, RB sayısı arttıkça EE başarımının arttığı, ancak desteklenen kullanıcı sayısı arttıkça başarımın düştüğü, bütün RB sayıları için  $K = 1$  kullanıcı senaryonun üst sınır olarak çalıştığı gösterilmektedir. EE'nin enbüyütüldüğü problemde, izgesel verimlilik (SE), RB sayısının artmasıyla genel olarak her durum için düşmektedir. Tek istisnası, NOMA yönteminde  $N = 1$  RB'den  $N = 2$  RB'ye artış olduğunda görülmektedir.  $N > 1$  RB için, SE başarımı, kullanıcı sayısı ( $K$ ) ile paralel olarak artmaktadır; ancak bu artışın yüksek bantgenişliğinde azaldığı gözlemlenmektedir. RB başına kaç adet kullanıcıya hizmet verilerek bantgenişliğinin en verimli şekilde kullanıldığı gözlemlenebilmesi için, elde edilen sonuçlardan RB başına düşen kullanıcı sayısına göre izgesel verimlilik karşılaştırılmıştır. Buradan ortalamada iki RB başına beş kullanıcı ile bantgenişliğinden enbüyük verimle faydalandığı görülmektedir. RRH ve LPN iletim güçlerinin kullanılabilir RB sayısı ile arttığı gösterilmektedir. Kullanıcı sayısının artmasıyla NOMA'nın kullanıldığı durumda kullanılan RRH iletim gücünün azaldığı, LPN gücünün ise arttığı gösterilmektedir. OMA yönteminin girişim yönetimindeki eksikliği sebebiyle yüksek iletim gücü kullanımı ile başarımlar artırılabilir, dolayısıyla kullanıcı sayısı arttıkça kullanılan RRH iletim gücünün de arttığı gözlem-

lenmektedir.

Genel bir karşılaştırma yapıldığında serbestlik derecesi en yüksek olan NOMA'nın kullanıldığı ve MC'nin aktif olduğu durum en iyi başarıyı sunmaktadır. Düşük  $P_{r,max}$  değeri için, MC aktif olmadan sadece NOMA kullanımı, OMA ile MC'nin aktif olduğu durumdan genellikle daha iyi EE sunmaktadır; yani NOMA'nın kullanımı MC'nin aktif olmasından daha önemlidir, LPN sayısı çok fazla arttığında ise MC aktif olmadığında başarımlar daha fazla düşmeye başlamaktadır. Yüksek  $P_{r,max}$  değeri için, heterojen ağlarda, NOMA'nın kullanımının MC'nin aktif olması arasındaki başarımların farkı LPN sayısına bağlıdır. Eğer karmaşıklığın çok artmaması için, NOMA veya MC fonksiyonlarından bir tanesi seçilecekse, düşük sayıda LPN için NOMA daha önemliken, yüksek sayıda LPN için NOMA yerine MC seçilebilir. Bu seçim kullanıcı uç birimlerinin kod çözümü yeteneğine de bağlı olacaktır.

### 3. DAĞITIK RAN (D-RAN) MİMARİSİ

Bölüm 2'de bağlantırlık gibi bazı ağ fonksiyonlarının hücrelerarasında dağıtılıp RRM gibi bazılarının ise merkezi olarak tutulduğu dinamik dağıtık RAN yapısına sahip mimari incelenmişti. Bu bölümde ağ fonksiyonlarının hiçbirinin merkezi olmadığı dağıtık RAN yapısı incelenmektedir. Her hücre kendi radyo kaynak yönetimi ve girişim yönetiminden sorumludur, dolayısıyla her hücrenin kendi kontrolörleri mevcuttur. Dinamik dağıtık RAN ve dağıtık RAN için ayrıntılı bilgi Kısım 1.1.3.2'de verilmektedir.

Bu bölümde RRM ve IM dağıtık ve merkezi olmayan olarak iki ayrı koordinasyon seviyesinde incelenmektedir. Dağıtık RRM için her hücre komşu hücrelerden gelen girişim seviyesi ve kanal durum bilgisi gibi kullanıcı başarımlarını etkileyen bilgilere ulaşabilmektedir, yani hücrelerin kararları bir sonraki ağ eniyilemesinde birbirlerini dolaylı olarak etkilemektedir. Merkezi olmayan RRM'de ise hücreler, diğer hücrelerle alakalı herhangi bir bilgiye sahip değildirler, ve en kötü durum senaryoları altında farklı girişim seviyeleri ile eniyileme yapmaktadırlar.

#### 3.1 SİSTEM MODELİ

Önceki bölümle aynı şekilde Kısım 1.4.1'de tanımlanan ağ modeli benimsenmektedir. Çok kullanıcı ve çok taşıyıcı heterojen ağlar için sistem modeli aşağıda tanımlanmaktadır. Bölüm 2 ile benzer şekilde kullanıcılar sadece bulunduğu hücrenin erişim noktalarından sinyal almaktadır; ve diğer hücrelerden gelen sinyaller (hücrelerarası) girişim olarak kabul edilmektedir.

Her erişim noktası ve kullanıcının birer adet antene sahip olduğu varsayıldığı bu senaryoda, RRH'lerin ve LPN'lerin iletim yapabileceği güç sırasıyla  $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$  ile sınırlanmaktadır.  $m$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının iletim gücü sınırı  $P_{\ell m}$  ile genelleştirilmektedir.  $m$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerinde  $k$ 'inci kullanıcı için ayırdığı iletim gücü  $\alpha_{\ell mki}$  katsayıları ile ayarlanmaktadır. Problem Sürekli Güç Yönetimi (CPM) için düzenlenmektedir, yani her RRU ( $\alpha_{\ell mki} \in [0, 1]$ ) aralığı dahilinde herhangi bir güç seviyesinde iletim yapabilecektir; ancak herhangi bir erişim noktasında bütün RRU'ların bütün kullanıcılar için bütün RB'ler üzerinden harcadığı toplam iletim gücü (RRH için  $P_{r,max}$ , LPN için  $P_{f,max}$ ) ile



sınırlandırılmaktadır.

CoMP haberleşme yöntemi ile bir hücredeki erişim noktaları bir veya birden fazla kullanıcıya aynı anda sinyaller gönderebilmektedir, dolayısıyla  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci kaynak bloğunda aldığı sinyal

$$y_{kmi} = \left( \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell mki} P_{\ell m}} h_{\ell mki} \omega_{\ell mki} \right) x_{km} + \sum_{j=1, j \neq k}^{K_m} \left( \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell mji} P_{\ell m}} h_{\ell mki} \omega_{\ell mji} \right) x_{jm} + \text{ICI}_{kmi} + \eta_{kmi}, \quad \forall m, k, i, \quad (3.1)$$

olarak yazılmaktadır, burada  $m = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq M\}$ ,  $n = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq M\}$ ,  $\ell = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq L_r + L_f\}$ ,  $j = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq K_m, \forall m\}$ ,  $k = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq K_m, \forall m\}$ , ve  $i = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq N\}$  için,  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcıya iletilecek bilgi sinyali  $x_{km}$  ile temsil edilmekte ve  $E[x_{km} x_{jn}] = \delta_{nm} \delta_{jk}$  eşitliği geçerlidir, yani,  $m \neq n$  veya  $k \neq j$  durumunda gelen farklı bilgi sinyalleri ilintisizdir.  $\alpha_{\ell mki}$  ve  $\omega_{\ell mki}$  katsayıları, sırasıyla,  $m$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerinde  $k$ 'inci kullanıcı için ayırdığı iletim gücünü ve hüzme yönlendirmeyi kontrol etmektedir.  $n$ 'inci hücrenin  $\ell$ 'inci erişim noktası ile  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerindeki kanal katsayısı  $h_{\ell nkmi}$  ile temsil edilmektedir.  $\sigma_{\eta}^2$  değişintili sıfır ortalamalı çevrimsel eklenir beyaz Gauss gürültü  $\eta_{kmi}$  ile gösterilmektedir. Eşitlik (3.1)'deki ilk terim  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcıya gönderilmek istenen sinyali gösterirken, ikinci terim ilgili kullanıcının bulunduğu hücreden gelen hücre içi girişimi, üçüncü terim (ICI) diğer hücrelerden gelen girişim sinyallerinin toplamını ve son terim de gürültüyü temsil etmektedir. Hücrelerarası girişim değeri ( $\text{ICI}_{kmi}$ ) dağıtık RRM için

$$\text{ICI}_{kmi} = \sum_{n=1, n \neq m}^M \sum_{j=1}^{K_n} \left( \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell nji} P_{\ell n}} h_{\ell nkmi} \omega_{\ell nji} \right) x_{jn} \quad (3.2)$$

olarak yazılır, merkezi olmayan RRM'de hücredeki kontrolör komşu hücrelerden gelen girişim bilgisine sahip olmadığı için  $\text{ICI}_{kmi}$  değeri en kötü senaryo koşulu düşünülerek  $I_{\max}$  gücünde varsayılarak sistem başarımı incelenmektedir. Dolayısıyla  $m$ 'inci hücredeki ilgili kullanıcının sinyal gücünün, gürültü girişim gücüne oranını belirten

SINR

$$\gamma_{kmi}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) = \frac{\left| \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell mki}} \mathbf{P}_{\ell m} \mathbf{h}_{\ell mki} \omega_{\ell mki} \right|^2}{\sigma_{\eta}^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^{K_m} \left| \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell mji}} \mathbf{P}_{\ell m} \mathbf{h}_{\ell mki} \omega_{\ell mji} \right|^2 + \sigma_{ICI}^2}, \quad \forall k, m, i, \quad (3.3)$$

olarak bulunur. Burada  $\sigma_{ICI}^2$  hücrelerarası girişimin gücünü temsil etmektedir, ve dağıtık RRM için

$$\sigma_{ICI}^2 = \sum_{n=1, n \neq m}^M \sum_{j=1}^{K_n} \left| \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell nji}} \mathbf{P}_{\ell n} \mathbf{h}_{\ell nki} \omega_{\ell nji} \right|^2 \quad (3.4)$$

ile ifade edilmektedir; merkezi olmayan RRM için ise çeşitli  $\sigma_{ICI}^2 = I_{\max}$  değerleri için sistem başarımı incelenecektir. Matematiksel takibi kolaylaştırmak için SINR değeri matris biçiminde

$$\gamma_{kmi}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) = \frac{\boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{C}_{kmi}(\boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\alpha}}{\sigma_{\eta}^2 + \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{D}_{kmi}(\boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\alpha}} \quad \forall k, m, i, \quad (3.5)$$

olarak düzenlendiğinde bütün topak için güç kontrol vektörü  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1^T \alpha_2^T \cdots \alpha_N^T]^T$ ,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_i &= [\alpha_{1i}^T \alpha_{2i}^T \cdots \alpha_{Mi}^T]^T, \\ \boldsymbol{\alpha}_{mi} &= [\alpha_{m1i}^T \alpha_{m2i}^T \cdots \alpha_{mK_m i}^T]^T, \\ \boldsymbol{\alpha}_{mki} &= [\sqrt{\alpha_{1mki}} \sqrt{\alpha_{2mki}} \cdots \sqrt{\alpha_{Lmki}}]^T, \\ &= [\sqrt{\alpha_{1mki}} \sqrt{\alpha_{2mki}} \cdots \sqrt{\alpha_{L_r, mki}} \sqrt{\alpha_{(L_r+1)mki}} \cdots \sqrt{\alpha_{(L_r+L_i)mki}}]^T, \end{aligned} \quad (3.6)$$

alt vektörlerinden oluşmaktadır. Burada  $\alpha_{mki}$   $m$ 'inci hücredeki erişim noktalarından buldukları hücredeki  $k$ 'inci kullanıcıya  $i$ 'inci RB üzerinden gönderilen sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha_{mi}$   $m$ 'inci hücredeki erişim noktalarından buldukları hücredeki bütün kullanıcılara ( $m$ 'inci hücre için  $K_m$  adet)  $i$ 'inci RB üzerinden gönderilen sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha_i$  topaktaki erişim

noktalarından buldukları hücredeki bütün kullanıcılara  $i$ 'inci RB üzerinden gönderdikleri sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha$  ise bütün sistemdeki sinyal iletiminin güç kontrolünü sağlayan elemanların hepsinden oluşmaktadır.

Eşitlik (3.4)'te tanımlanan diğer hücrelerden gelen girişim gücünü kontrol eden güç kontrol katsayıları  $m$ 'inci hücrenin eniyileme sürecine müdahil olmadığından, ve ilgili hücrenin bütün RB'leri dahil ederek iletimi kontrol eden güç kontrol vektörü

$$\alpha_m = [\alpha_{m1}^T \alpha_{m2}^T \cdots \alpha_{mN}^T]^T \quad (3.7)$$

olacak şekilde  $\alpha$  vektörünün bir alt vektörü olması dolayısıyla,  $m$ 'inci hücrenin başarımının eniyileştirilmesi adımı sabit kalacak olan diğer  $M-1$  hücrenin güç kontrol elemanları

$$\zeta_m = [\zeta_{m,1}^T \zeta_{m,2}^T \cdots \zeta_{m,N}^T]^T, \quad (3.8)$$

vektöründe toplanmaktadır ve

$$\zeta_{m,i} = \left[ \bigoplus_{n=1}^{m-1} \alpha_{ni}^T \quad \mathbf{0}_{LK_m}^T \quad \bigoplus_{n=m+1}^M \alpha_{ni}^T \right], \quad (3.9)$$

alt vektörlerinden oluşmaktadır, burada  $\alpha_{ni}$  vektörü Eşitlik (3.6)'da tanımlanmaktadır.  $\mathbf{0}_{LK_m}$  ( $LK_m \times 1$ ) boyutunda sıfır vektördür ve böylece  $m$ 'inci hücreye karşılık gelen güç kontrol elemanları sıfır olarak atanmaktadır.

$\alpha_m$  ve  $\zeta_m$  kullanımıyla Eşitlik (3.5)'te tanımlanan SINR değeri dağıtık RRM için

$$\gamma_{kmi}(\alpha_m, \zeta_m, \omega) = \frac{\alpha_m^T \mathbf{C}_{kmi}(\omega) \alpha_m}{\sigma_\eta^2 + \zeta_m^T \tilde{\mathbf{D}}_{kmi}(\omega) \zeta_m + \alpha_m^T \mathbf{D}_{kmi}(\omega) \alpha_m} \quad \forall k, m, i, \quad (3.10)$$

ve merkezi olmayan RRM için

$$\gamma_{kmi}(\alpha_m, \omega) = \frac{\alpha_m^T \mathbf{C}_{kmi}(\omega) \alpha_m}{\sigma_\eta^2 + I_{\max} + \alpha_m^T \mathbf{D}_{kmi}(\omega) \alpha_m} \quad \forall k, m, i, \quad (3.11)$$

olacak şekilde  $m$ 'inci hücre parametreleri cinsinden tekrar yazılabilir. Burada gönderilen sinyal kanal matrisi  $\mathbf{C}_{kmi} \in \mathbb{C}^{LK_m N \times LK_m N}$ , hücre içi girişim kanal matrisi  $\mathbf{D}_{kmi} \in$

$\mathbb{C}^{LK_m N \times LK_m N}$ , ve hücrelerarası girişim kanal matrisi  $\tilde{\mathbf{D}}_{kmi} \in \mathbb{C}^{LK_t N \times LK_t N}$

$$\mathbf{C}_{mki}(\omega) = \bigoplus_{u=1}^{i-1} \mathbf{0}_{LK_m} \bigoplus_{j=1}^{K_m} [\mathbf{c}_{mmk}]_j \mathbf{F}_{mj,mk,i}(\omega) \bigoplus_{u=i+1}^N \mathbf{0}_{LK_m}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{D}_{mki}(\omega) = \bigoplus_{u=1}^{i-1} \mathbf{0}_{LK_m} \bigoplus_{j=1}^{K_m} [\mathbf{d}_{mmk}]_j \mathbf{F}_{mj,mk,i}(\omega) \bigoplus_{u=i+1}^N \mathbf{0}_{LK_m}, \quad (3.13)$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{mki}(\omega) = \bigoplus_{u=1}^{i-1} \mathbf{0}_{LK_t} \bigoplus_{n=1}^M \bigoplus_{j=1}^{K_n} [\mathbf{d}_{nmk}]_j \mathbf{F}_{nj,mk,i}(\omega) \bigoplus_{u=i+1}^N \mathbf{0}_{LK_t}, \quad (3.14)$$

olarak tanımlanmaktadır ve doğrudan toplam operatörü ile blok köşegen yapısında oluşturulmaktadır. Burada  $\mathbf{0}_{LK_t}$  ( $LK_t \times LK_t$ ) boyutunda sıfır matrisini temsil etmektedir. Kanal seçim vektörleri olarak adlandırılan  $\mathbf{c}_{nmk}$  ve  $\mathbf{d}_{nmk}$ , sırasıyla gönderilmek istenen sinyalin ve girişim terimlerinin (seviyesinin) seçiminde görevlidir ve  $j$ 'inci elemanları

$$[\mathbf{c}_{nmk}]_j = \delta_{nm} \delta_{jk}, \quad (3.15)$$

$$[\mathbf{d}_{nmk}]_j = (1 - \delta_{nm}) + \delta_{nm} (\delta_{SIC} \delta_{j>k} + (1 - \delta_{SIC})), \quad (3.16)$$

olarak tanımlanmaktadır.  $m \neq n$  için hücrelerarası girişim terimleri,  $m = n$  için hücreiçi kullanıcılar arası girişim terimleri seçilmektedir.  $\delta_{SIC} = 1$  durumunda sıralı girişim giderimi kullanılmakta ve hücreiçi girişim kısmi olarak giderilmektedir.  $\ell_1, \ell_2 = 1, 2, \dots, L_r, L_r + 1, \dots, L_r + L_f$  için  $\mathbf{F}_{nj,km,i}$  matrisinin  $\ell_1, \ell_2$ -nci girdileri

$$[\mathbf{F}_{nj,km,i}(\omega)]_{\ell_1 \ell_2} = \sqrt{P_{\ell_1 n} P_{\ell_2 n}} \Re \{ h_{\ell_1 nkmi} \omega_{\ell_1 nji} h_{\ell_2 nkmi}^* \omega_{\ell_2 nji}^* \}. \quad (3.17)$$

olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra kullanıcı veri hızı

$$r_{km}(\alpha, \omega) = \sum_{i=1}^N B \log_2 (1 + \gamma_{kmi}(\alpha, \omega)), \quad \forall k, m, \quad (3.18)$$

ile elde edilir. Burada ilgili kullanıcının veri hızı, dağıtık RRM için bütün ağdaki güç kontrol vektörüne ( $\alpha$ ) bağlıdır; ancak merkezi olmayan RRM için sadece kendi hü-

resindeki erişim noktalarının güç kontrol katsayılarına ( $\alpha_m$ ) bağlıdır. Ancak gösterim kolaylığı açısından,  $r_{km}(\alpha_m, \omega)$  yerine  $r_{km}(\alpha, \omega)$  kullanılmaktadır.

Eniyileme problemini basitleştirmek için hüzme yönlendirme katsayıları erişim noktaları (RRH ve LPN) ve ilgili kullanıcı arasındaki kanala

$$\omega_{\ell mki} \triangleq e^{-j\angle h_{\ell mki}} \quad \forall \ell, m, k, i \quad (3.19)$$

olacak şekilde uyumlandırılmaktadır [55]. Bu durumda  $\omega$  vektörü eniyileme probleminin bir değişkeni olmaktan çıkmaktadır.

Böylece, her hücrenin toplam veri hızı

$$R_m(\alpha) = \sum_{k=1}^{K_m} r_{km}(\alpha), \quad (3.20)$$

ile elde edilir. Enerji verimliliği hesaplanması için gereken toplam güç tüketimi ise Eşitlik (1.7)'de tanımlanan doğrusal güç tüketim modeli kullanılarak

$$P_{T_m}(\alpha) = \sum_{\ell=1}^L (P_C + \Delta_{p,\ell m} P_{out,\ell m}), \quad (3.21)$$

$$= \sum_{\ell=1}^L \left( P_{C,\ell m} + \Delta_{p,\ell m} P_{\ell m} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell mki} \right), \quad (3.22)$$

$$= \left[ \sum_{\ell=1}^{L_r} \left( P_{C,r} + \Delta_{p,r} P_{r,\max} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell mki} \right) + \sum_{\ell=1}^{L_f} \left( P_{C,f} + \Delta_{p,f} P_{f,\max} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell mki} \right) \right], \quad (3.23)$$

$$= (L_r P_{C,r} + L_f P_{C,f}) + (\mathbf{1}_{K_m}^T \otimes [\Delta_{p,r} P_{r,\max} \mathbf{1}_{L_r}^T \quad \Delta_{p,f} P_{f,\max} \mathbf{1}_{L_f}^T]) \alpha_m, \quad (3.24)$$

ile elde edilmektedir, burada  $P_{C,r}$  ve  $P_{C,f}$  sırasıyla RRH ve LPN'lerin iletim yapmadığı zamanda işlemlerini devam ettirebilmesi için tükettiği güç miktarını,  $\Delta_{p,r}$  ve  $\Delta_{p,f}$  sırasıyla RRH ve LPN'ler için yüke bağlı güç tüketiminin eğimini,  $\alpha_m$  ise Eşitlik (3.7)'de tanımlanan güç kontrol katsayılarını temsil etmektedir.  $m$ 'inci hücrede harcanan top-

lam iletim gücü

$$\begin{aligned} P_{out,m}(\alpha) &= \sum_{\ell=1}^L (P_{out,\ell m}), \\ &= (\mathbf{1}_{K_m}^T \otimes [P_{r,\max} \mathbf{1}_{L_r}^T \quad P_{f,\max} \mathbf{1}_{L_f}^T]) \alpha_m, \end{aligned} \quad (3.25)$$

olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra her hücre için enerji verimliliği toplam veri hızının toplam tüketilen güç değerine oranı ile

$$\mu_{EE_m}(\alpha) = \frac{R_m(\alpha)}{P_{T_m}(\alpha)} \quad (3.26)$$

olarak elde edilmektedir.

### 3.2 BENZETİM MODELİ

İlgili senaryoda,  $M = 2$  hücreli bir topakta, hücre başına  $L_r=4$  adet RRH ve  $L_f \leq 3$  adet LPN için kullanılmış ve başarımları için Monte Carlo benzetimleri düzenlenmektedir. Sonuçlar 500 gerçekleştirme üzerinden ortalama alınmaktadır. İlgili benzetimler için önceki mimarilerin de incelendiği Kısım 2.2'de kullanılan Monte Carlo benzetimleri (kanal katsayıları) kullanılmıştır. Benzetim modeli özellikleri Çizelge 3.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 3.1. Benzetim Modeli Özellikleri

Parametre	Benzetim Modeli Özellikleri
Baz istasyonlar arası mesafe	500 m
Yol kaybı ve Gölgeleme modeli	UMa [96], [97]
Gürültü gücü	-174 dBm/Hz
Kullanıcı dağılımı	Birbiçimli ve rasgele dağıtılmış
Frekans / Kaynak bloğu bantgenişiği	2 GHz / 180KHz
Anten Konfigürasyonu	Yönsüz SISO
Kanal Kestirimi	İdeal
Gerçekleme Sayısı	500
NOMA-SIC	Kısmi Girişim Giderimi
Sıfır Yük için RRH Güç Tüketimi	$P_{0,r} : 84 \text{ W}$
Sıfır Yük için LPN (Piko-hücre) Güç Tüketimi	$P_{0,f} : 6.8 \text{ W}$
Sıfır Yük için LPN (Femto-hücre) Güç Tüketimi	$P_{0,f} : 4.8 \text{ W}$
RRH Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,r} : 2.8$
LPN (Piko-hücre) Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,f} : 4.0$
LPN (Femto-hücre) Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,f} : 8.0$

### 3.3 ENİYİLEME PROBLEMİ ve BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ

Bu kısım için sürekli güç yönetimi (CPM) tasarımı kullanılarak eniyileme problemi düzenlenmektedir. NOMA tekniğinin başarımı, dikgen çoklu erişim (OMA) başarımı ile karşılaştırılmaktadır. OMA'yı tekrar etmek gerekirse, bütün kullanıcıların hizmet görmesi şartıyla birlikte, her RB her hücrede sadece bir kullanıcı tarafından kullanılabilir. Bu koşulun doğası gereği RB sayısı hücredeki kullanıcı sayısından fazla olmalıdır, bir başka deyişle  $1 \leq n \leq M$  için  $N \geq K_n$  olmalıdır, ve dolayısıyla alınan sinyaldeki kullanıcılar arası girişim yok olacaktır.

OMA için kullanıcılar arasında RB tahsisi Algoritma ?? ile verilmektedir:

### 3.3.1 Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi

Haberleşme stratejisi sistem genelinde her hücre için enerji verimliliğini enbüyütmek olmakla birlikte, sistemde adaleti sağlamak için Jain Adaletliliği, en düşük kullanıcı veri hızı kısıtları ve erişim noktalarının azami güç sınırlamaları mevcuttur.

Her hücre kendi RRM politikasından sorumludur, ve topak genelinde RRM dağıtık veya merkezi olmayacak şekilde yapılmaktadır. Bu Kısım'da RRM problemi  $M$  paralel eniyileme problemine dönüştürülmüştür.

#### 3.3.1.1 Merkezi olmayan RRM

$m$ 'inci hücredeki Sürekli Güç Yönetimi (CPM) ile eniyileme problemi

$$\begin{aligned}
\max_{\alpha_m} \quad & \mu_{EE_m}(\alpha) \\
\text{s.t.} \quad & \alpha_m \in [0, 1]^{LK_mN}, \\
& \left[ \bigoplus_{i=1}^N \mathbf{1}_{K_m}^T \mathbf{A}_{K_m}^i \otimes \mathbf{I}_L \right] \alpha_m \leq \mathbf{1}_L, \\
& c_{MC} \left( \left[ \bigoplus_{i=1}^N \mathbf{I}_{K_m} \otimes [\mathbf{1}_{L_r}^T \quad \mathbf{0}_{L_r}^T] \right] \alpha_m \right) \circ \left( \left[ \bigoplus_{i=1}^N \mathbf{I}_{K_m} \otimes [\mathbf{0}_{L_r}^T \quad \mathbf{1}_{L_r}^T] \right] \alpha_m \right) = \mathbf{0}_{K_m} \\
& r_{km}(\alpha) \geq r_0, \\
& J_m(\alpha) \geq J_0.
\end{aligned} \tag{3.27}$$

olarak verilmektedir.  $M$  adet eniyileme probleminin çözümü ile tek adımda sistem eniyileştirilmektedir.

Burada birinci kısıt erişim noktalarının ait olduğu hücredeki her bir kullanıcıya her RB üzerinde ayırdığı iletim gücünü kısıtlamaktadır. İkinci kısıt ise her erişim noktasının bütün bantgenişiği boyunca kendi hücreesindeki kullanıcılara harcayabileceği toplam iletim gücünü kendi güç sınırı ile sınırlamaktadır. Her erişim noktası için bulunan bu kısıt açık olarak  $\ell = 1, \dots, L$  için  $\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} \alpha_{\ell mki} \leq 1$  yazılır.

$\bigoplus$  yatay birleştirme operatörünü,  $\otimes$  Kronecker çarpımını,  $\bigoplus$  doğrudan toplam operatörünü,  $\mathbf{I}_L$  ve  $\mathbf{I}_{K_m}$ , sırasıyla  $(L \times L)$  ve  $(K_m \times K_m)$  boyutlarında birim matrisleri,  $\mathbf{1}_{K_m}$  ve  $\mathbf{1}_L$ , sırasıyla  $(K_m \times 1)$  ve  $(L \times 1)$  boyutlarında bir vektörlerini temsil etmektedirler. Kaynak tahsisi matrisi OMA için  $\mathbf{A}_{K_m}^i = \mathbf{S}_{K_m}^{\pi_m(i)}$ , NOMA için  $\mathbf{A}_{K_m}^i = \mathbf{I}_{K_m}$  olacak şekilde seçilir. Burada  $\mathbf{A}_{K_m}^i$  matrisi ile  $m$ 'inci hücredeki  $K_m$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci RB'yi



kullanma izninin olup olmasını belirler. Burada Algoritma ?? ile eniyilenen  $\mathbf{S}_{K_m}^{\pi_m(i)}$ ,  $(K_m \times K_m)$  boyutlarında, sadece  $(\pi_m(i), \pi_m(i))$ 'inci elemanlarının bir, geri kalan elemanlarının sıfır olduğu tek girdi matrisidir. Üçüncü kısıt Çoklu-Bağlantıya izin verilip verilmemesi ile ilgilidir. Eğer  $c_{MC}$  katsayısı sıfır olarak seçilirse kısıtın etkisi kalmamakta ve Çoklu-Bağlantıya izin verilmekte, yani kullanıcılar hem RRH'lere hem de LPN'lere aynı anda bağlanabilmektedirler. Ancak  $c_{MC}$  sıfırdan farklı seçilirse, aldığı değer büyüklüğüyle doğru orantılı bir şekilde Çoklu-Bağlantıya ceza uygulamaktadır. Burada  $\circ$  Hadamard çarpımını tanımlar.  $\mathbf{0}_L$  ise  $(L \times 1)$  boyutunda sıfır vektörü oluşturmaktadır. Bu kısıt

$$c_{MC} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\ell=1}^{L_r} \alpha_{\ell m k i} \right) \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\ell=L_r+1}^{L_r+L_f} \alpha_{\ell m k i} \right) = 0, \quad \forall m, k, \quad (3.28)$$

olacak şekilde her  $k$  değeri için daha açık olarak yazılabilir. Son iki kısıt ise sırasıyla hücredeki kullanıcıların en küçük veri hızını alttan sınırlamakta ve  $m$ 'inci hücredeki Jain adaletliliği için kullanılmaktadır. Jain adaletlilik indeksi eniyileme problemi için

$$J_m(\alpha) = \frac{\left( \sum_{k=1}^K r_{km}(\alpha) \right)^2}{K \sum_{k=1}^K r_{km}^2(\alpha)} \quad (3.29)$$

olarak düzenlenir.

Her hücrenin varsaydığı belirli en büyük girişim değerlerine göre çözülen eniyileme problemi sonucunda elde edilen güç kontrol vektörü değerleri kullanılarak, gerçek girişim değerlerinin de hesaplanmasıyla sistem başarımı elde edilmektedir.

### 3.3.1.2 Dağıtık RRM

Dağıtık RRM için yinelemeli bir algoritma önerilmektedir. Algoritma 1'de açıklanan bu yöntem ile her adımda her hücrenin eniyi veya eniyeye yakın güç kontrol vektörü  $(\alpha_m^*)$  belirlenir, ve bütün hücrelerin başarım eniyilemesinin bitmesinin ardından elde edilen  $\alpha^*$  vektörü bir sonraki yinelemede eniyileme için ilk değer olarak  $(\alpha^{(t)} = \alpha^*)$  kullanılmaktadır, burada  $t$ 'inci yinelemedeki güç kontrol katsayıları  $\alpha^t$  ile gösterilmektedir. Bu katsayılarla oluşan hücrelerarası girişim değerleri bilgisi ise bu yeni adımda hücreler tarafından bilinmektedir. Bu yinelemeler belirli bir koşul  $(d_{diff} > d_{lim})$

sağlanana kadar devam etmektedir. Burada  $d_{lim}$  yinelemeli algoritmanın tamamlanması için gereken koşulun en küçük değeridir. Eniyileme problemindeki kısıtlar Kısım 3.3.1.1'de tanımlanan Eşitlik (3.27)'deki kısıtlarla aynıdır.

İlk değer atamaları:

$$d_{diff} = \infty,$$

$$t = 1, \mu_{EE}(\alpha^{(t)}) = 0,$$

**while**  $d_{diff} > d_{lim}$  **do**

$$t = t + 1,$$

**for**  $m = 1 : M$  **do**

$$\max_{\alpha_m} \mu_{EE_m}(\alpha)$$

$$\text{s.t. } \alpha_m \in [0, 1]^{LK_mN},$$

$$\left[ \bigoplus_{i=1}^N \mathbf{1}_{K_m}^T \mathbf{A}_{K_m}^i \otimes \mathbf{I}_L \right] \alpha_m \leq \mathbf{1}_L,$$

$$c_{MC} \left( \left[ \bigoplus_{i=1}^N \mathbf{I}_{K_m} \otimes [\mathbf{1}_{L_r}^T \ \mathbf{0}_{L_f}^T] \right] \alpha_m \right) \circ \left( \left[ \bigoplus_{i=1}^N \mathbf{I}_{K_m} \otimes [\mathbf{0}_{L_r}^T \ \mathbf{1}_{L_f}^T] \right] \alpha_m \right) = \mathbf{0}_{K_m}$$

$$r_{km}(\alpha) \geq r_0,$$

$$J_m(\alpha) \geq J_0.$$

$\forall k, m,$

**end**

$$d_{diff} = \frac{|\mu_{EE}(\alpha^{(t)}) - \mu_{EE}(\alpha^{(t-1)})|}{|\mu_{EE}(\alpha^{(2)})|},$$

$$\alpha^{(t)} = \alpha^*,$$

**end**

**Algorithm 1:** Dağıtık RRM algoritması

## Başarım Değerlendirmesi

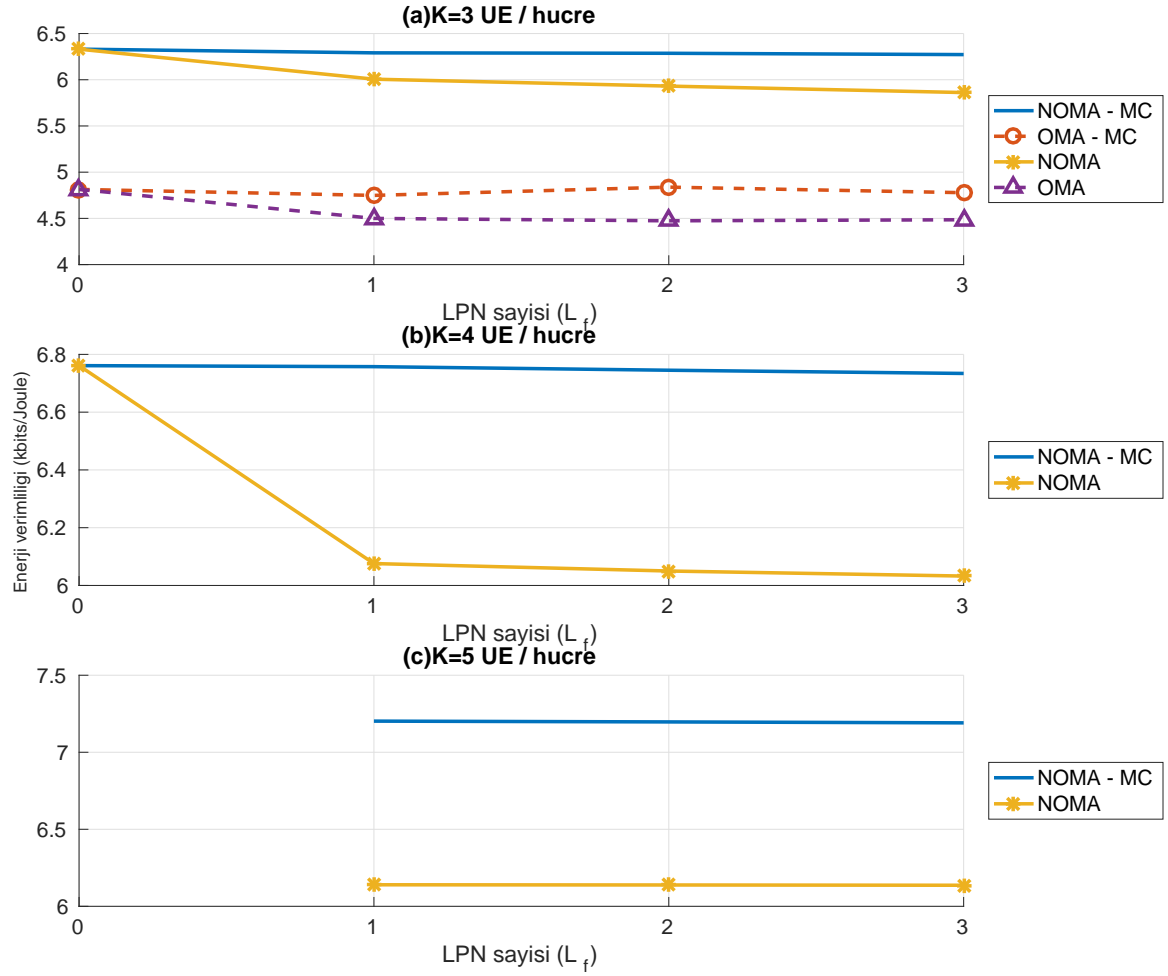
### Dağıtık RRM

Burada sistem genelinde en düşük veri hızı, Jain adaletliliği ve farklı güç değerlerine sahip erişim noktalarının azami güç kısıtları altında enerji verimliliğinin enbüyütül-tüğü senaryolar incelenmektedir. Küçük hücreler için  $P_{f,max} = 17$  dBm güç değeri ile sınırlanan Femto-hücreler kullanılmaktadır. Sistem incelemesi farklı çoklu erişim modelleri (NOMA, OMA) için ve çoklu bağlantının (MC) aktif olup olmamasına göre ayrıca incelenmektedir. LPN sayısının artırımı genellikle kapsamayı artırmak amaçlıdır, bu çalışmada kapsama başarımı dikkate alınmadan, LPN sayısının ağ fonksiyonları ile birlikte başarımı nasıl etkilediği incelenmektedir. Kullanılan LPN'lerin sürekli aktif olduğu kabul edilmiştir, yani, kullanıcıların bağlanmadığı durumlarda da iletim gücü hariç çalışmaya devam edebilmek için güç harcamaktadır. Şekil 3.1'de  $N = 3$  RB ve hücre başına  $3 \leq K \leq 5$  kullanıcı için, NOMA'nın kullanılıp kullanılmadığı, MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda,  $P_{r,max} = 43$  dBm için,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$  kısıtlarıyla, EE'nin LPN sayısına ( $L_f$ ) göre değişimi incelenmektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 ise sırasıyla, harcanan RRH ve LPN iletim güçlerini göstermektedir. OMA yöntemi için hücre başına en fazla  $K = N$  kullanıcı desteklenebildiği unutulmamalıdır. Burada  $N = 3$  alınmaktadır.

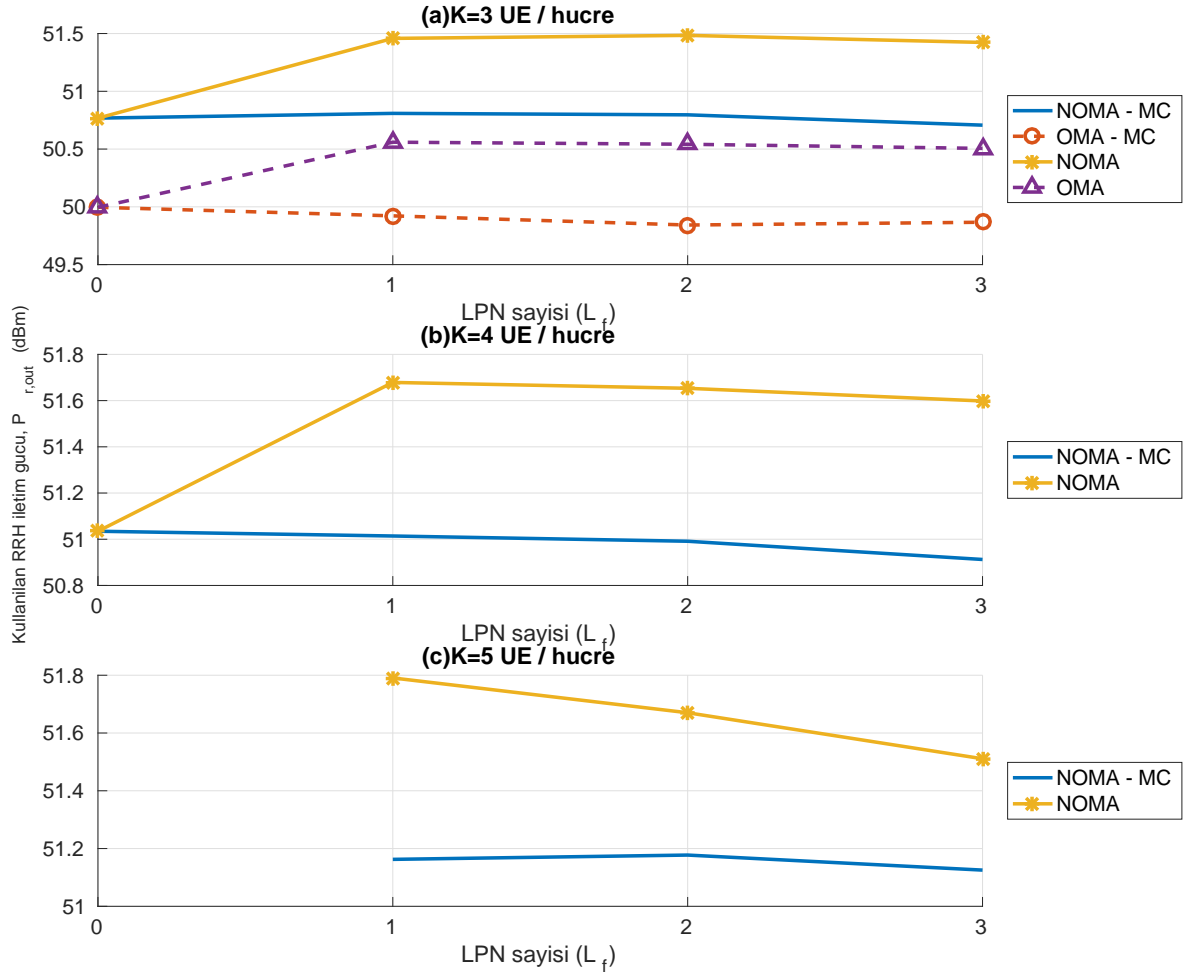
MC fonksiyonu kullanılmadığında, kullanıcılar servis alabilmek için erişim noktalarından (RRH veya LPN) birini seçmek durumunda oldukları unutulmamalıdır, ve D-RAN mimarisinde kullanıcıların RRH'lere bağlanması tercih edilmektedir. Şekil 3.3'te LPN iletim gücünün neredeyse sıfır olması bunu doğrulamaktadır. Ancak LPN'lerin iletim gücü haricinde, çalıştığı süre boyunca harcanan diğer güçler dolayısıyla, artan LPN sayısı ile EE başarımı düşmektedir. Bu kaybın telafi edilmesi için daha fazla (yaklaşık 43 dBm) RRH iletim gücü kullanılarak EE enbüyütülmeye çalışılmaktadır; ancak yine de homojen ağlara kıyasla başarım kaybı olmaktadır. Şekil 3.2'de RRH iletim gücünün aktif LPN kullanımıyla arttığı gözlenmektedir. Kullanıcı sayısının artması durumunda, RRH iletim gücünün arttığı; ancak LPN sayısının daha fazla artmasıyla bu artış miktarının azaldığı (EE değeri de düşmektedir) gözükmektedir. Burada, komşu hücrelere yapılan ve merkezi olarak kontrol edilemeyen girişim etkilidir.

Kullanıcıların RRH ve LPN'lere aynı anda bağlanmasına izin verilmesiyle (MC aktif), kullanıcılar LPN'lerden de yararlanarak EE enbüyütülmektedir, bu durumda, LPN'in güç tüketiminin yol açtığı başarımların kaybı telafi edilmekte, ve dağıtık mimari ve dağıtık RRM için ulaşılabilir en yüksek EE değerlerinde çalışabilmektedir; ancak bu değerler yine de merkezi RRM ile elde edilen sonuçlara yaklaşmamaktadır. Kullanıcı sayısının artmasıyla EE başarımlarını arttırmakla birlikte, MC fonksiyonunun katkısı da artmaktadır. Ayrıca LPN kullanılmadan hücre başına  $K = 5$  kullanıcıya, kısıtları sağlayacak şekilde hizmet sunulamamaktadır.

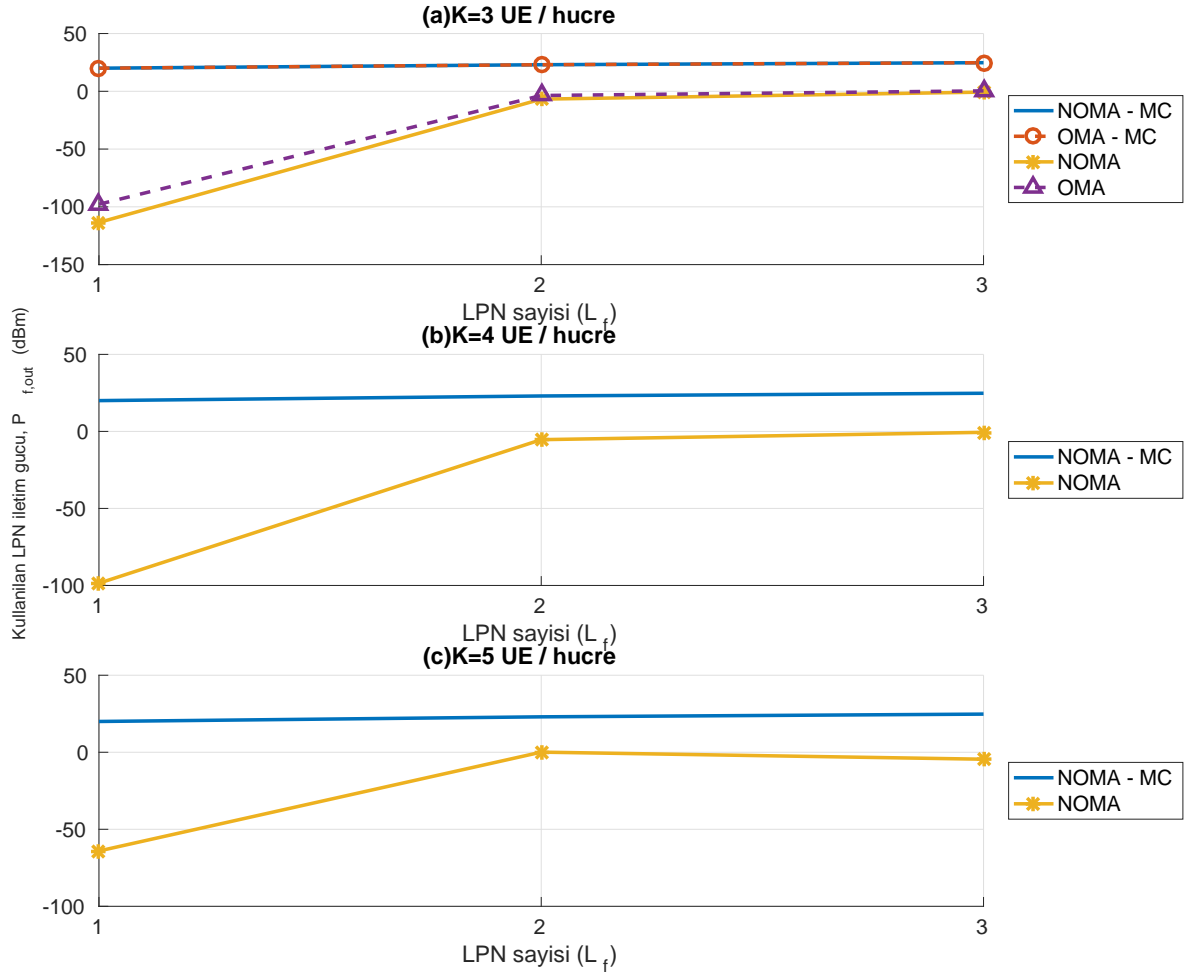
NOMA yönteminin kullanılması ile serbestlik derecesi az olan OMA tasarısına kıyasla % 20'ye yakın kazanç sağlandığı görülmektedir. OMA'da girişim yönetiminin yetersizliği sebebiyle RRH'ler daha az güç kullanmaktadır, ki bu da başarımların kaybının başlıca sebebidir.



Şekil 3.1.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), hücre başına LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .



Şekil 3.2.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, hücre başına LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .



Şekil 3.3.  $M = 2$  hücreli, hücre başına  $K$  kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, hücre başına LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .

Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 sistem genelinde EE'nin ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütüldüğü problemde,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$ ,  $L_f = 1$  LPN ve  $P_{r,max} = 43$  dBm için, NOMA ve MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, sırasıyla, toplam enerji verimliliğinin (EE), izgesel verimliliğin (SE), enerji izgesel verimliliğinin (ESE), RRH ve LPN'lerin harcadığı toplam iletim güçlerinin RB ve hücre başına kullanıcı sayısına göre değişimi incelenmektedir.

EE başarımı her NOMA ve MC kombinasyonu için RB sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. NOMA tekniğinin kullanıldığı durum incelendiğinde, düşük sayıda RB sayısı için, kullanıcı sayısının (çeşitlemesinin) başarımı çok fazla etkilemediği gözlenmektedir, ancak RB sayısının artmasıyla başarımın  $K$  ile artışı daha rahat görülebilmektedir. Burada, kısıtlı bantgenişliği için girişim etkin bölgenin etkisi fazla olmakta; kullanılabilir RB arttığında ise, girişim daha etkin bir şekilde giderilebilmektedir. OMA yöntemi ile hücre içi girişim giderilmiş olmasına rağmen, komşu hücrelerle yapılan asgari iletişim sebebiyle hala mevcut olan hücrelerarası girişimin etkin olarak çalıştığı ve başarımı düşürdüğü gözlenmektedir.  $K = 1$  kullanıcı EE başarımı için üst sınır olarak çalışmaktadır. NOMA fonksiyonunun kullanımı, beklenildiği üzere başarımı artırmaktadır.  $L_f = 1$  için olan bu senaryoda MC fonksiyonunun kullanımı da başarımı olumlu etkilemektedir. NOMA kullanıldığı durumda, MC ile sistemde, özellikle yüksek RB sayısı durumunda, EE kazancı artmakta; OMA durumunda ise  $K > 1$  için başarım, üst sınır olan  $K = 1$  durumuna yaklaşmaktadır. Bu mimari ve RRM seviyesinde hücrelerarası koordinasyon eksikliği sebebiyle girişim arzu edilen seviyede giderilememekte ve fazladan bantgenişliği sistem başarımını iyileştirse de; cRRM çözümüne erişememektedir.

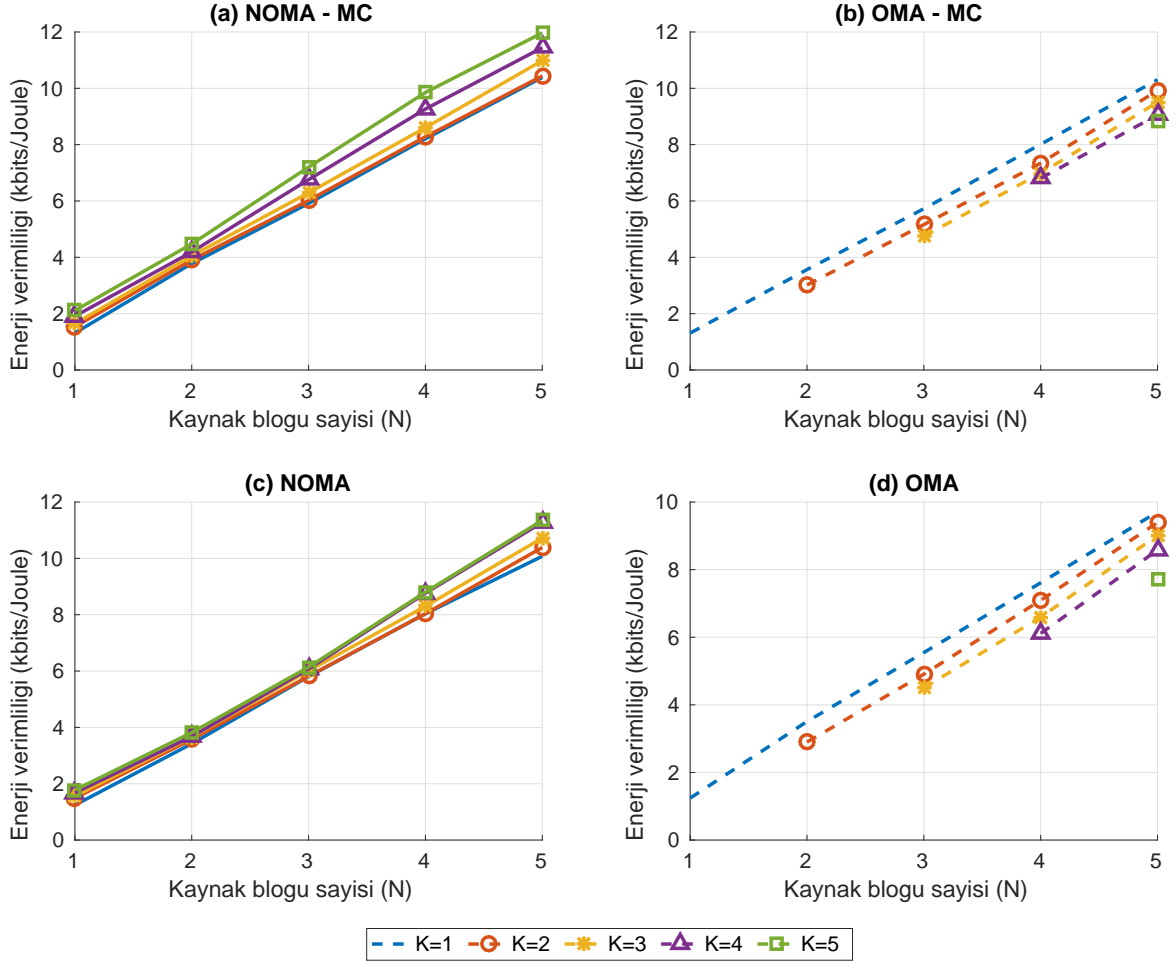
SE'nin kullanıcı sayısı ( $K$ ) ve RB sayısı ( $N$ ) ile değişimi, etkilerinin büyüklüğü farklı olsa da, paralellik göstermektedir. Etkin girişim yönetimine sahip NOMA kullanıldığında, artan  $K$  ile kullanıcı çeşitlemesi, dolayısıyla başarım artmakta, ancak OMA'da girişim yönetiminde yaşanan eksiklik başarımı da düşürmektedir. DDRAN mimarisinde yapılan merkezi RRM sonuçlarının aksine, DRAN ve dRRM için, RB sayısının artmasıyla, SE sürekli artma eğilimindedir; ancak kullanılan fonksiyonların durumuna göre bir süre sonra artış yavaşlamaktadır. MC fonksiyonu kullanıldığında daha yüksek başarım elde edilebilmektedir. Burada enerji verimliliğinin eniyileştirildiği ve



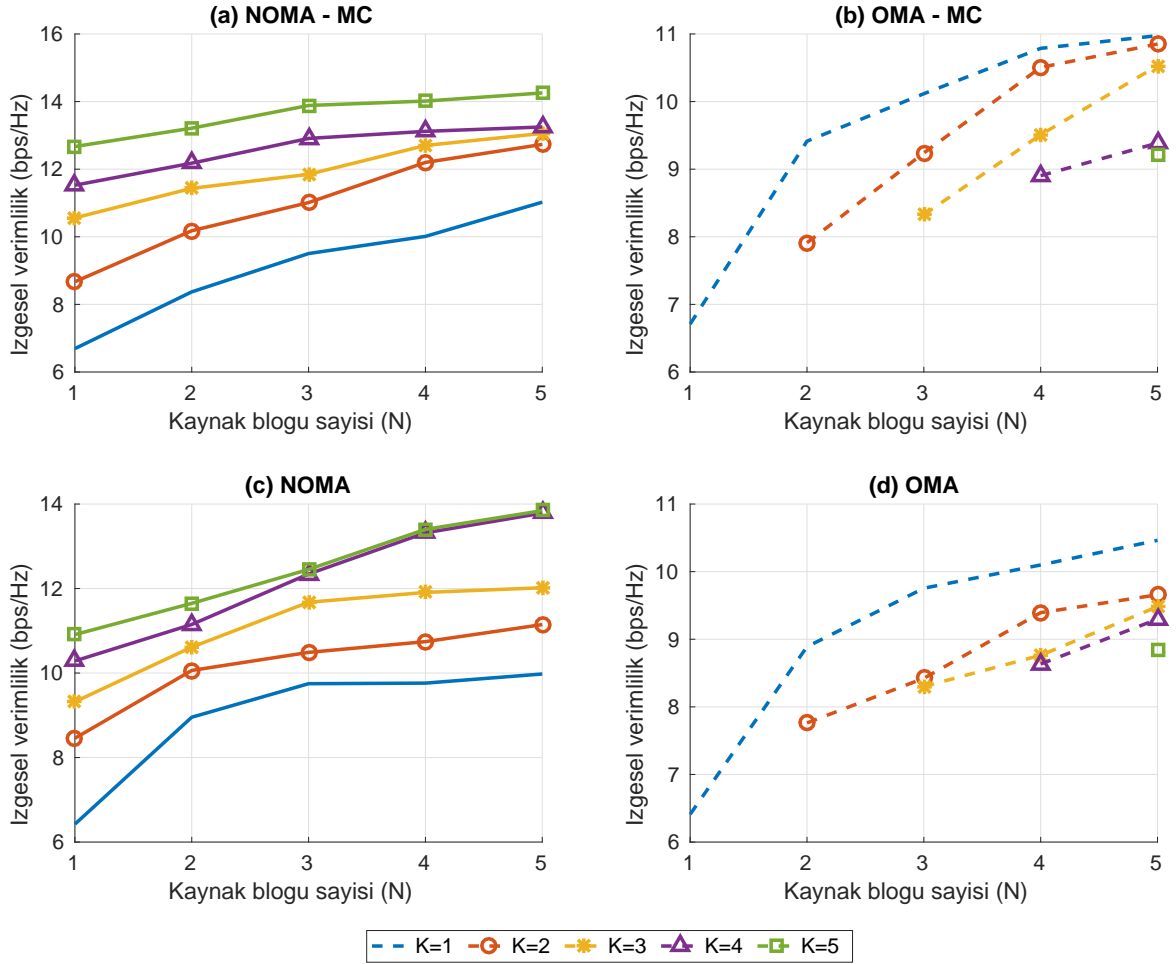
elde edilen SE'nin gösterildiği unutulmamalıdır. İzgesel verimlilik açısından da genel olarak MC fonksiyonundan ziyade NOMA'nın katkısı daha fazladır.

DRAN ve dRRM için hücre içi girişimi oldukça iyi şekilde giderebilen NOMA ile BS'ler daha yüksek güçlerde çalışmakta (bkz. Şekil 3.7) ve hücrenin EE'sini yükseltmeye çalışmakta; ancak oluşturduğu hücrelerarası girişim sebebiyle ağdaki toplam başarıımı düşürmekte ve dolayısıyla cRRM başarımına erişilememektedir. MC aktifleştirildiğinde, kullanılan RRH iletim gücü azalmakta, ve femto-hücrelerle birlikte sistem başarıımı eniyileştirilmektedir. Düşük sayıda kullanıcıli durumlarda MC'nin etkisi çok fazla belli olmamakla birlikte, kullanıcı sayısı arttığında MC'nin katkısı da artmaktadır, ancak yine de DRAN ve dRRM kullanılan sistem için NOMA'nın yaptığı katkıya erişilememektedir. MC aktif olmadığı durumda, kullanılabilir RB sayısı arttıkça, kullanıcılar elde edebilecekleri EE'yi daha çok artırabilmek için, RRH'leri tercih etmektedirler ve böylece, küçük bantgenişliğinden sonra bir süre artsa da RB sayısı arttıkça kullanılan RRH iletim gücü de artmaktadır. Şekil 3.8 (c) ve (d) çizgelerinden görülebileceği üzere MC aktif değilken, küçük hücreler güç tüketmemektedirler.  $N = K$  olana kadar artan RB sayısı ile kullanılan RRH iletim gücü düşmektedir.  $N = 1$  için başlangıçta NOMA ile yapılabilen eniyi girişim yönetimi yapılmakla birlikte artan RB sayısı ile daha küçük RRH iletim güçleri ile daha iyi başarımlar elde edilebilmektedir. Kullanıcı sayısından fazla RB kullanılabilir olduğu durumda, bu fazla bantgenişliğinden ayrıca iletim yapılarak daha iyi başarıma ulaşılabilmekte, bu da daha yüksek iletim gücü ile sonuçlanmaktadır. MC aktif iken, kullanıcılar femto-hücrelerden de faydalandıkları için RRH iletim gücü düşmekte, ve kullanılan LPN iletim güçleri artmaktadır (bkz. Şekil 3.8 (a) ve (b)).

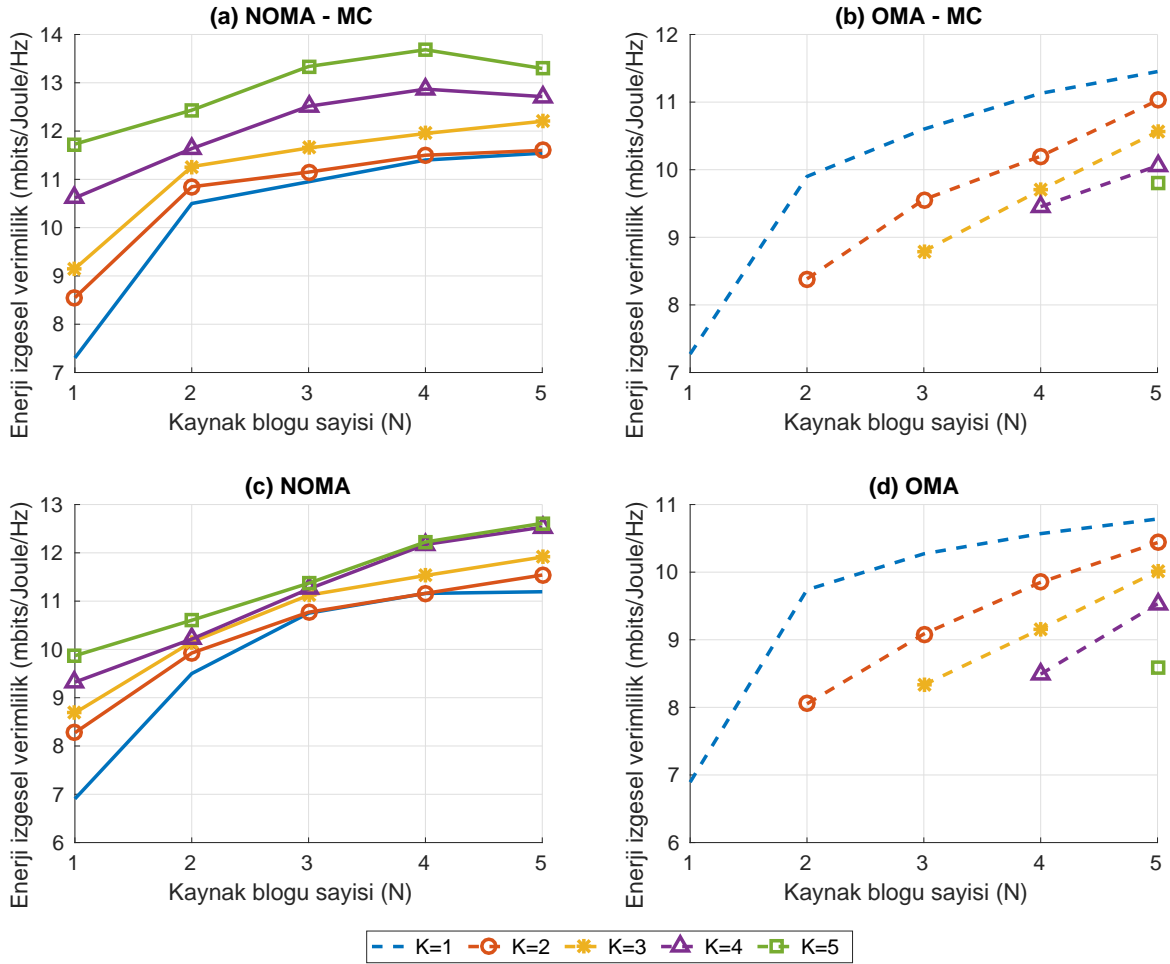
$N < K$  durumu için bu senaryo ve cRRM kullanılan senaryo arasındaki farklılığın sebebi kişisel hücre başarımları enbüyütülmeye çalışılırken komşu hücrelerin dikkate alınmamasıdır.



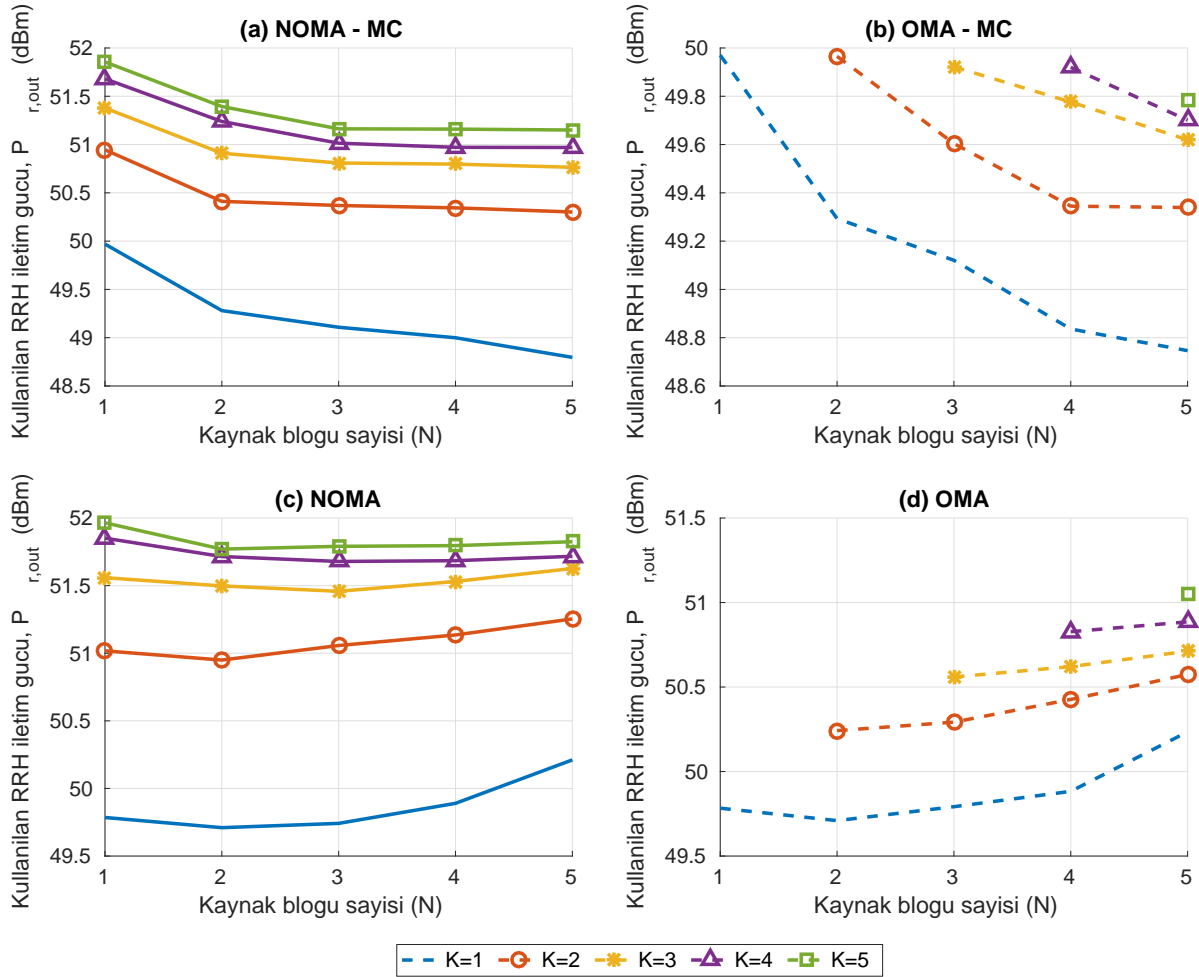
Şekil 3.4.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



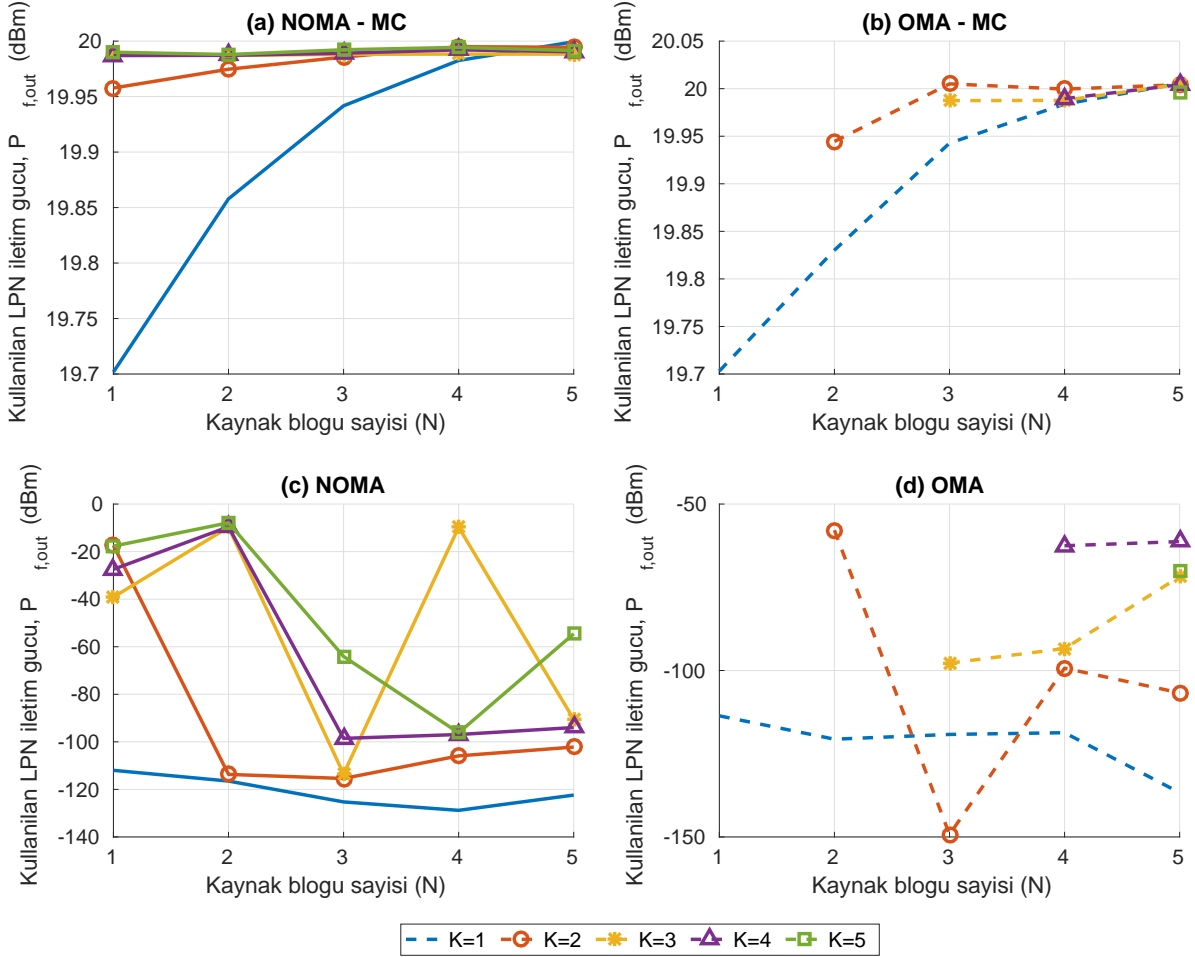
Şekil 3.5.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.6.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.7.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.8.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

## Merkezi Olmayan RRM

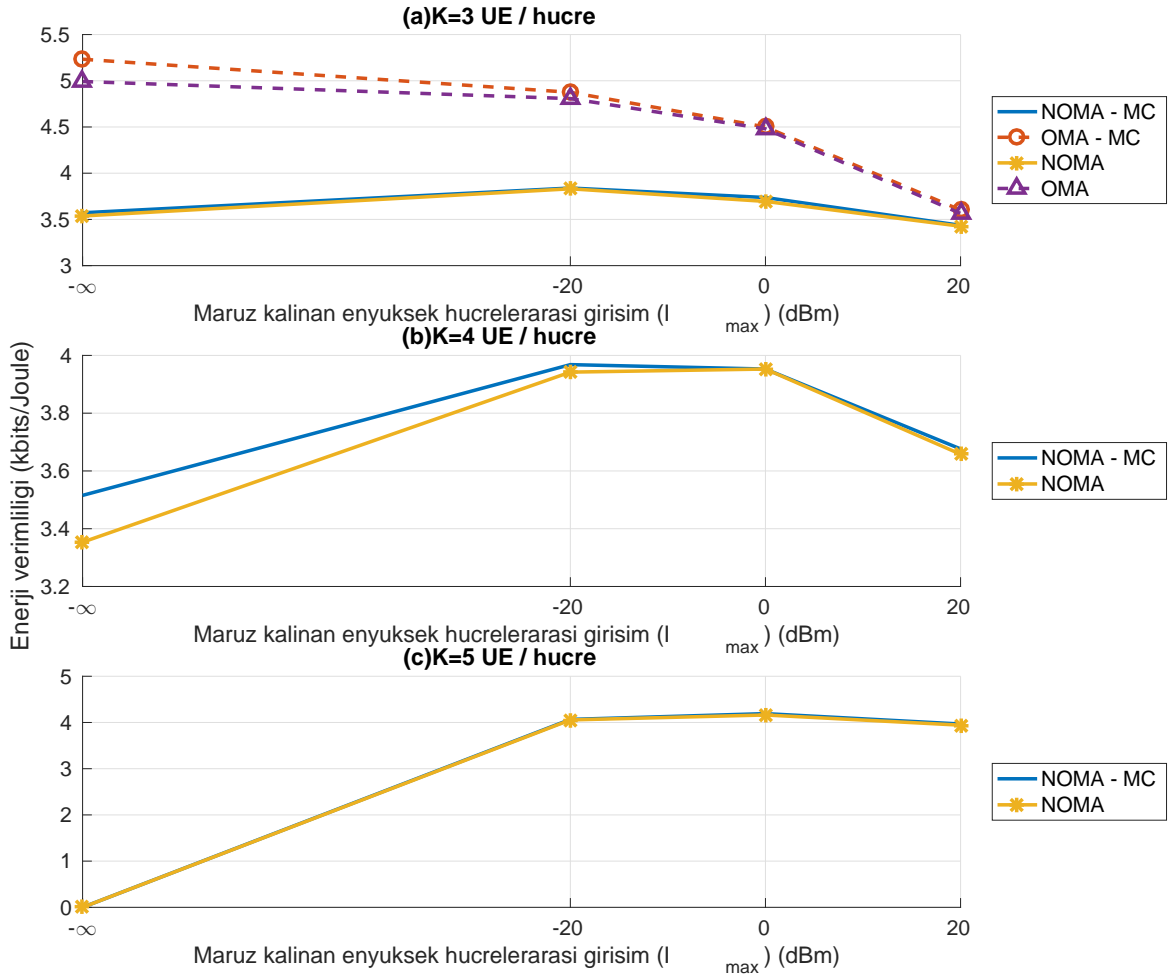
Burada da dağıtık RRM kısmında olduğu gibi sistem genelinde en düşük veri hızı, adalet ve farklı güç değerlerine sahip erişim noktalarının azami güç kısıtları altında enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü senaryolar incelenmektedir. Küçük hücreler için  $P_{f,max} = 17$  dBm güç değeri ile sınırlanan femto-hücreler kullanılmaktadır. Sistem incelemesi NOMA ve OMA için ve çoklu bağlantının (MC) aktif olup olmamasına göre ayrıca incelenmektedir.

Hücrelerarası girişimin değeri ölçülmeden, belirli değerler kabul edilerek RRM yapılmaktadır. Farklı hücrelerarası girişim ( $I_{max}$ ) değerlerine göre sistem eniyilemesi yapılarak elde edilen güç kontrol katsayıları kullanılarak (gerçek) sistem başarımı hesaplanmaktadır. Burada  $I_{max}$  değerlerine göre başarımın nasıl değiştiği incelenmektedir.

Şekil 3.9'da  $N = 3$  RB ve hücre başına  $3 \leq K \leq 5$  kullanıcıli durumlarda  $L_f = 1$  LPN için, NOMA'nın kullanılıp kullanılmadığı, MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda,  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm için,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$  kısıtlarıyla, EE'nin  $I_{max}$  değerine göre değişimi incelenmektedir. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 ise sırasıyla harcanan RRH ve LPN iletim güçlerini göstermektedir. OMA yöntemi için hücre başına en fazla  $K = N = 3$  kullanıcı desteklenebildiği unutulmamalıdır. OMA durumunda artan  $I_{max}$  değeri ile EE başarımı düşmektedir.  $I_{max} = -\infty$  dBm değeri bir uç nokta olarak davranmaktadır, ve NOMA kullanıldığında EE başarımı bu değerde diğer değerlere göre daha düşük sonuç vermektedir.

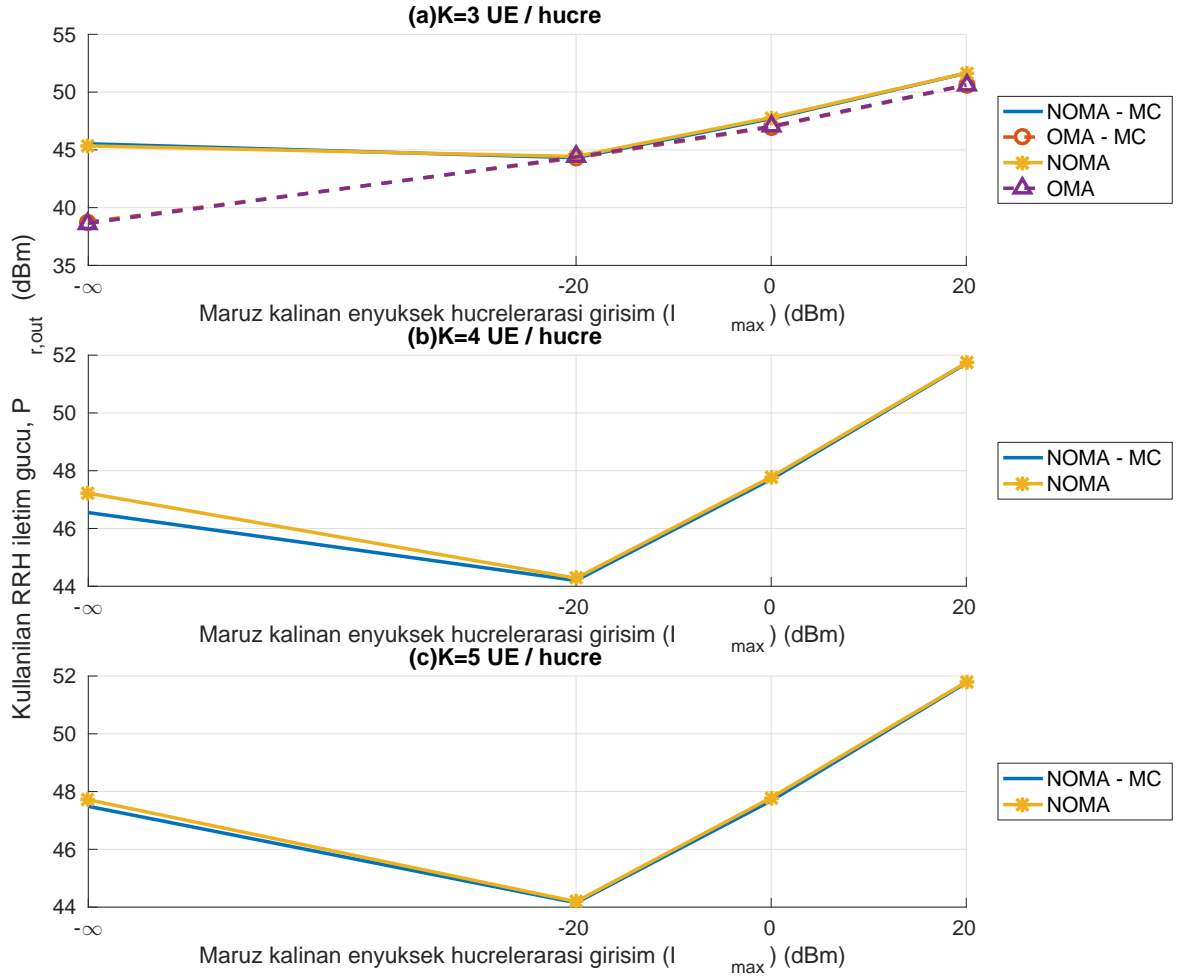
MC fonksiyonu kullanılmadığında, kullanıcılar servis alabilmek için erişim noktalarından (RRH veya LPN) birini seçmek durumunda oldukları unutulmamalıdır.  $I_{max} = -\infty$  dBm değeri haricinde oldukça düşük LPN güçleri kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.11). Bu düşük değerler eniyileme esnasında LPN'lerin sinyal göndermediğinin varsayıldığı değerlerdir. Dolayısıyla kullanıcılar RRH'lere bağlanmaktadır.  $I_{max} = -\infty$  dBm için, (NOMA'nın kullanıldığı durumda) LPN'lere bağlanan en az 1 kullanıcı bulunmaktadır. MC fonksiyonu kullanıldığında ise LPN'ler de veri iletiminde görev alacak şekilde sistem eniyileştirilmektedir. RRH'lerin iletim gücü incelendiğinde, hücrelerarası girişimin  $I_{max} = -20$  dBm olduğu varsayıldığında RRH'lerin en az iletim gücü harcadıkları

gözükmektedir. NOMA kullanıldığında  $I_{\max} = -\infty$  dBm için daha yüksek RRH ile-  
tim gücü kullanıldığı görülmektedir. Artan  $I_{\max}$  değerleri için kullanılan iletim gücü de  
artmaktadır. NOMA'nın kullanılmadığı durumda, artan  $I_{\max}$  değerleri için kullanılan  
RRH iletim gücü sürekli artmaktadır. Ayrıca kullanıcı sayısının artmasıyla, harcanan  
RRH iletim gücü de, az da olsa artmaktadır.

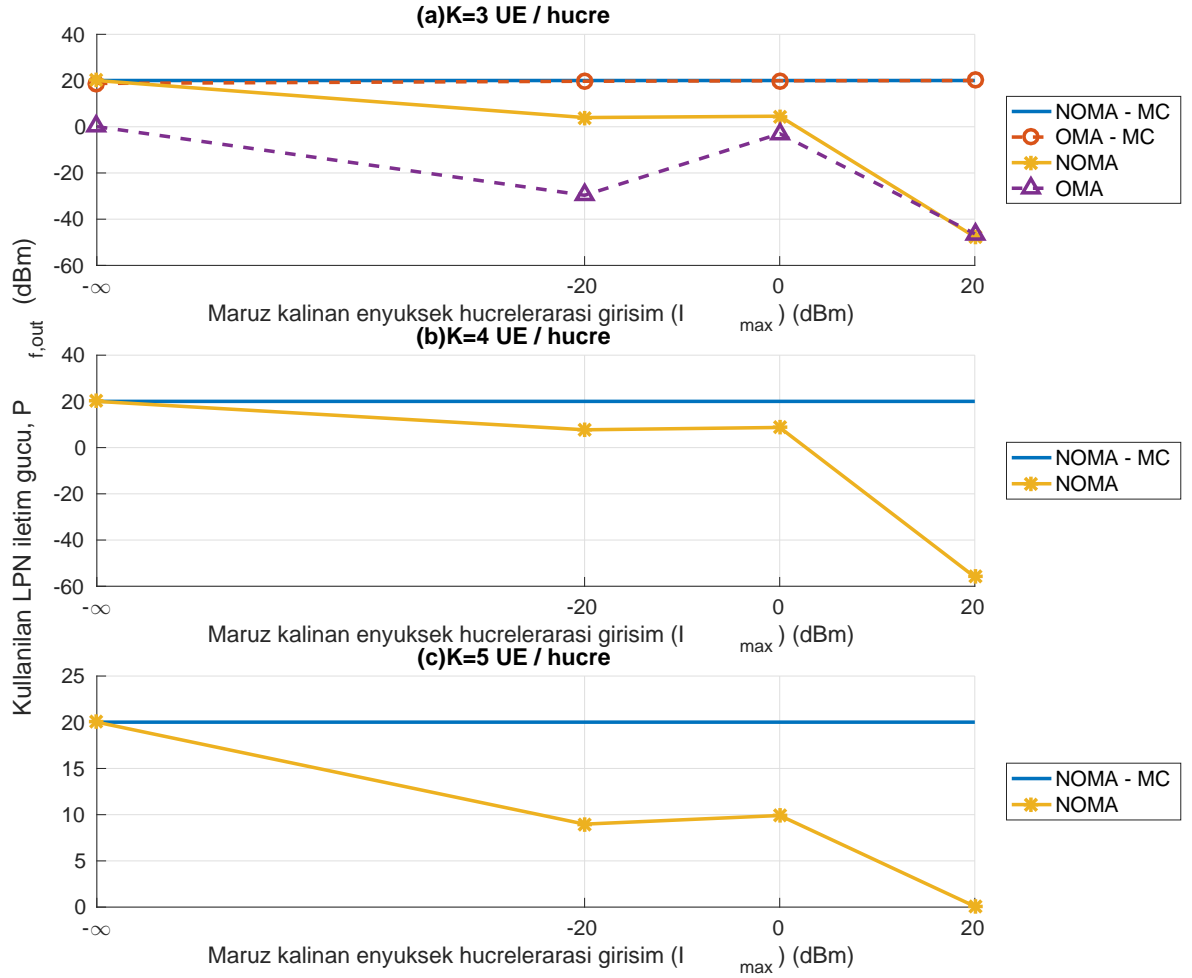


Şekil 3.9.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f = 1$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,\max} = 43$  dBm ve  $P_{f,\max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda topaktaki enerji verimliliğinin (EE), maruz kalındığı varsayılan hücrelerarası girişim değerine ( $I_{\max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .





Şekil 3.10.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f = 1$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, maruz kalındığı varsayılan hücrelerarası girişim değerine ( $I_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .



Şekil 3.11.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f = 1$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı çeşitli durumlarda topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, maruz kalındığı varsayılan hücrelerarası girişim değerine ( $I_{max}$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .

Takip eden çizgelerde, sistem genelinde EE'nin ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütüldüğü problemde,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$ ,  $L_f = 1$  LPN,  $P_{r,\max} = 43$  dBm ve  $P_{r,\max} = 17$  dBm için, NOMA ve MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, sistem başarımının, farklı  $I_{\max} \in \{-\infty, -20, 0, 20, 40\}$  dBm değerleri için hücre başına kullanıcı ve RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. EE başarımı Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da SE başarımı Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de ESE başarımı Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da kullanılan RRH iletim gücü Şekil 3.27, Şekil 3.28, Şekil 3.29, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de ve kullanılan LPN iletim gücü Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da gösterilmektedirler.

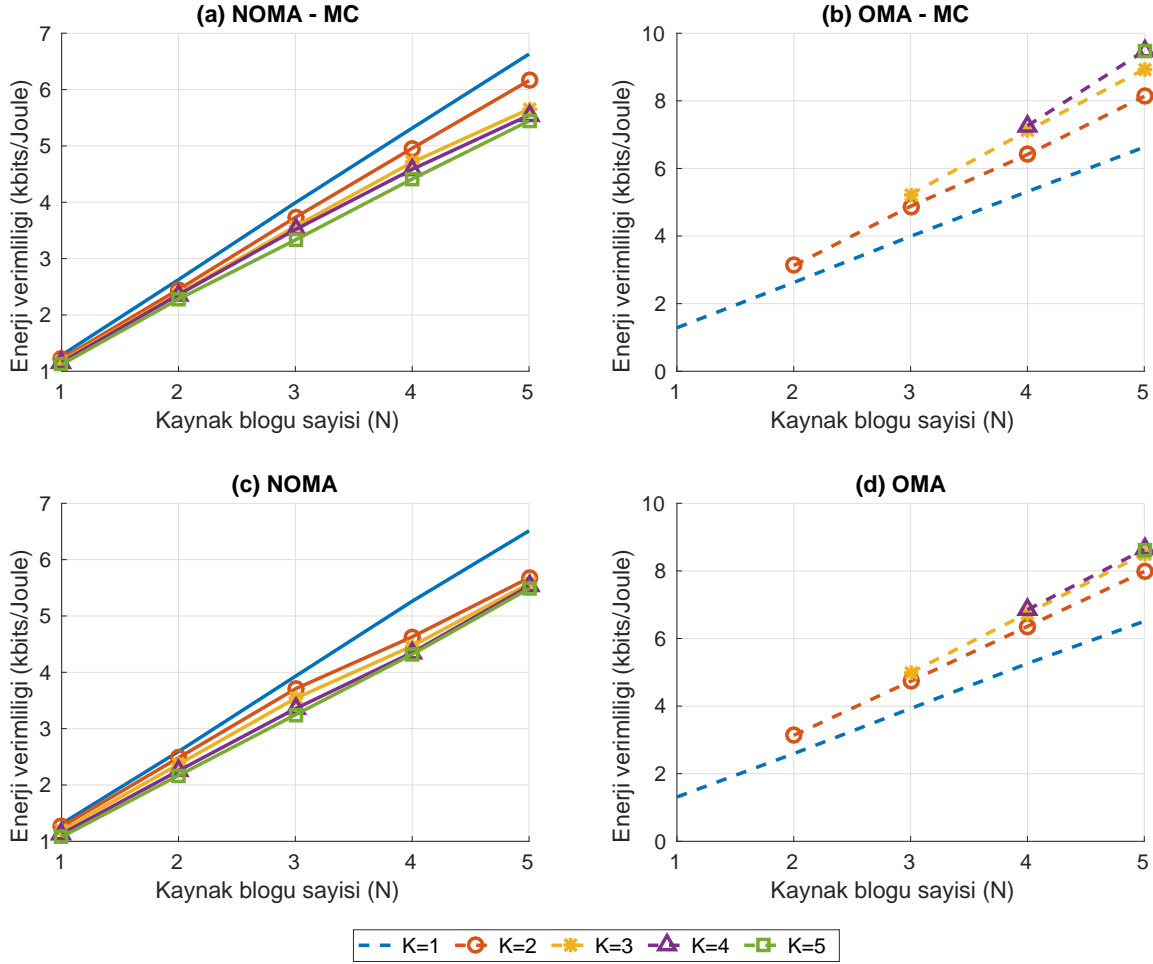
$I_{\max} = 40$  dBm için NOMA ve MC'nin her kombinasyonu için sadece  $K = 1$  kullanıcıya hizmet verilebilmektedir. MC fonksiyonu aktif iken  $N \geq 2$  RB için bu hizmet sağlanabilmekteyken, MC fonksiyonu aktif değilken en az 3 RB gerekmektedir. Yine uç nokta  $I_{\max} = -\infty$  dBm için NOMA yöntemi kullanıldığında,  $K = 1$  kullanıcı durumu en yüksek EE başarımı elde edilmekte ve artan kullanıcı sayısı ile başarımlar azalmaktadır. Burada, eniyileme sırasında, hücrelerarası girişimin  $I_{\max} = -\infty$  dBm olarak uç noktada kabul edildiği, ancak incelenen başarımlarda eniyileme sonucunda bulunan güç kontrol katsayıları kullanıldığında elde edilen gerçek girişim değerlerinin kullanıldığını hatırlatmakta fayda vardır. Diğer  $I_{\max}$  değerleri için  $K$ 'nın artmasıyla EE başarımının da arttığı gözlemlenmektedir. Bu gözlem SE ve ESE başarımında daha rahat görülebilmektedir. EE başarımı her NOMA ve MC kombinasyonu için RB sayısıyla doğru orantılı olarak artmaktadır.

MC fonksiyonunun kullanılıp kullanılmaması büyük değerlerde sonuçları çok fazla etkilememektedir. Ancak SE gibi daha düşük değerlerde farkını biraz da olsa gösterebilmektedir. Gerçekçi  $I_{\max}$  değerlerinde, girişim kontrolü de gerçeğe yaklaştığı için RB sayısının artmasının SE başarımına etkisi de görülebilmektedir. Düşük  $I_{\max}$  değerlerinde SE başarımı düşerken veya değişmezken,  $I_{\max} = 0$  dBm ve  $I_{\max} = 20$  dBm değerlerinde RB sayısının artışıyla SE başarımı da artmaya başlamaktadır.

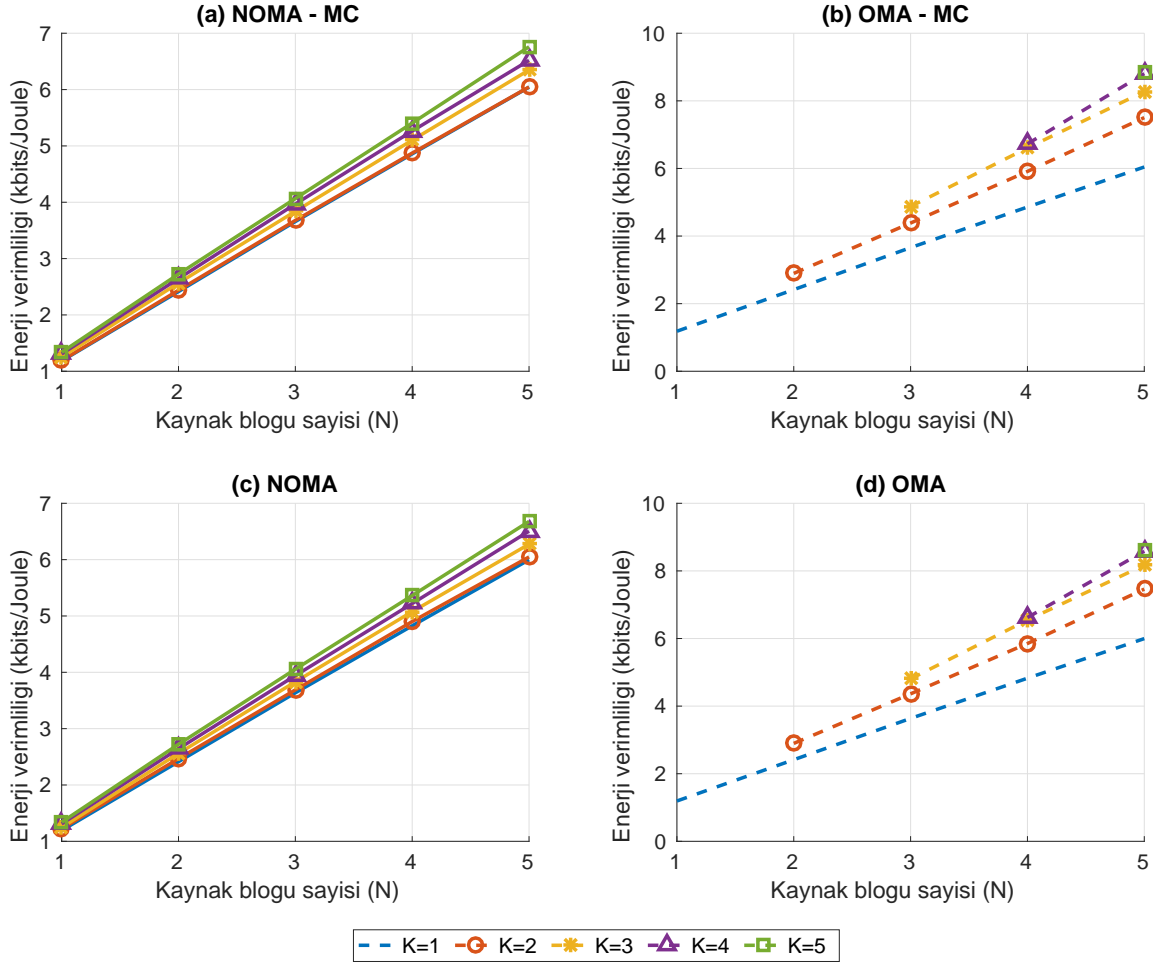
Önceki mimari ve RRM koordinasyon seviyesine benzer şekilde, NOMA tekniğinin kullanıldığı durum incelendiğinde, düşük sayıda RB sayısı için, kullanıcı sayısının (çeşitlemesinin) başarımı çok fazla etkilemediği gözlenmektedir, ancak RB sayısının

artmasıyla başarımın  $K$  ile artışı daha rahat görülebilmektedir. Burada, kısıtlı bantgenişliği için girişim etkin bölgenin etkisi fazla olmakta; kullanılabilir RB arttığında ise, girişim daha etkin bir şekilde giderilebilmektedir. Gerçekçi olmayan  $I_{max}$  değerlerinde yapılan girişim yönetimi etkin olmadığı için bantgenişliğinin etkisi de daha az görülmektedir. Bu mimari ve RRM seviyesinde hücrelerarası koordinasyon eksikliğinin en küçük düzeyde kalması sebebiyle girişim arzu edilen seviyede giderilememekte ve fazladan bantgenişliği sistem başarımını iyileştirse de; diğer çözümlere yaklaşmamaktadır.

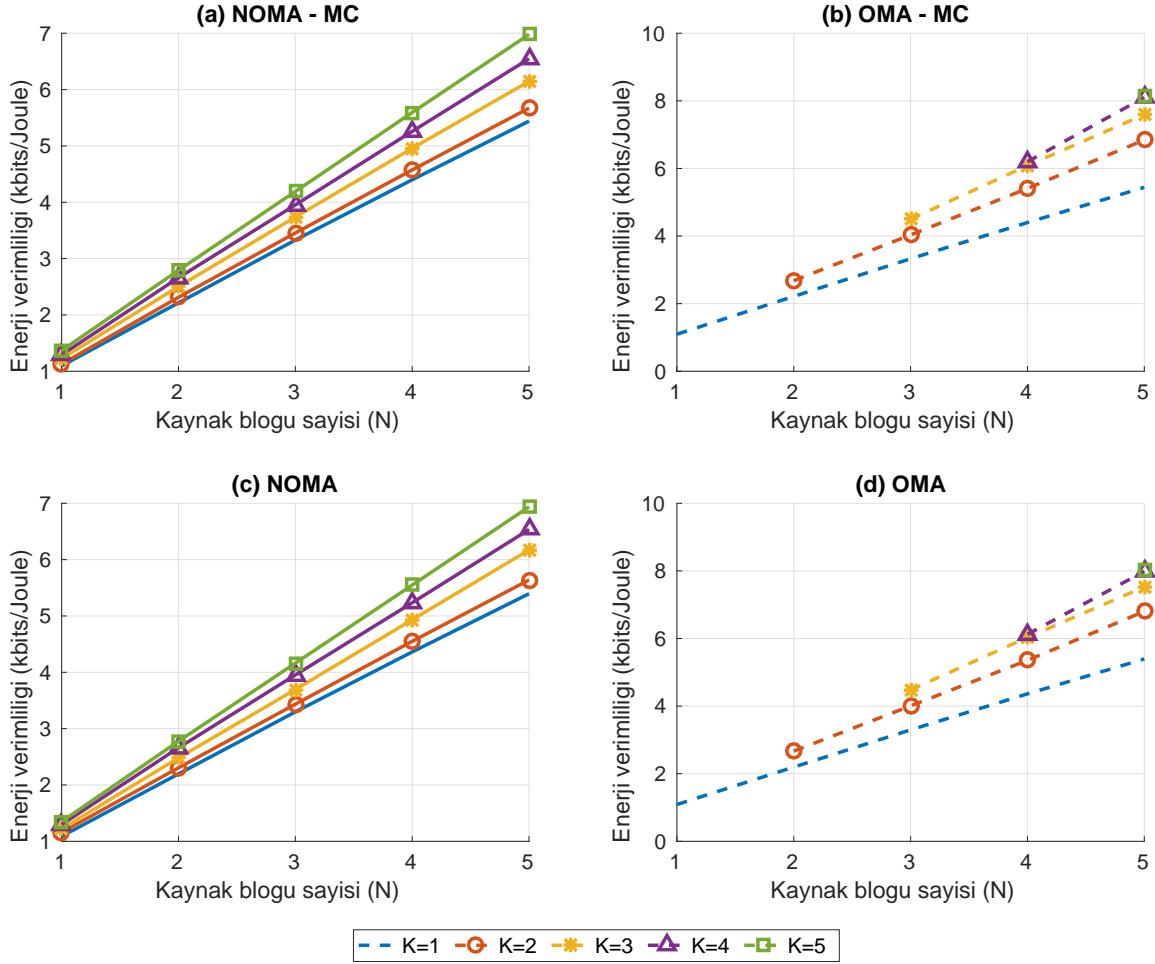
Daha yüksek  $I_{max}$  değerlerinde daha yüksek RRH iletim gücü kullanıldığı gözlemlenmektedir. OMA'nın kullanıldığı senaryolarda artan kullanıcı sayısı ile kullanılan toplam RRH iletim gücü azalmaktadır. Uç nokta olan  $I_{max} = -\infty$  dBm için kullanıcı sayısının artmasıyla harcanan RRH iletim gücü artmakta, ancak genelde artan RB sayısı ile paralel olarak artan iletim gücü  $K = 4$  ve  $K = 5$  kullanıcı için  $N = 3$  RB için en küçük iletim gücü harcamıştır. Burada bir diğer farklılık,  $K = 1$  kullanıcı için en az RRH iletim gücü kullanılarak en büyük EE başarımına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Diğer  $K$  değerleri için artan RRH iletim gücü ile paralel şekilde EE değerlerinin de yükseldiği görülmektedir. Düşük miktarda hücrelerarası girişimin olduğu kabul edildiğinde,  $I_{max} = -20$  dBm, en fazla iletim gücü  $K = 1$  durumunda tüketilmektedir, ancak buna rağmen en düşük başarım elde edilmektedir. Bu düzensizliğin sebebi, başarım sonuçlarının, eniyilemede kabul edilen  $I_{max}$  değerlerinden ziyade elde edilen sonuçlara göre tekrar hesaplanmasından kaynaklıdır.  $I_{max}$  değeri biraz daha artırıldığında ve daha gerçekçi değerlere yaklaştığında, artan kullanıcı sayısı ile paralel şekilde kullanılan RRH iletim gücü de artmaktadır.



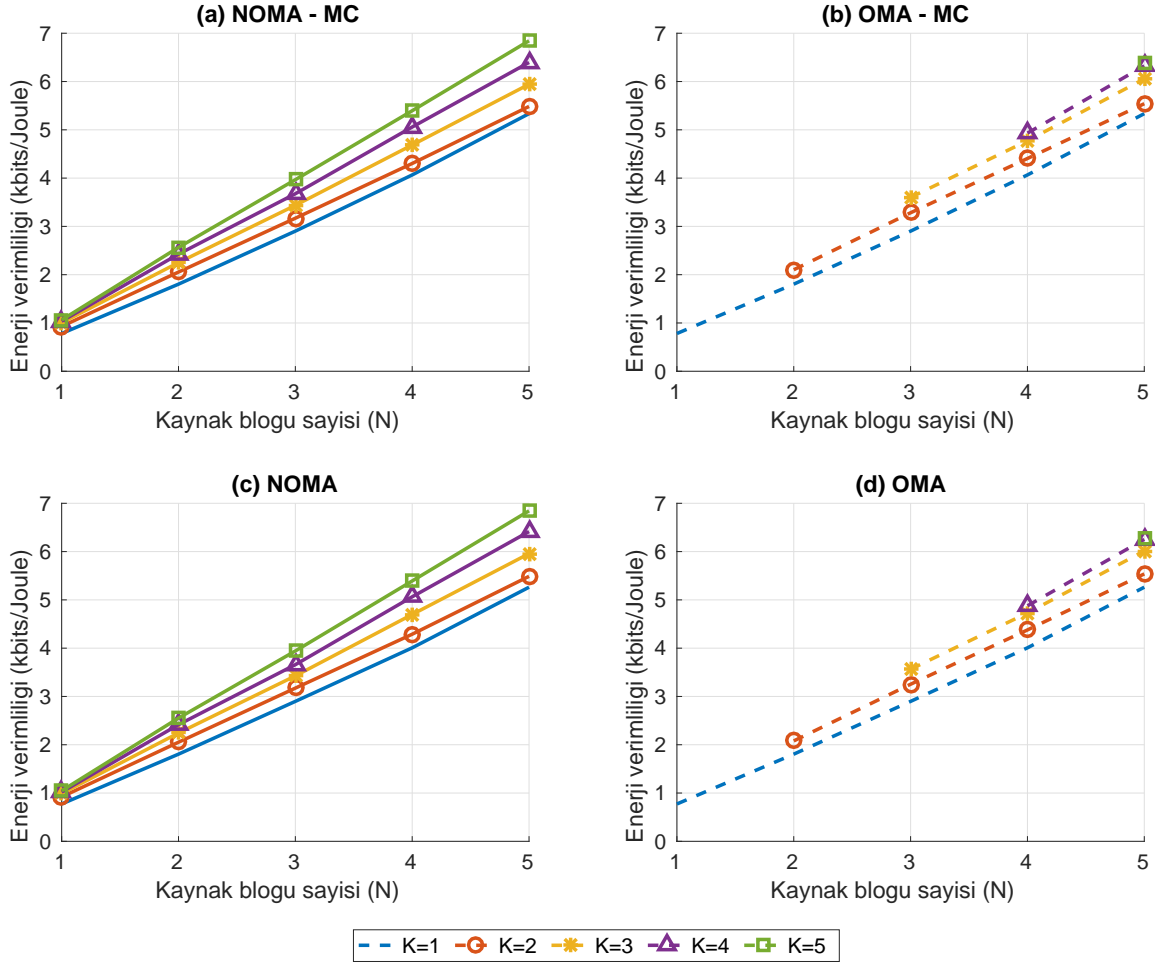
Şekil 3.12.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.13.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

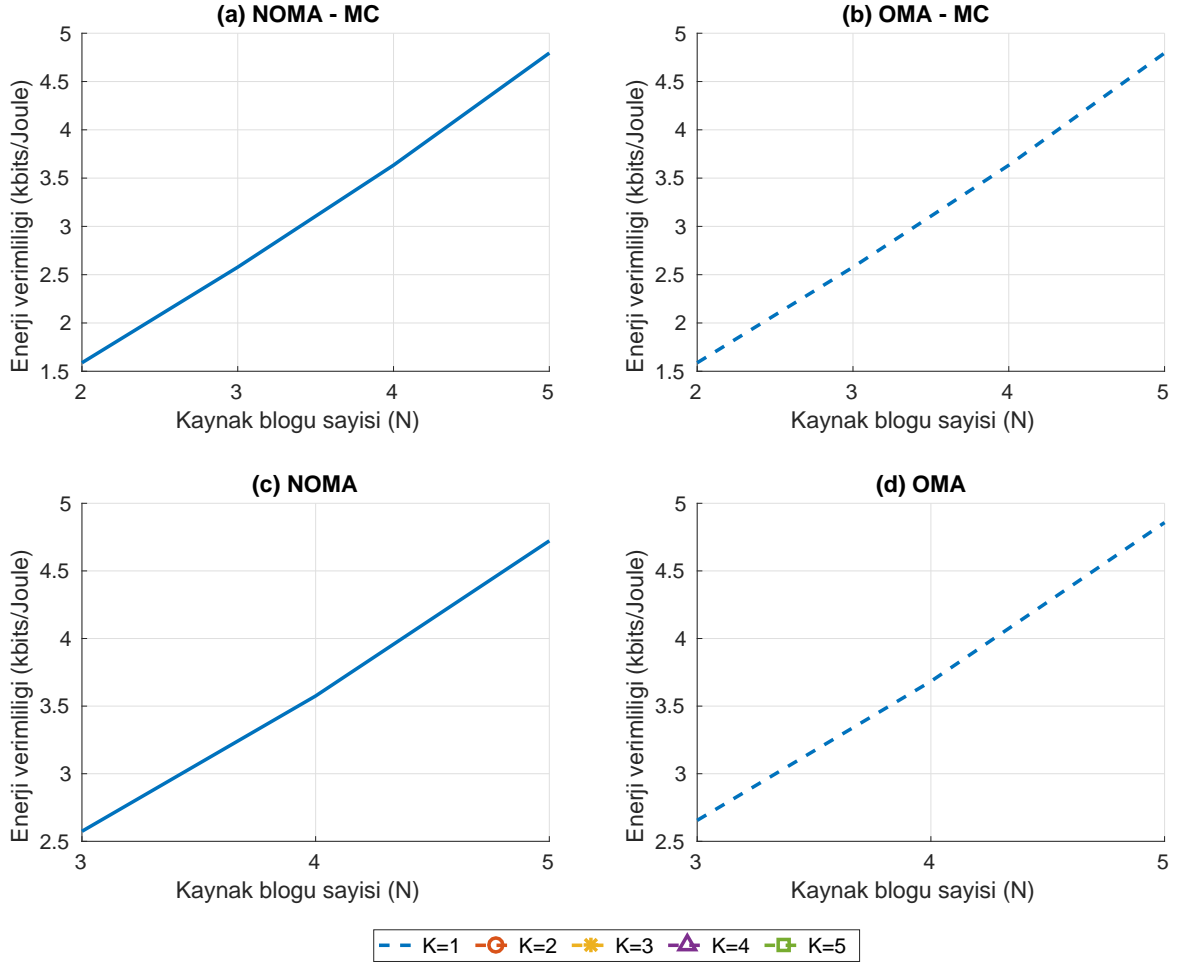


Şekil 3.14.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

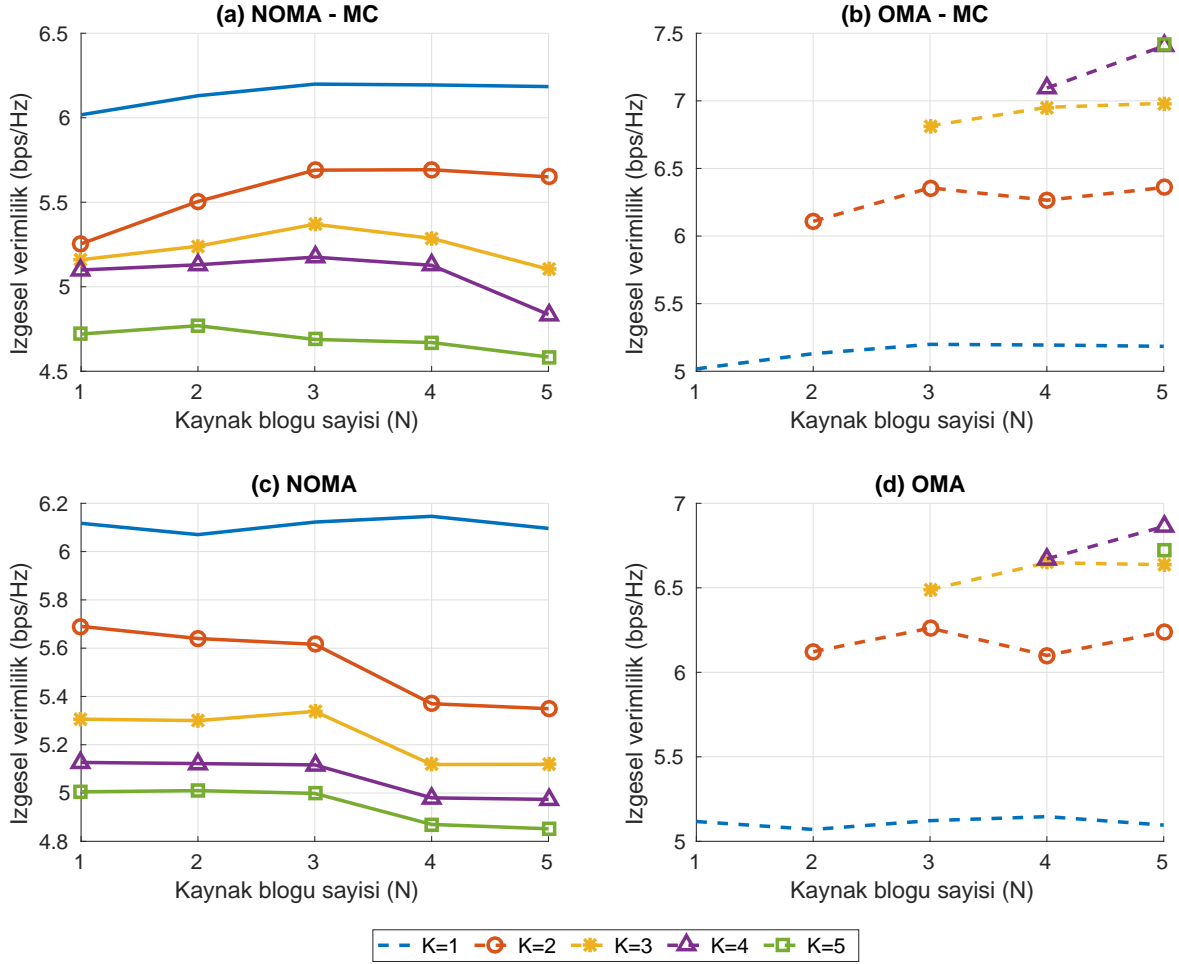


Şekil 3.15.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

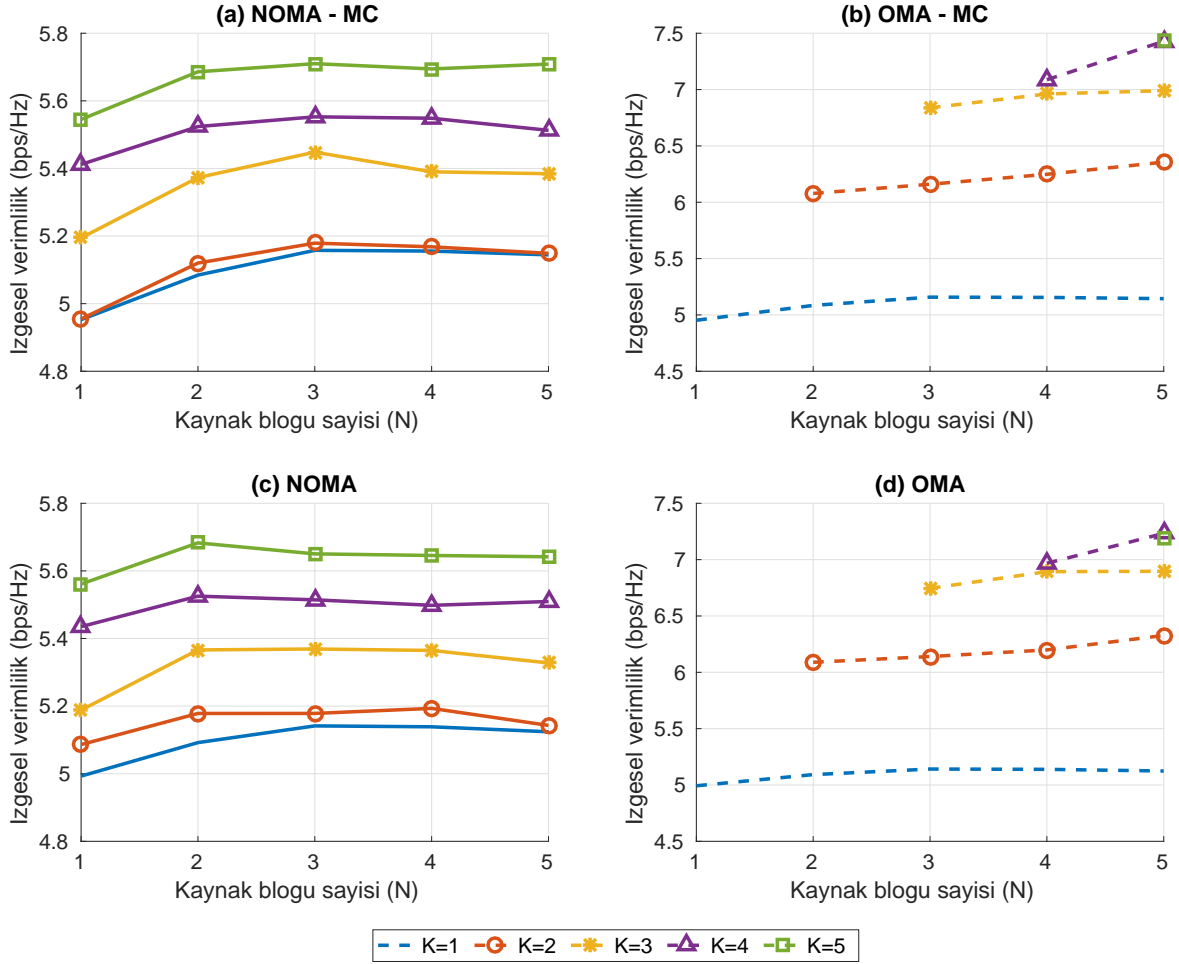




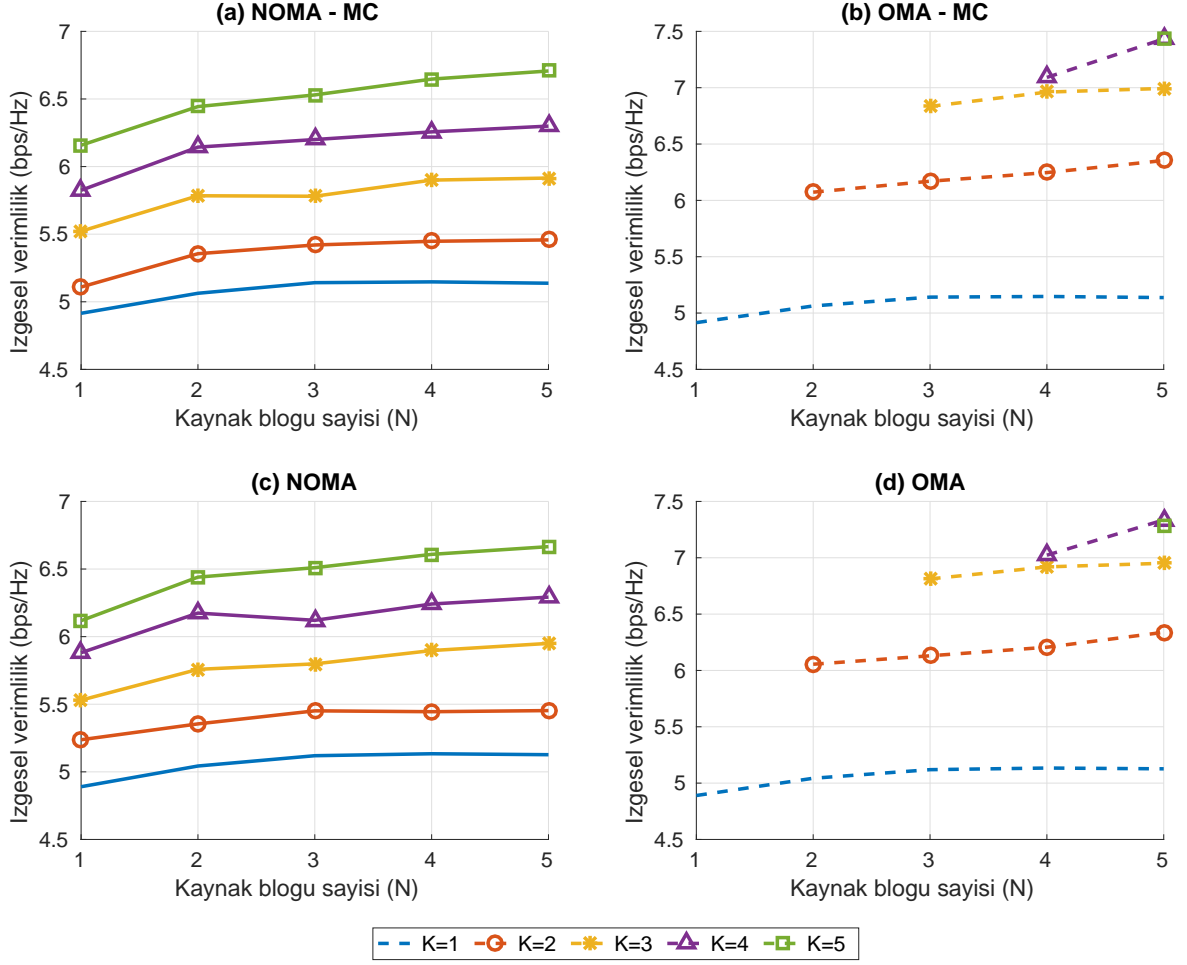
Şekil 3.16.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



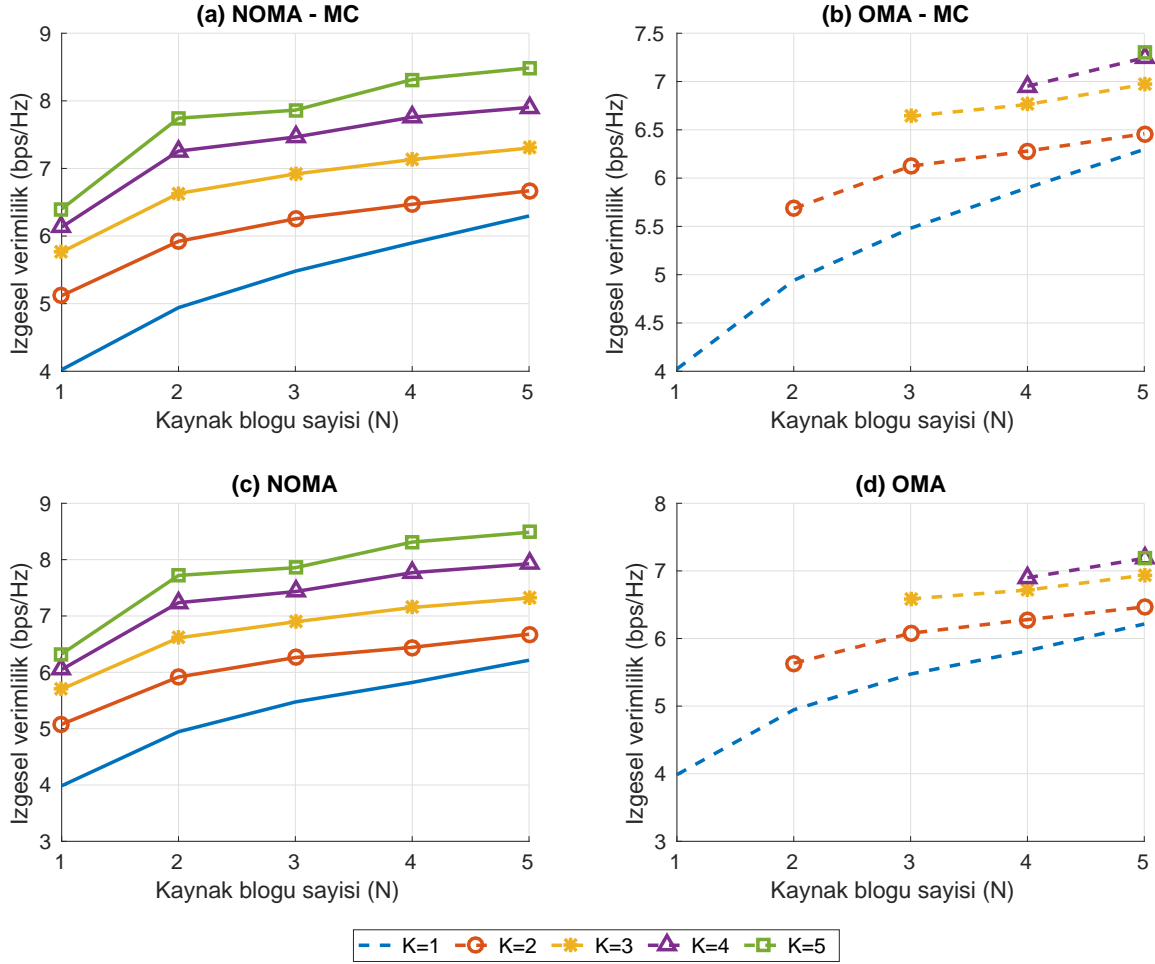
Şekil 3.17.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



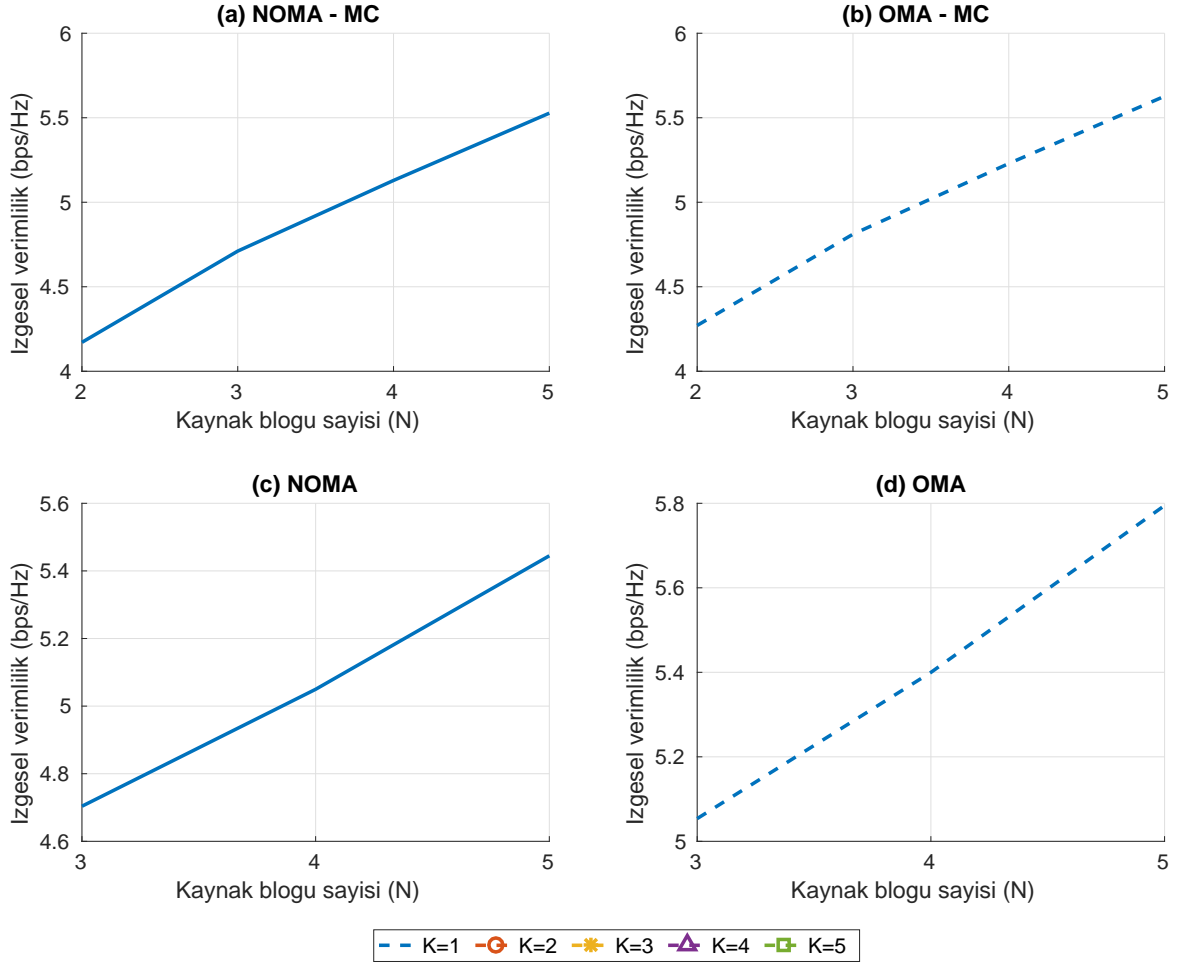
Şekil 3.18.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



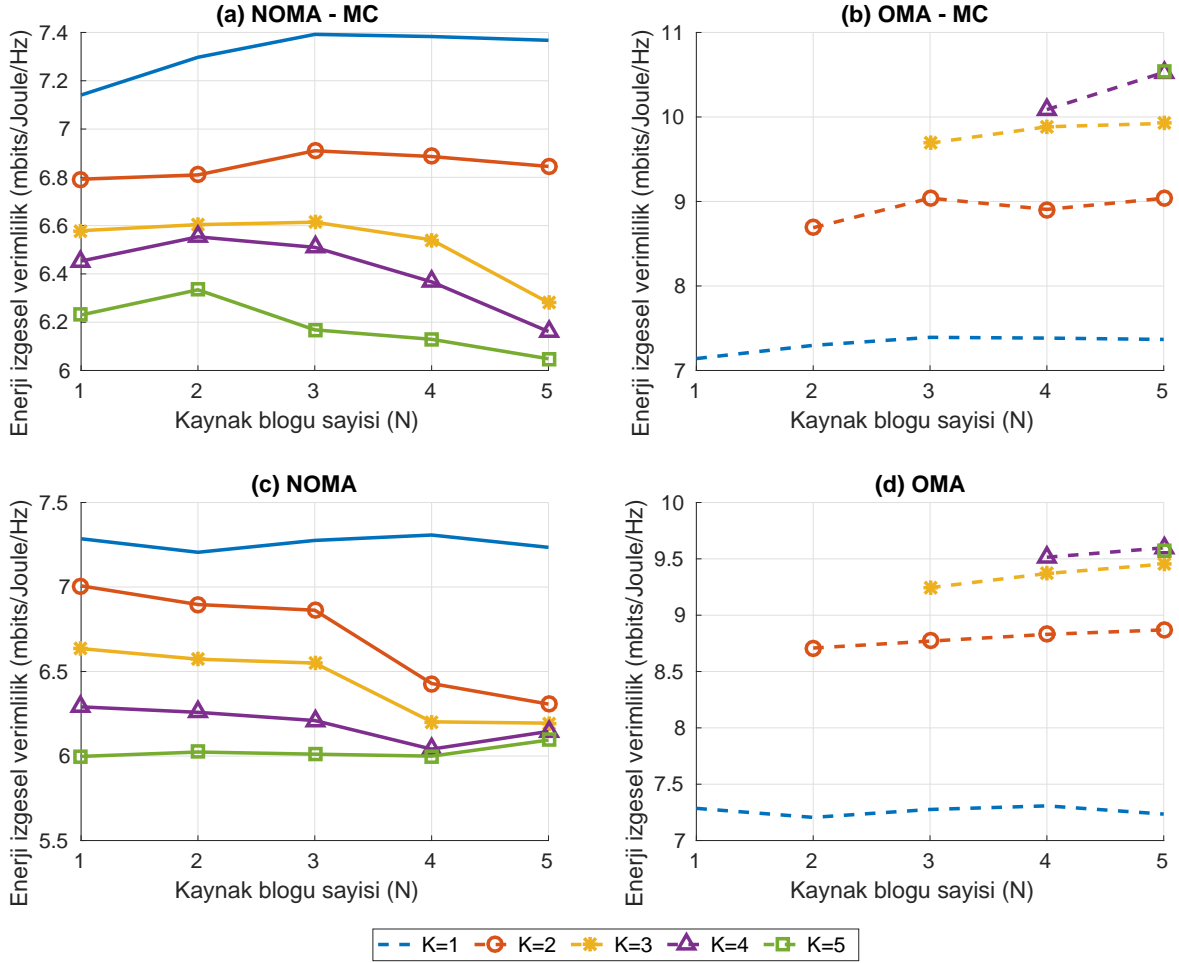
Şekil 3.19.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, toplaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, toplaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



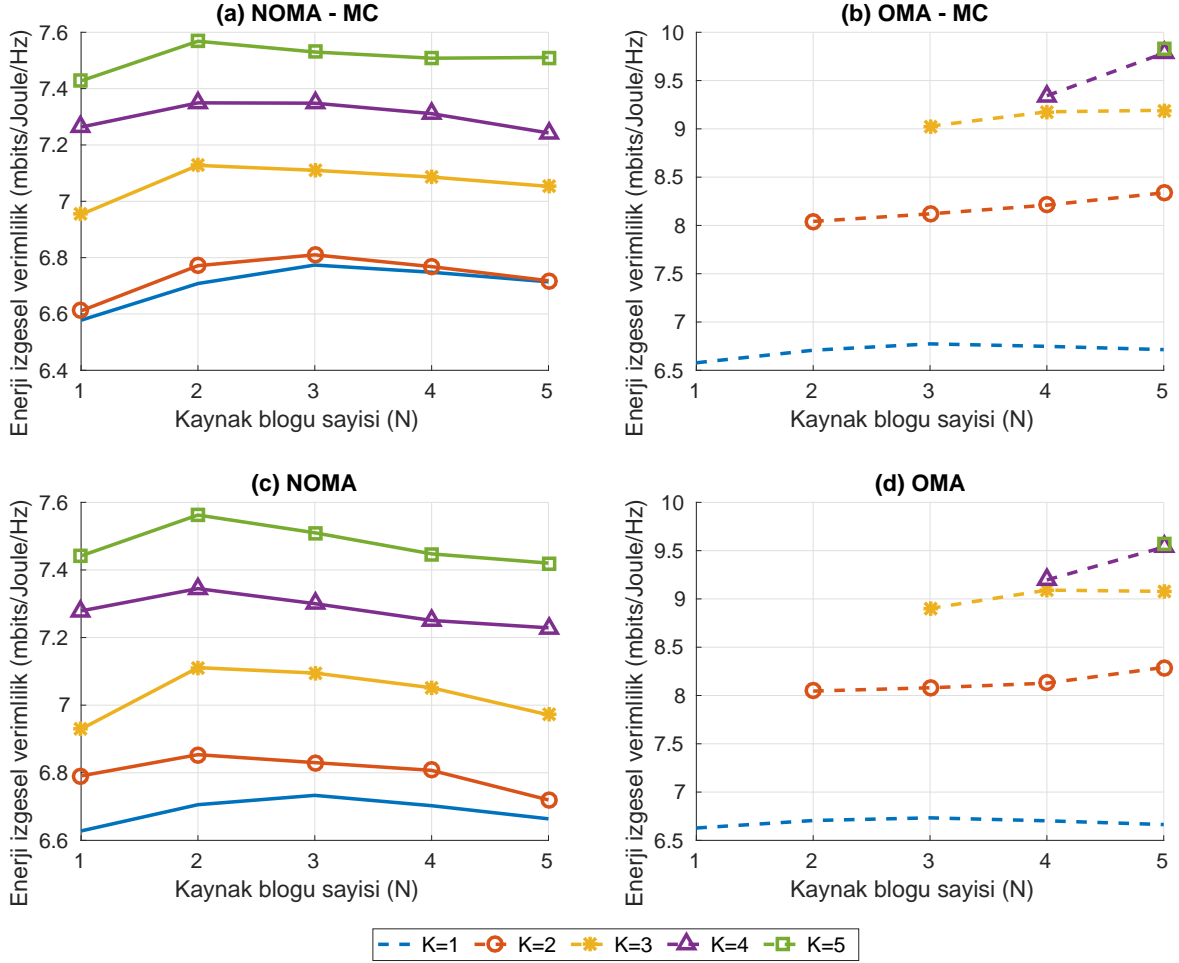
Şekil 3.20.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.21.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

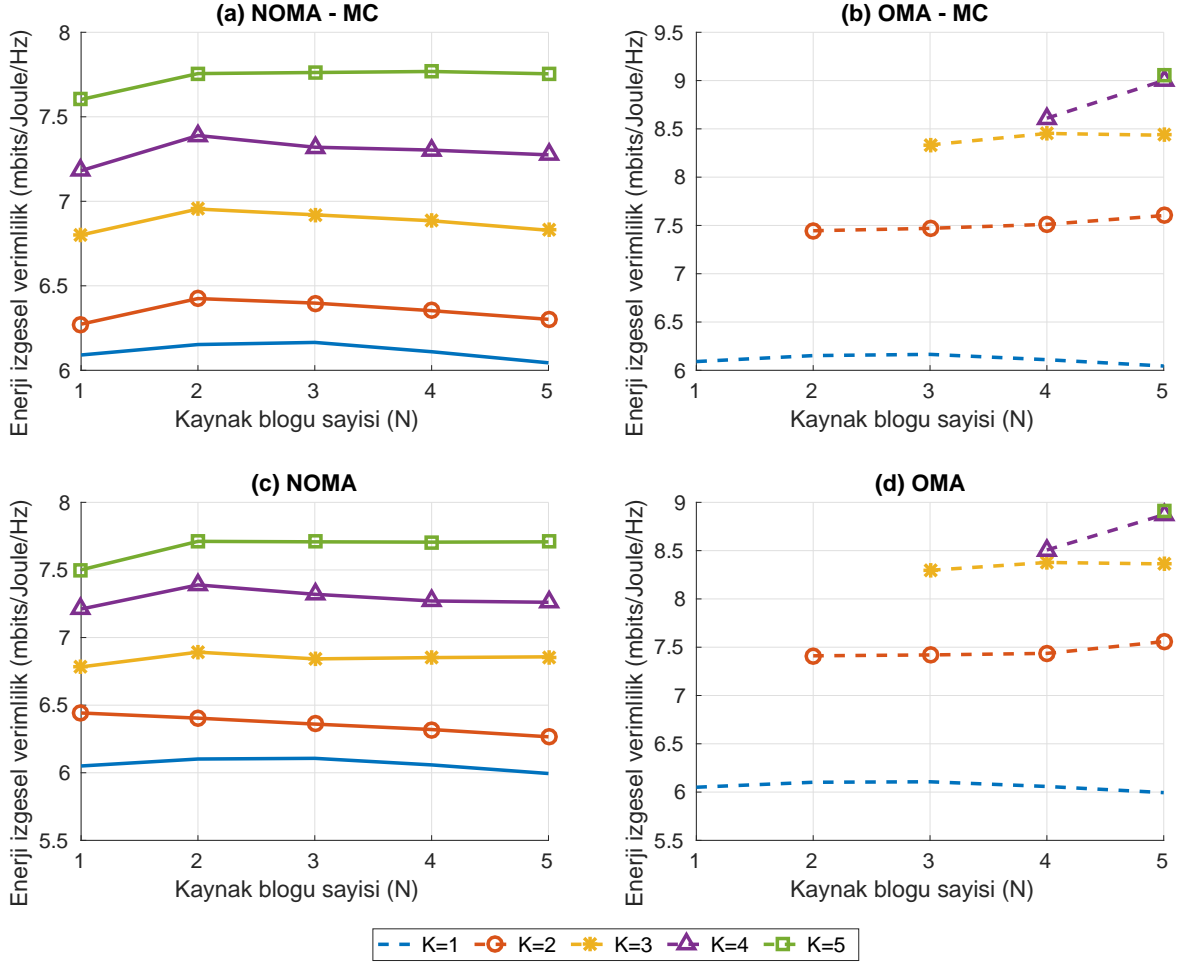


Şekil 3.22.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

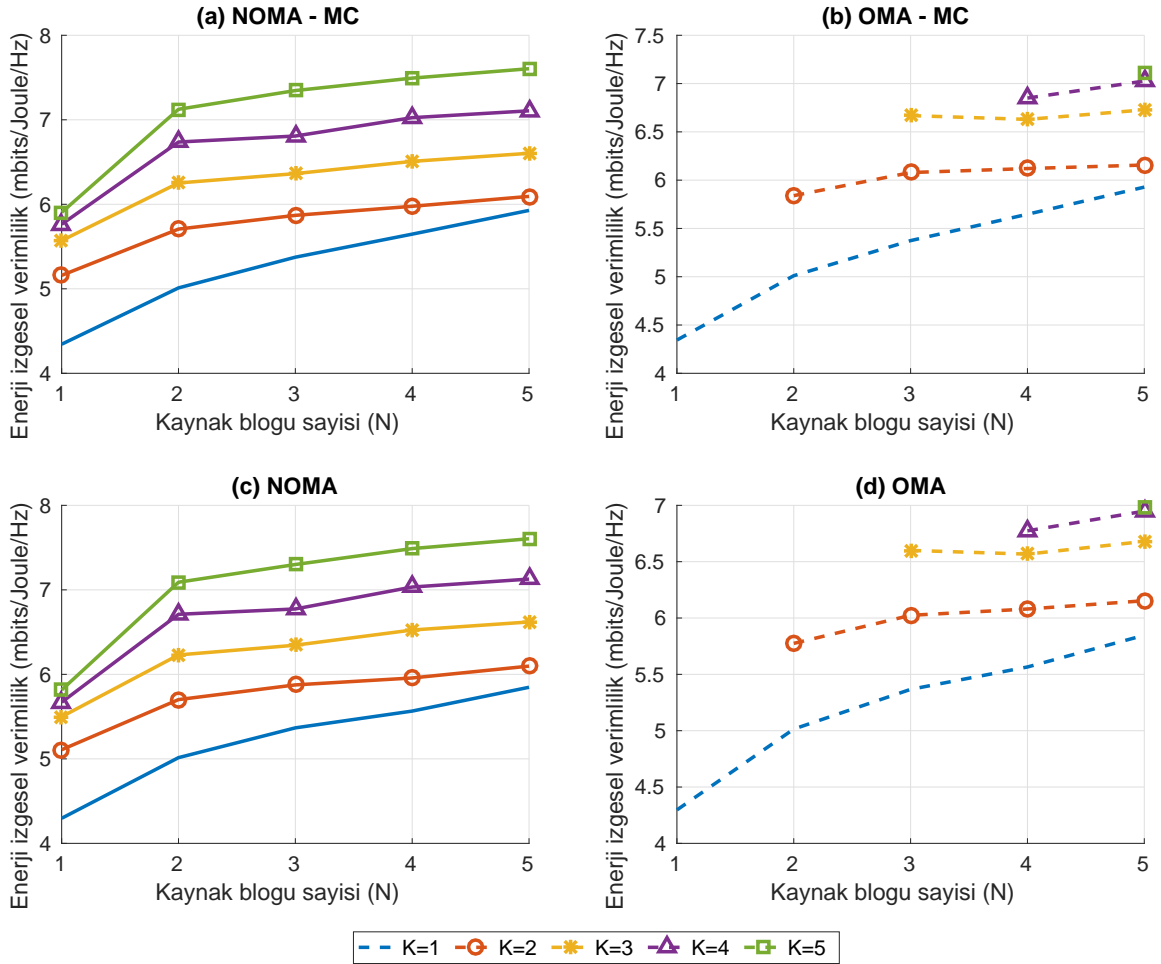


Şekil 3.23.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

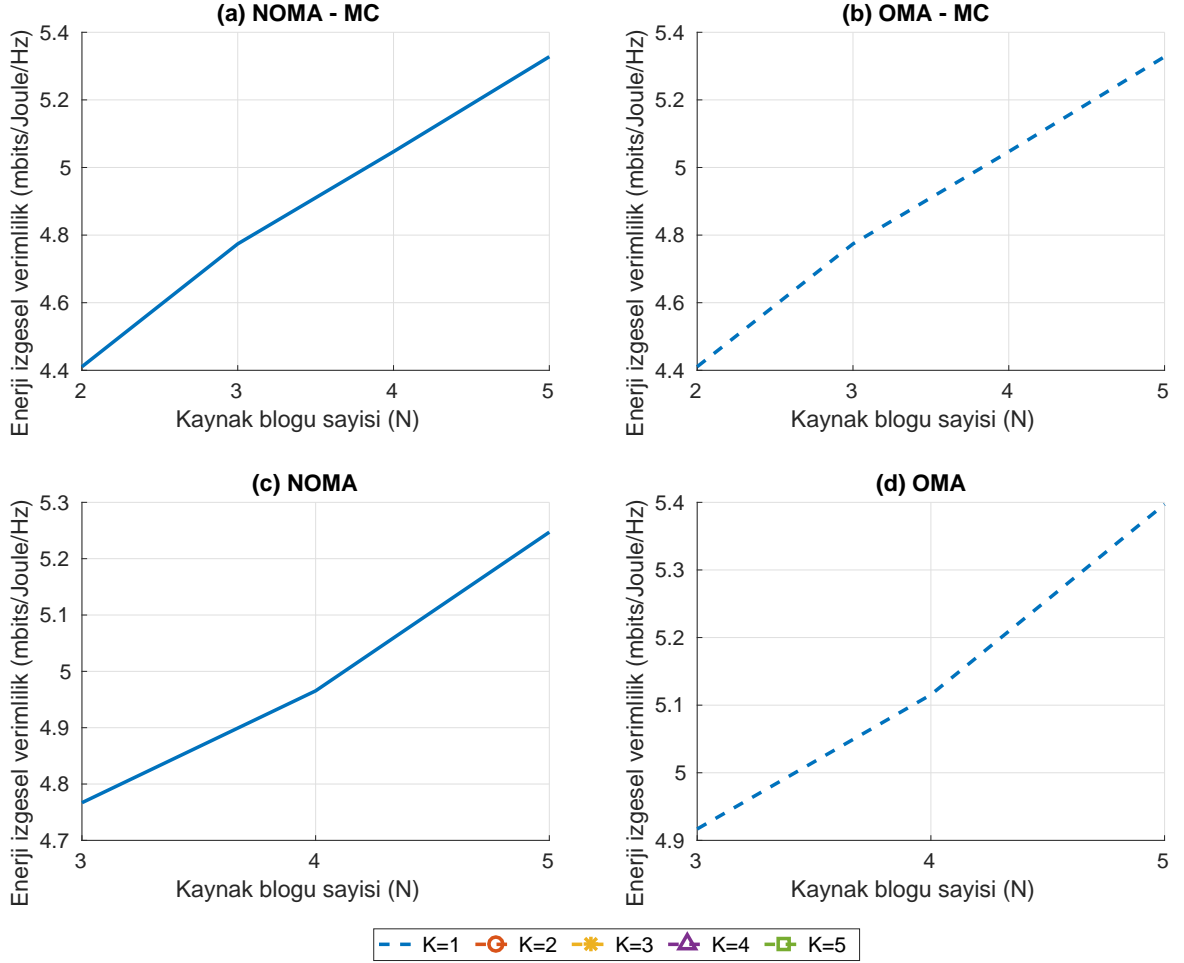




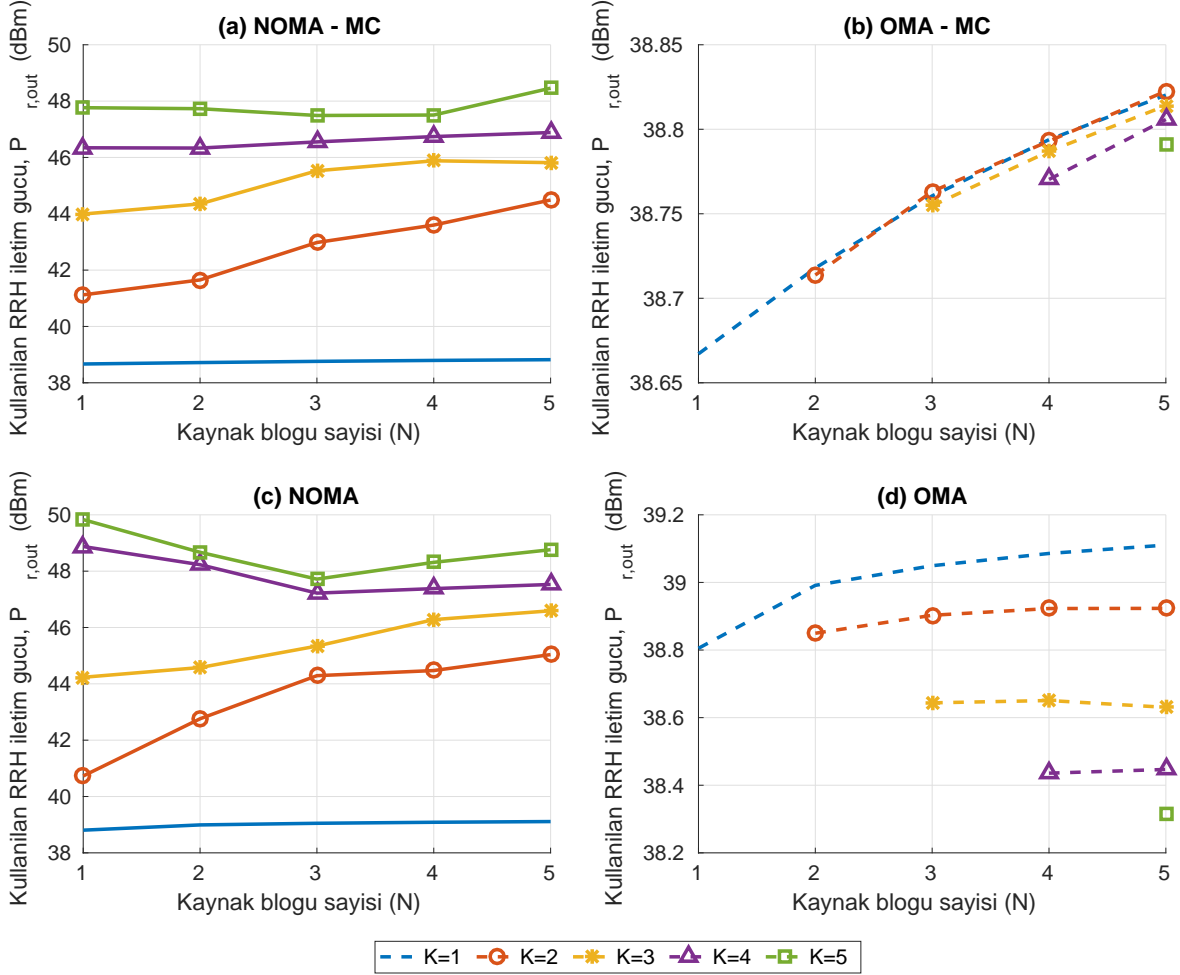
Şekil 3.24.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



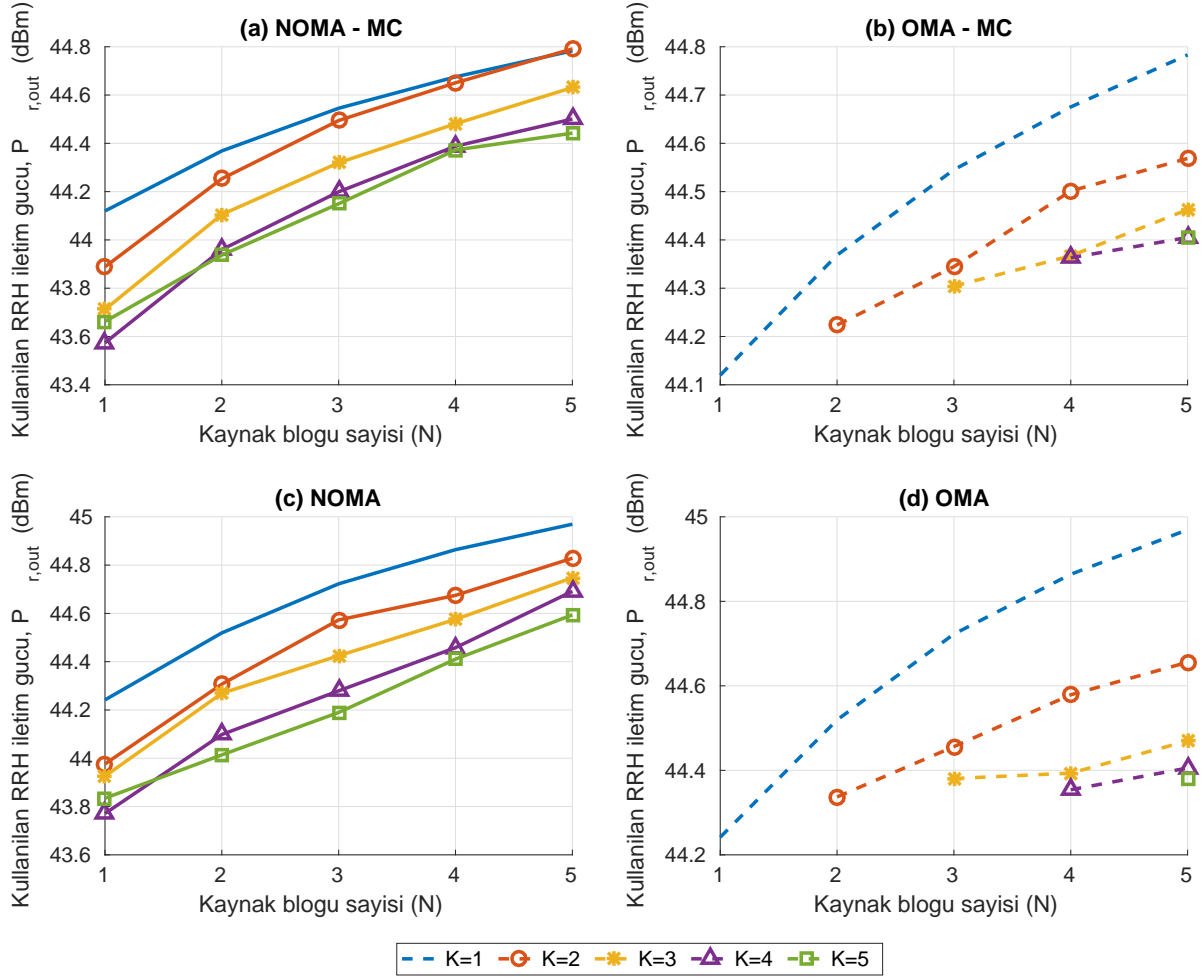
Şekil 3.25.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, toplaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, toplaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



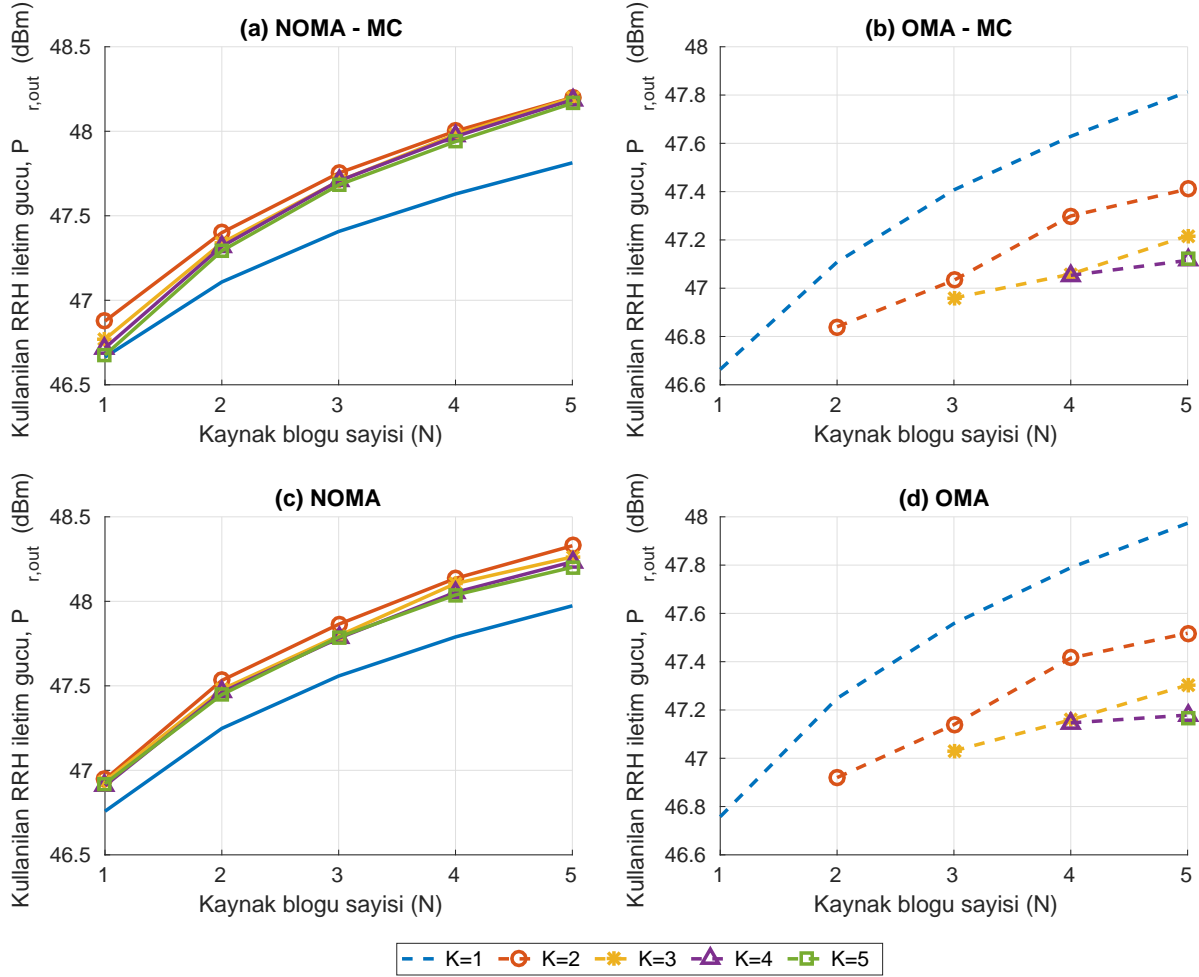
Şekil 3.26.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



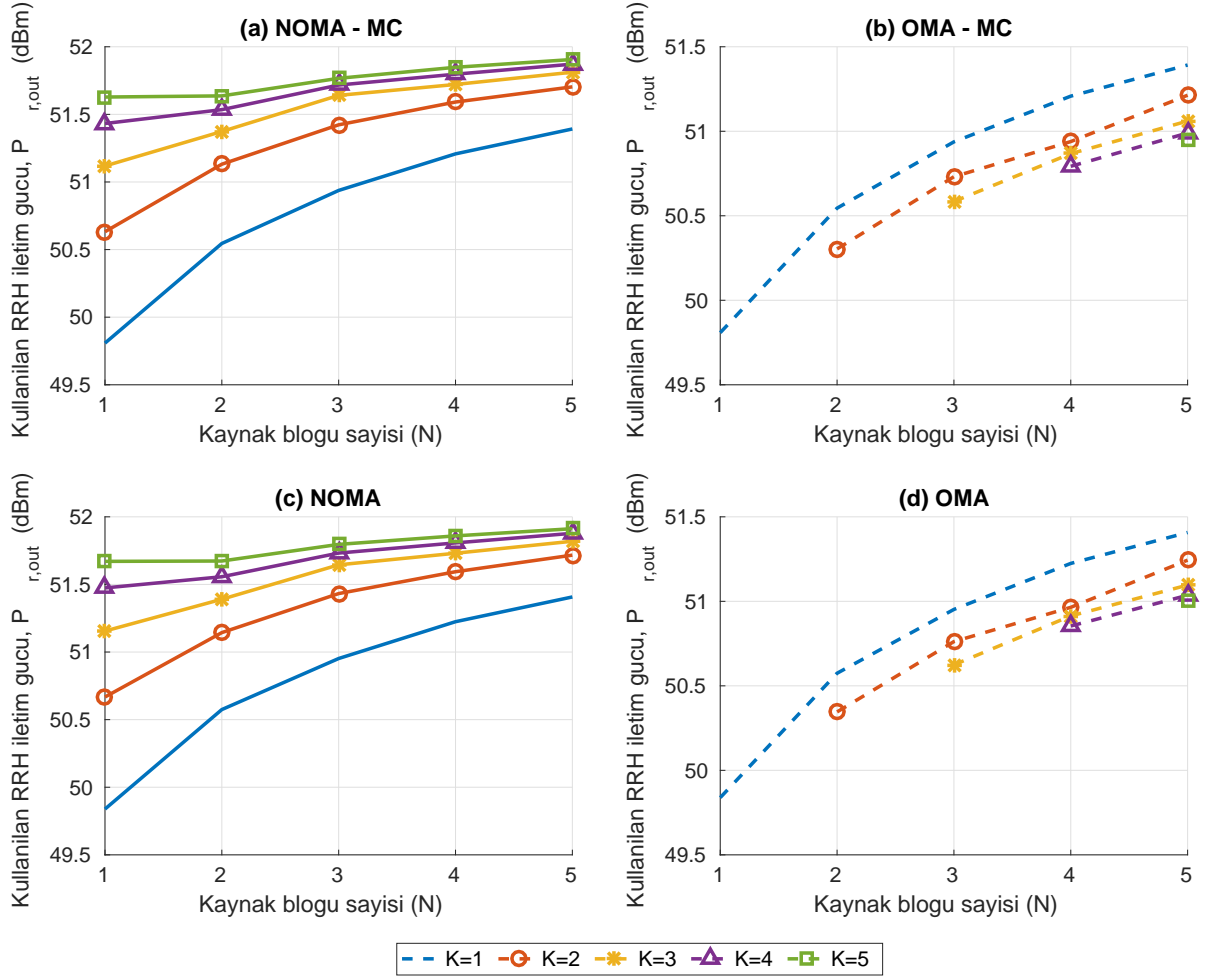
Şekil 3.27.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



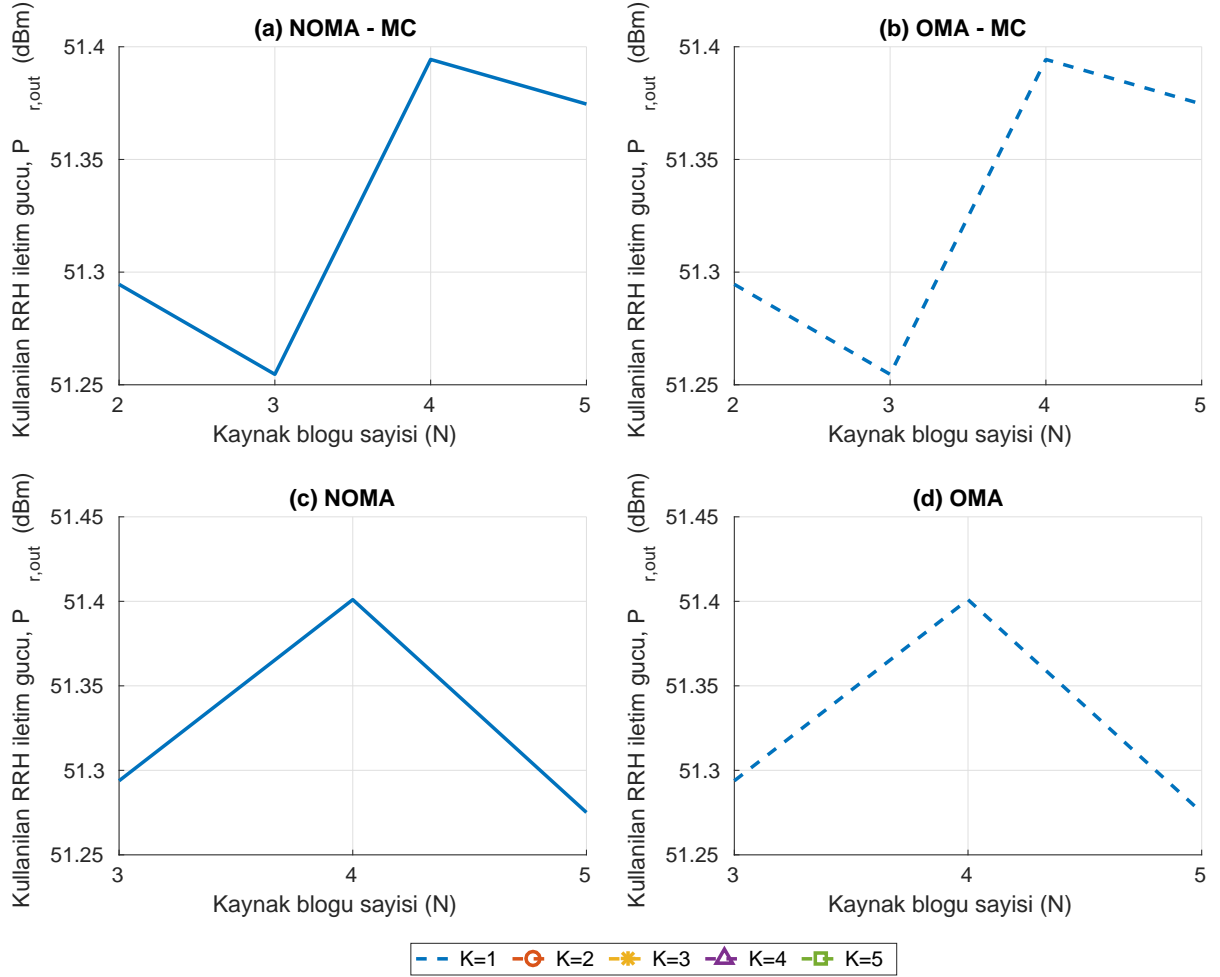
Şekil 3.28.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.29.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

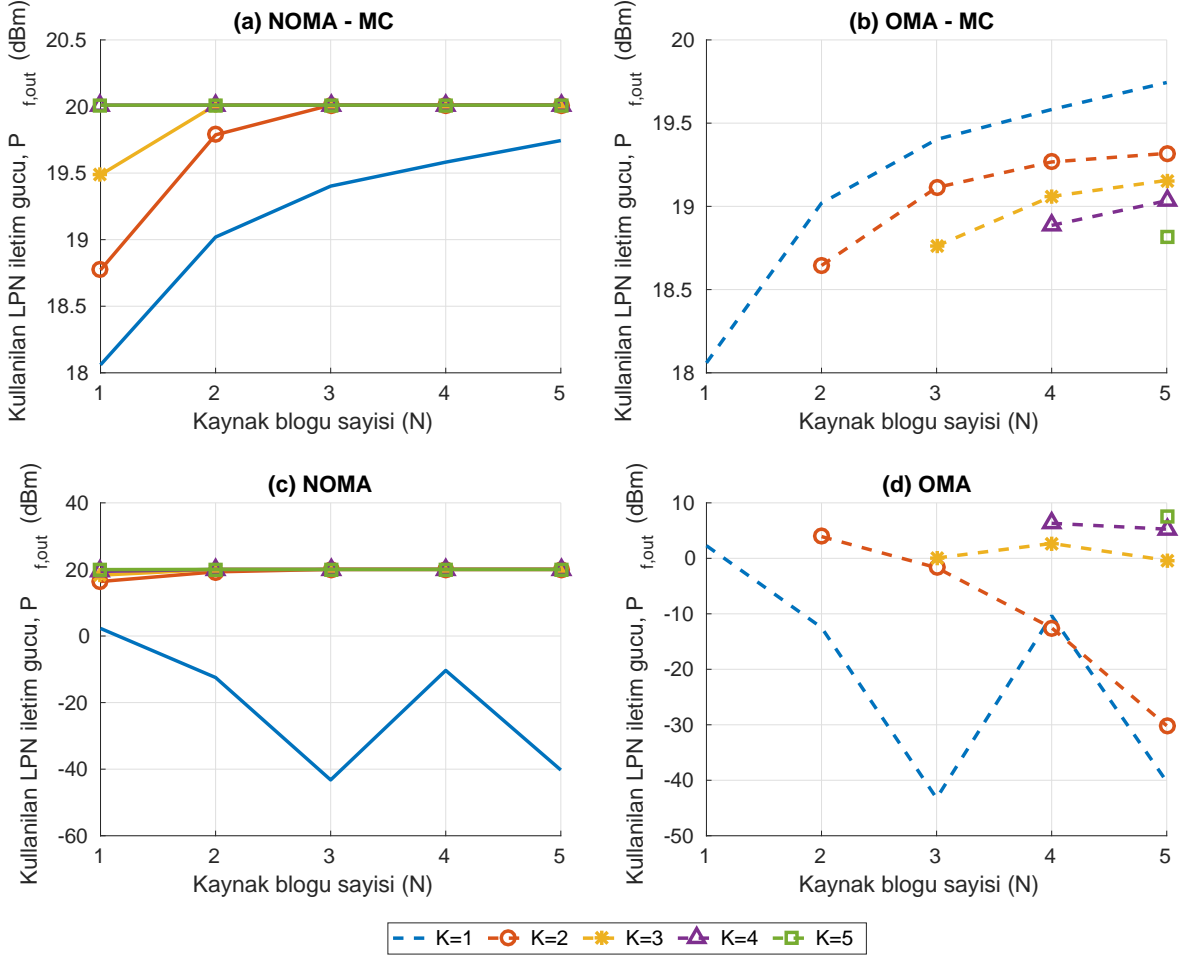


Şekil 3.30.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

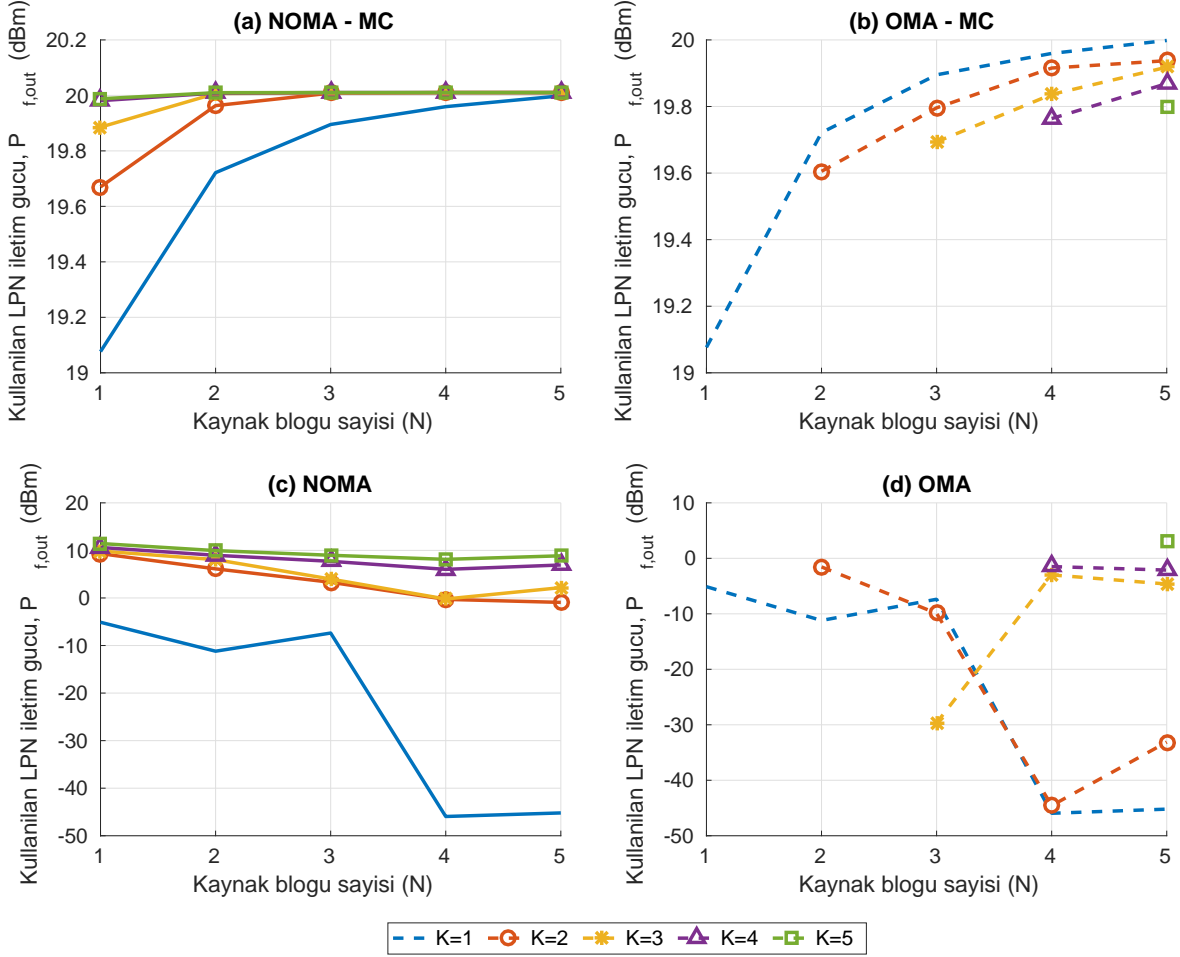


Şekil 3.31.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

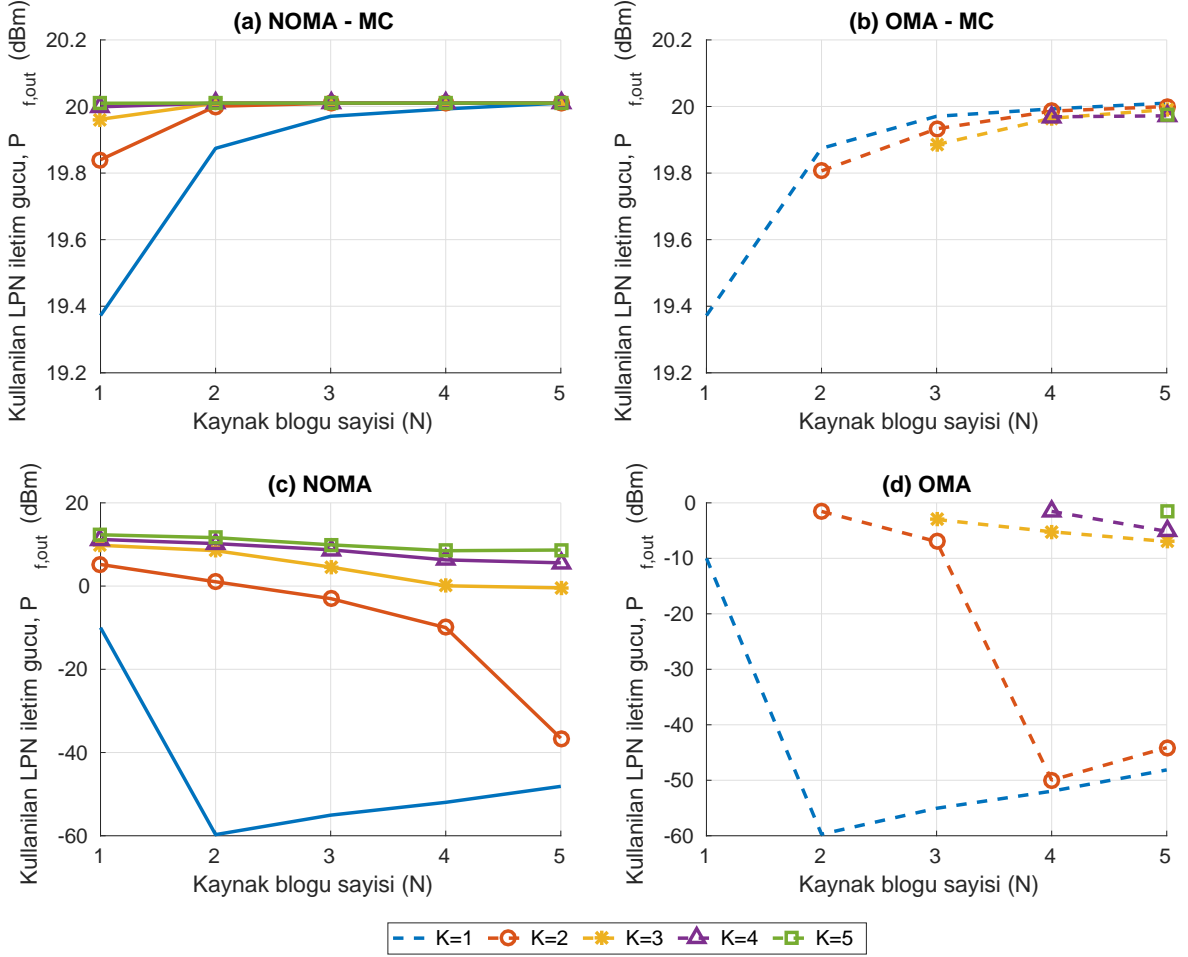




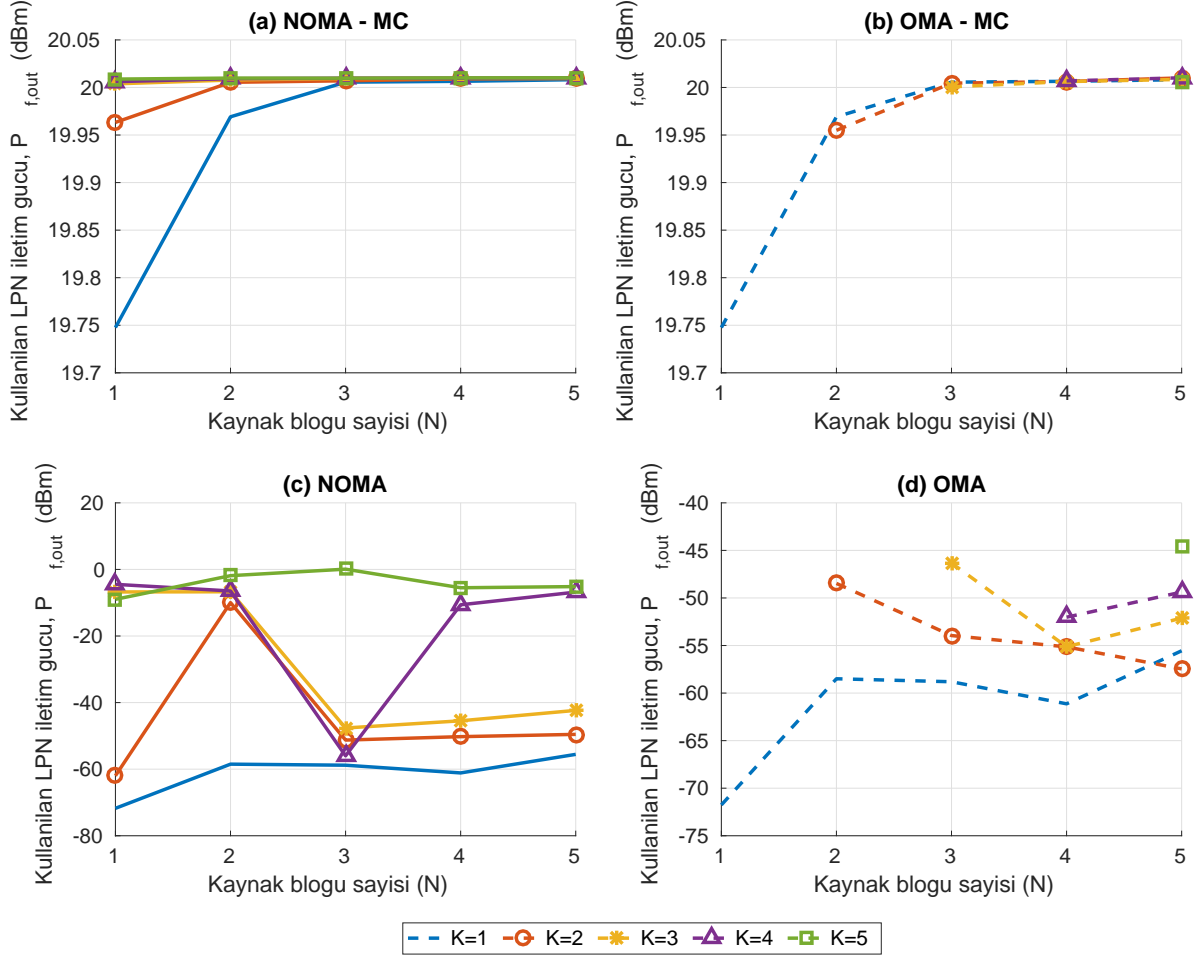
Şekil 3.32.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, toplaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -\infty$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, toplakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



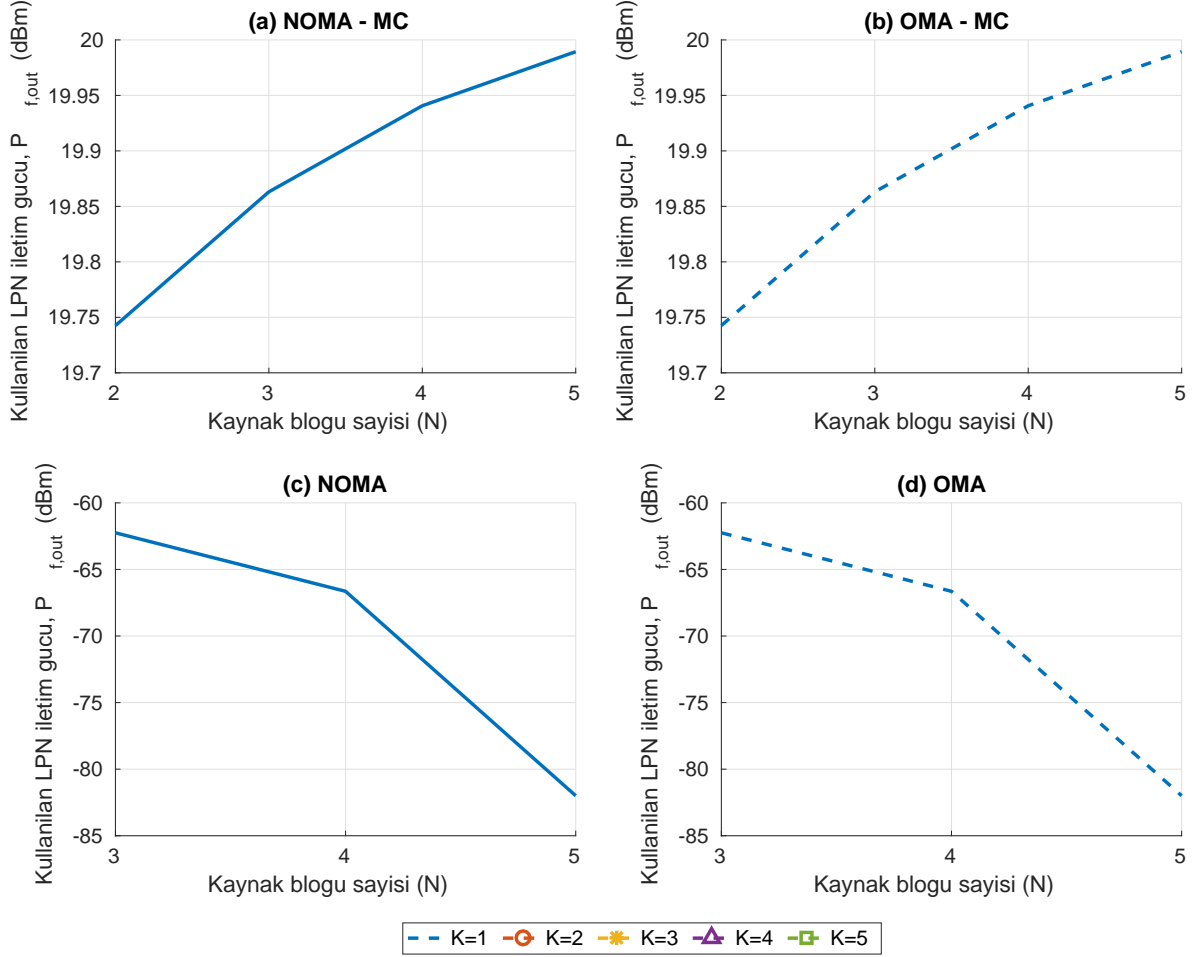
Şekil 3.33.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = -20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.34.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 0$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.35.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 20$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 3.36.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Hücrelerarası girişim değeri  $I_{max} = 40$  dBm olarak kabul edilmektedir. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan toplam LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları ( $K$ ) için RB sayısına ( $N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

### 3.4 SONUÇLAR

Bölüm 3'te, çok kullanıcı, çok taşıyıcı ve çoklu hücre yapısına sahip topakta, CoMP, MC, RRM, ICIC gibi ağ fonksiyonları her hücre kontrolörüne dağıtılmaktadır ve her hücre kendi kararlarını vermektedir. Burada RRM iki ayrı koordinasyon seviyesinde incelenmektedir. Birincisi, dağıtık RRM (dRRM), ağ eniyilemesinin yapıldığı bir önceki andaki komşu hücrelerden gelen girişim seviyelerine göre kendi başarımını eniyilemektedir, ve bu eniyileme sonucu bir sonraki adımda etkili olacak şekilde yinelemeli bir RRM algoritması önerilmektedir. Bir diğeri, merkezi olmayan RRM (decRRM), komşu hücre girişim seviyelerini bilmeden sabit bir hücrelerarası girişim değeri ( $I_{max}$ ) kabul edilerek sistem eniyilemesi yapılmaktadır. Sistem eniyilemesi yapıldıktan sonra elde edilen güç kontrol katsayıları kullanılarak (gerçek) sistem başarımı hesaplanmakta ve incelenmektedir. Bu bölümde adaletlilik, BS azami güç, enküçük veri hızı gibi kısıtlar altında, hem dRRM hem de decRRM için enerji verimliliği eniyileştirilmektedir. Sürekli güç yönetimi (CPM) tasarısı kullanılarak eniyileme problemi çözülmektedir. Kullanıcıların özdeş olmayan erişim noktalarına aynı anda bağlanmasına olanak sağlayan MC fonksiyonunun etkileri, NOMA ve OMA fonksiyonları ile birlikte incelenmektedir.

Hem dRRM hem decRRM için sistem genelinde en düşük veri hızı, Jain adaletliliği ve farklı güç değerlerine sahip erişim noktalarının azami güç kısıtları altında enerji verimliliğinin enbüyütültüğü senaryolar için EE, SE, ESE başarımları ve erişim noktalarının kullandığı iletim güçleri aktif LPN sayısına ve kullanılabilir RB sayısına göre incelenmektedir. decRRM için ayrıca, varsayılan hücrelerarası girişim değerinin de sistem başarımına etkisi incelenmektedir.

Dağıtık RRM (dRRM) başarımları incelendiğinde, LPN'lerin aktif olabilmesi için harcadığı iletim harici güçler dolayısıyla, artan LPN sayısı ile EE başarımının düştüğü ve homojen ağlara kıyasla başarımların kaybı olduğu gözlemlenmektedir. MC fonksiyonunun aktif olmadığı durumlarda, kullanıcıların RRH'leri tercih ettiği gözlemlenmektedir. Ayrıca LPN kullanılmadan hücre başına  $K = 5$  kullanıcıya, kısıtları sağlayacak şekilde hizmet sunulmadığı gözlemlenmektedir. EE başarımı her NOMA ve MC kombinasyonu için RB sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. NOMA tekniğinin kullanıldığı durum incelendiğinde, düşük sayıda RB sayısı için, kullanıcı çeşitleme-

sinin başarımı çok fazla etkilemediği gözlenmekte, ancak RB sayısının artmasıyla başarımın  $K$  ile artışı daha rahat görülebilmektedir. Burada, kısıtlı bantgenişliği için (bütün iletimin bu bantgenişliğinde yapılması sebebiyle) girişim etkin bölgenin etkisi fazla olmakta; kullanılabilir RB arttığında ise, girişim daha etkin bir şekilde giderilebilmektedir. NOMA ve MC fonksiyonunun kullanımı, özellikle yüksek bantgenişliğinde, beklenildiği üzere başarımı artırmaktadır. Bu mimari ve RRM seviyesinde hücrelerin EE'si yükseltilmekte; ancak oluşan hücrelerarası girişim sebebiyle ağdaki toplam başarım düşmektedir. Hücrelerarası koordinasyon eksikliği nedeniyle girişim arzu edilen seviyede giderilememekte ve fazladan bantgenişliği sistem başarımını iyileştirse de; cRRM çözümüne erişememektedir. Etkin girişim yönetimine sahip NOMA kullanıldığında, artan  $K$ , yani kullanıcı çeşitlemesi ile SE başarımı artmakta, ancak OMA'da girişim yönetiminde bulunan eksiklik başarımı düşürmektedir. DDRAN mimarisinde yapılan merkezi RRM sonuçlarının aksine, DRAN ve dRRM için, RB sayısının artmasıyla, elde edilen düşük SE başarımı sürekli artma eğilimindedir.

Merkezi olmayan RRM (decRRM) başarımları incelendiğinde, OMA durumunda artan  $I_{max}$  değeri ile EE başarımı sürekli düşmektedir. Hücrelerarası girişimin olmadığı varsayıldığında ve NOMA kullanıldığında EE başarımı, sıfırdan farklı  $I_{max}$  değerlerine göre daha düşük sonuç vermektedir. MC fonksiyonu kullanılmadığında kullanıcılar RRH'lere bağlanmaktadır, sadece hücrelerarası girişim olmadığı ve NOMA'nın kullanıldığı durumda LPN'lere bağlanan kullanıcı(lar) bulunmaktadır. MC fonksiyonu kullanıldığında ise LPN'ler de veri iletiminde görev alacak şekilde sistem eniyilenmektedir. NOMA kullanıldığında, hücrelerarası girişimin  $I_{max} = -20$  dBm olduğu varsayıldığında RRH'lerin en az iletim gücü harcadıkları, daha yüksek  $I_{max}$  değerleri için daha yüksek RRH iletim gücü kullanıldığı görülmektedir. NOMA'nın kullanılmadığı durumda, artan  $I_{max}$  değerleri için kullanılan RRH iletim gücü sürekli artmaktadır.

Oldukça yüksek  $I_{max}$  değeri için, çoklu kullanıcılara hizmet verilemediği gözlemlenmiştir. Yine hücrelerarası girişimin olmadığı uç noktada NOMA yöntemi kullanıldığında,  $K = 1$  kullanıcıli durumda en yüksek EE başarımı elde edilmektedir. Eniyileme sonucunda bulunan güç kontrol katsayıları kullanılarak elde edilen gerçek girişim değerlerinin kullanılması sebebiyle kullanıcı sayısı arttıkça başarımın düştüğü görülmektedir. Gerçekçi olmayan  $I_{max}$  değerlerinde yapılan girişim yönetimi et-

kin olmadığı için bantgenişliğinin etkisi de daha az görülmektedir. Bu mimari ve RRM seviyesinde hücrelerarası koordinasyon eksikliğinin enküçük düzeyde kalması sebebiyle girişim arzu edilen seviyede giderilememekte ve fazladan bantgenişliği sistem başarımını iyileştirse de; diğer çözümlere yaklaşmamaktadır.



## 4. BULUT RAN (C-RAN) MİMARİSİ

Mobil ağlar, gecikme, trafik hacmi ve veri hızlarıyla ilgili yeni gereksinimlerle sürekli olarak artan kapsama, kapasite ve yeni özellikler açısından hızla gelişmektedir. Operatörler bulut RAN mimarileri ile ağda NFV teknikleri ve merkezi sinyal işleme yeteneklerinin kullanımı yoluyla bu artan talepleri karşılayabilecek ve böylece kaynak havuzlama, ölçeklenebilirlik ve spektral verimlilik gibi kazançlar sağlayacaklardır. Bulut RAN'ların etkileri ilk olarak makro- ve küçük-hücrelerin heterojen ağlarda birlikte kullanılması ve farklı kapsama alanlarına sahip yeni bantların kullanılmaya başlanması ile radyo kaynak yönetiminde görülecektir. Bütün sistem üzerinden merkezi olarak yapılacak güç kontrolü ve kaynak tahsisi sistemin verimini artıracaktır.

Bölüm 2'de bağlantırlık gibi bazı ağ fonksiyonlarının hücrelerarasında dağıtılıp RRM gibi bazılarının ise merkezi olarak tutulduğu dinamik dağıtık RAN mimari yapısı incelenmiş, Bölüm 3'te ise dağıtık RAN yapısında RRM ve IM hem dağıtık hem de merkezi olmayan iki ayrı koordinasyon seviyesiyle incelenmişti.

Bu bölümde ise C-RAN mimarisi ile bütün ağ fonksiyonları ve işlemleri (RRM, bağlantırlık, vb.) merkezileştirilerek, geçen bölümlerdeki hücresel yapının aksine bütün sistem bir hücre gibi düşünülmekte, ve merkezi RRM ve IM algoritmaları ile bütün ağ üzerinden eniyileme yapılmaktadır. Burada ön taşıyıcı ağın ve art taşıyıcı ağın kayıpsız olduğu varsayılmaktadır.

### 4.1 SİSTEM MODELİ

Önceki bölümlerle aynı şekilde Kısım 1.4.1'de tanımlanan ağ modeli benimsenmektedir. Çok kullanıcı ve çok taşıyıcı heterojen ağlar için sistem modeli aşağıda tanımlanmaktadır. Bölümler 2 ve 3'ün aksine, kullanıcılar iletişim kurmak için sadece bulunduğu hücrenin erişim noktaları ile sınırlandırılmamıştır; ve bütün topak bir bulut olarak düşünüldüğü için bütün erişim noktalarından sinyal almaktadır. Sistem  $M$  hücre, ve her hücrede  $L_r$  adet RRH,  $L_f$  adet LPN bulunacak şekilde tanımlanmaktadır. Ancak girişim ve kaynak yönetimi C-RAN mimarisine göre merkezi kontrolör tarafından yapılmaktadır, dolayısıyla bir bulut yapı ve sınırları içinde  $ML_r$  adet RRH,  $ML_f$  adet LPN bulunan ve  $K_f$  kullanıcıya hizmet eden bir yapı olarak düşünülebi-

lır. Kullanıcıların ve erişim noktalarının fiziksel yerleşimlerinin tanımlanabilmesi için hücrelerin mevcudiyeti korunurken, kontrol bağlamında tek bir bulut yapısı söz konusudur. Hücre ile bulut arasındaki ayrımın belirtilmesi girişim yönetimi ve aşağıdaki tanımlamalar bağlamında önemlidir.

Her erişim noktası ve kullanıcının birer adet antene sahip olduğu varsayıldığı bu senaryoda, RRH'lerin ve LPN'lerin iletim yapabileceği güç sırasıyla  $P_{r,max}$  ve  $P_{f,max}$  ile sınırlanmaktadır.  $z$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının iletim gücü sınırı  $P_{\ell z}$  ile genelleştirilmektedir.  $z$ 'inci hücredeki  $\ell$ 'inci erişim noktasının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerinde  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcı ile arasındaki kanal katsayısı  $h_{\ell z k m i}$  ile gösterilmektedir, ve bu kanal içinde bu kullanıcıya,  $x_{k m}$  sinyalini gönderebilmek için kullanacağı iletim gücü  $\alpha_{\ell z k m i}$  güç kontrol katsayıları ile ayarlanmaktadır. Problem Sürekli Güç Yönetimi (CPM) için düzenlenmektedir, yani her RRU ( $\alpha_{\ell z k m i} \in [0, 1]$ ) aralığı dahilinde herhangi bir güç seviyesinde iletim yapabilecektir; ancak herhangi bir erişim noktasında bütün RRU'ların bütün kullanıcılar için bütün RB'ler üzerinden harcadağı toplam iletim gücü (RRH için  $P_{r,max}$ , LPN için  $P_{f,max}$ ) ile sınırlandırılmaktadır.

CoMP haberleşme yöntemi ile erişim noktaları bir veya birden fazla kullanıcıya aynı anda sinyaller gönderebilmektedir. Dolayısıyla,  $m$ 'inci hücredeki  $k$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci kaynak bloğunda aldığı sinyal, hücresel yapı göz önüne alındığında

$$\begin{aligned}
y_{k m i} = & \left( \sum_{z=1}^M \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell z k m i} P_{\ell z}} h_{\ell z k m i} \omega_{\ell z k m i} \right) x_{k m} \\
& + \sum_{j=1, j \neq k}^{K_m} \left( \sum_{z=1}^M \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell z j m i} P_{\ell z}} h_{\ell z k m i} \omega_{\ell z j m i} \right) x_{j m} \\
& + \sum_{n=1, n \neq m}^M \sum_{j=1}^{K_n} \left( \sum_{z=1}^M \sum_{\ell=1}^L \sqrt{\alpha_{\ell z j n i} P_{\ell z}} h_{\ell z k m i} \omega_{\ell z j n i} \right) x_{j n} + \eta_{k m i}, \quad \forall m, k, i,
\end{aligned} \tag{4.1}$$

olarak yazılır. Alınan sinyal, bulut mimariye uygun olarak

$$y_{k i} = \left( \sum_{\ell=1}^{M L} \sqrt{\alpha_{\ell k i} P_{\ell}} h_{\ell k i} \omega_{\ell k i} \right) x_k + \sum_{j=1, j \neq k}^{K_t} \left( \sum_{\ell=1}^{M L} \sqrt{\alpha_{\ell j i} P_{\ell}} h_{\ell k i} \omega_{\ell j i} \right) x_j + \eta_{k i}, \quad \forall k, i, \tag{4.2}$$

şeklinde düzenlenebilir, burada  $\ell = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq M(L_r + L_f)\}$ ,  $j = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq K_t\}$ ,  $k = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq K_t\}$ , ve  $i = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq N\}$  için, buluttaki

$k$ 'inci kullanıcıya iletilecek bilgi sinyali  $x_k$  ile temsil edilmekte ve  $E[x_k x_j] = \delta_{jk}$  eşitliği geçerlidir, yani,  $k \neq j$  durumunda gelen farklı bilgi sinyalleri ilintisizdir.  $\alpha_{\ell ki}$  ve  $\omega_{\ell ki}$  katsayıları, sırasıyla,  $\ell$ 'inci erişim noktasının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerinde  $k$ 'inci kullanıcı için ayırdığı iletim gücünü ve hüzme yönlendirmeyi kontrol etmektedir.  $\ell$ 'inci erişim noktası ile  $k$ 'inci kullanıcının  $i$ 'inci kaynak bloğu üzerindeki kanal katsayısı  $h_{\ell ki}$  ile temsil edilmektedir.  $\sigma_\eta^2$  değişintili sıfır ortalamalı çevrimsel eklenir beyaz Gauss gürültü  $\eta_{ki}$  ile gösterilmektedir. Eşitlik (4.2)'de tanımlanan alınan sinyaldeki ilk terim  $k$ 'inci kullanıcıya gönderilmek istenen sinyali gösterirken, ikinci terim ilgili kullanıcının buluttaki diğer kullanıcılara (buluttaki bütün erişim noktalarından) iletilen sinyallerden kaynaklı girişimi temsil etmektedir. Son terim ise gürültüyü temsil etmektedir. Dolayısıyla hücredeki ilgili kullanıcının sinyal girişim gürültü oranını belirten SINR

$$\gamma_{ki}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) = \frac{\left| \sum_{\ell=1}^{ML} \sqrt{\alpha_{\ell ki}} \mathbf{P}_\ell \mathbf{h}_{\ell ki} \omega_{\ell ki} \right|^2}{\sigma_\eta^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^{K_t} \left| \sum_{\ell=1}^{ML} \sqrt{\alpha_{\ell ji}} \mathbf{P}_\ell \mathbf{h}_{\ell ki} \omega_{\ell ji} \right|^2}, \quad \forall k, i, \quad (4.3)$$

olarak bulunur ve matematiksel takibi kolaylaştırmak için

$$\gamma_{ki}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\omega}) = \frac{\boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{C}_{ki}(\boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\alpha}}{\sigma_\eta^2 + \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{D}_{ki}(\boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\alpha}} \quad \forall k, i, \quad (4.4)$$

matris biçiminde düzenlenmektedir, burada

$$\boldsymbol{\alpha} = \left[ \bigoplus_{i=1}^N \boldsymbol{\alpha}_i^T \right]^T = [\boldsymbol{\alpha}_1^T \boldsymbol{\alpha}_2^T \cdots \boldsymbol{\alpha}_N^T]^T, \quad (4.5)$$

güç kontrol vektörü

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_i &= \left[ \bigoplus_{k=1}^{K_t} \boldsymbol{\alpha}_{ki}^T \right]^T = \left[ \bigoplus_{m=1}^M \bigoplus_{k=1}^{K_m} \boldsymbol{\alpha}_{ki}^T \right]^T = [\boldsymbol{\alpha}_{1i}^T \boldsymbol{\alpha}_{2i}^T \cdots \boldsymbol{\alpha}_{K_t i}^T]^T, \\ \boldsymbol{\alpha}_{ki} &= \left[ \bigoplus_{\ell=1}^{ML} \alpha_{\ell ki} \right]^T, \\ &= [\sqrt{\alpha_{1ki}} \sqrt{\alpha_{2ki}} \cdots \sqrt{\alpha_{MLki}}]^T, \\ &= [\sqrt{\alpha_{1ki}} \sqrt{\alpha_{2ki}} \cdots \sqrt{\alpha_{L_r ki}} \sqrt{\alpha_{(L_r+1)ki}} \cdots \sqrt{\alpha_{(L_r+L_t)ki}} \cdots \sqrt{\alpha_{M(L_r+L_t)ki}}]^T, \end{aligned} \quad (4.6)$$

alt vektörlerinden oluşmaktadır, burada güç kontrol vektörü tek bir bulut üzerinden tanımlanmaktadır ve  $\alpha_{lki}$   $l$ 'inci erişim noktasından bulut içindeki  $k$ 'inci kullanıcıya  $i$ 'inci RB üzerinden gönderilen sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha_{ki}$  buluttaki  $k$ 'inci kullanıcıya  $i$ 'inci RB üzerinden gönderilen sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha_i$  buluttaki bütün erişim noktalarından bütün kullanıcılara  $i$ 'inci RB üzerinden gönderdikleri sinyallerin gücünü kontrol eden elemanlardan,  $\alpha$  ise bütün sistemdeki sinyal iletiminin güç kontrolünü sağlayan elemanların hepsinden oluşmaktadır. DD-RAN mimarisinde cRRM fonksiyonu kullanımına kıyasla  $M$  kat, D-RAN mimarisinde dRRM kullanımına kıyasla  $M^2$  kat boyutu artan, gönderilen sinyal kanal matrisi,  $\mathbf{C}_{ki} \in \mathbb{C}^{MLK_t N \times MLK_t N}$ , ve girişim kanal matrisi,  $\mathbf{D}_{ki} \in \mathbb{C}^{MLK_t N \times MLK_t N}$ ,

$$\mathbf{C}_{ki}(\omega) = \bigoplus_{u=1}^{i-1} \mathbf{0}_{MLK_t} \bigoplus_{j=1}^{K_t} c_{jk} \mathbf{F}_{jk,i}(\omega) \bigoplus_{u=i+1}^N \mathbf{0}_{MLK_t}, \quad (4.7)$$

$$\mathbf{D}_{ki}(\omega) = \bigoplus_{u=1}^{i-1} \mathbf{0}_{MLK_t} \bigoplus_{j=1}^{K_t} d_{jk} \mathbf{F}_{jk,i}(\omega) \bigoplus_{u=i+1}^N \mathbf{0}_{MLK_t}, \quad (4.8)$$

olarak blok köşegen yapısında oluşturulmaktadır. Burada  $\mathbf{0}_{MLK_t}$  ( $MLK_t \times MLK_t$ ) boyutunda sıfır matrisini temsil etmektedir. Kanal seçim vektörleri olarak adlandırılan  $c_{jk}$  ve  $d_{jk}$  sırasıyla gönderilmek istenen sinyalin ve girişim terimlerinin seçiminde görevlidir ve

$$c_{jk} = \delta_{jk}, \quad (4.9)$$

$$d_{jk} = \delta_{SIC} \delta_{j>k} + (1 - \delta_{SIC})(1 - \delta_{jk}), \quad (4.10)$$

olarak tanımlanmaktadır.  $j = k$  olarak seçildiği takdirde sinyal gönderilmek istenen kullanıcı seçilmektedir. Aksi durumda  $\delta_{SIC} = 1$  durumunda sıralı girişim giderimi kullanılmakta ve  $j < k$  için hücreiçi girişim kısmi olarak giderilmektedir, SIC kullanılmadığı durumda ise  $j \neq k$  olan her  $j$ 'inci kullanıcı  $k$ 'inci kullanıcıya girişim oluşturmaktadır.  $\ell_1, \ell_2 = \{\nu \in \mathbb{N}_+ \mid 1 \leq \nu \leq ML\}$  için  $\mathbf{F}_{jk,i}$  matrisinin  $\ell_1, \ell_2$ 'nci girdileri

$$[\mathbf{F}_{jk,i}(\omega)]_{\ell_1 \ell_2} = \sqrt{P_{\ell_1} P_{\ell_2}} \Re \{ h_{\ell_1 k i} \omega_{\ell_1 j i} h_{\ell_2 k i}^* \omega_{\ell_2 j i}^* \}. \quad (4.11)$$

olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra kullanıcı veri hızı

$$r_k(\alpha, \omega) = \sum_{i=1}^N B \log_2(1 + \gamma_{ki}(\alpha, \omega)), \forall k, \quad (4.12)$$

ile elde edilir.

Eniyileme problemini basitleştirmek için hüzme yönlendirme katsayıları erişim noktaları (RRH ve LPN) ve ilgili kullanıcı arasındaki kanala

$$\omega_{\ell ki} \triangleq e^{-j\angle h_{\ell ki}} \forall \ell, k, i \quad (4.13)$$

olacak şekilde uyumlandırılmaktadır [55]. Bu durumda  $\omega$  vektörü eniyileme probleminin bir değişkeni olmaktan çıkmaktadır.

Böylece, buluttaki toplam veri hızı

$$R(\alpha) = \sum_{k=1}^{K_f} r_k(\alpha), \quad (4.14)$$

ile elde edilir. Enerji verimliliği hesaplanması için gereken toplam güç tüketimi ise Eşitlik (1.7)'de tanımlanan doğrusal güç tüketim modeli kullanılarak

$$P_T(\alpha) = \sum_{\ell=1}^{ML} (P_C + \Delta_{p,\ell} P_{out,\ell}), \quad (4.15)$$

$$= \sum_{\ell=1}^{ML} \left( P_{C,\ell} + \Delta_{p,\ell} P_\ell \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_f} \alpha_{\ell ki} \right), \quad (4.16)$$

$$= M(L_r P_{C,r} + L_f P_{C,f}) + (\mathbf{1}_{K_f M}^T \otimes [\Delta_{p,r} P_{r,\max} \mathbf{1}_{L_r}^T \quad \Delta_{p,f} P_{f,\max} \mathbf{1}_{L_f}^T]) \alpha, \quad (4.17)$$

olarak elde edilmektedir. Burada  $P_{C,r}$  ve  $P_{C,f}$  sırasıyla RRH ve LPN'lerin iletim yapmadığı zamanda işlemlerini devam ettirebilmesi için tükettiği güç miktarını,  $\Delta_{p,r}$  ve  $\Delta_{p,f}$  sırasıyla RRH ve LPN'ler için yüke bağlı güç tüketiminin eğimini,  $\alpha$  ise Eşitlik (4.6)'da tanımlanan güç kontrol katsayılarını temsil etmektedir. Bulutta harcanan toplam iletim gücü

$$P_{out}(\alpha) = \sum_{\ell=1}^{ML} (P_{out,\ell}) = (\mathbf{1}_{K_f M}^T \otimes [P_{r,\max} \mathbf{1}_{L_r}^T \quad P_{f,\max} \mathbf{1}_{L_f}^T]) \alpha, \quad (4.18)$$

olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra enerji verimliliği toplam veri hızının toplam tüketilen güç değerine oranı ile

$$\mu_{EE}(\alpha) = \frac{R(\alpha)}{P_T(\alpha)} \quad (4.19)$$

olarak elde edilmektedir.

## 4.2 BENZETİM MODELİ

İlgili senaryoda,  $M = 2$  hücreli bir sistemde, hücre başına  $L_r=4$  adet RRH ve  $L_f \leq 3$  adet LPN için kullanılmıştır ve C-RAN mimarisindeki bulut yapısına uyumlu olacak şekilde bulut içerisinde  $ML_r = 8$  adet RRH,  $ML_f = \{\nu \in \mathbb{N} \mid \nu = 2s, s \leq 3\}$  adet LPN ve  $K_t$  adet kullanıcı bulunmaktadır. Başarım analizi için Monte Carlo benzetimler düzenlenmektedir ve sonuçlar 500 gerçekleştirme üzerinden ortalama alınmaktadır. İlgili benzetimler için önceki mimarilerin de incelendiği Kısım 2.2'de kullanılan Monte Carlo benzetimleri (kanal katsayıları) kullanılmıştır. Benzetim modeli özellikleri Çizelge 4.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 4.1. Benzetim Modeli Özellikleri

Parametre	Benzetim Modeli Özellikleri
Baz istasyonlar arası mesafe	500 m
Yol kaybı ve Gölgeleme modeli	UMa [96], [97]
Gürültü gücü	-174 dBm/Hz
Kullanıcı dağılımı	Birbiçimli ve rasgele dağıtılmış
Frekans / Kaynak bloğu bantgenişliği	2 GHz / 180KHz
Anten Konfigürasyonu	Yönsüz SISO
Kanal Kestirimi	İdeal
Gerçekleme Sayısı	500
NOMA-SIC	Kısmi Girişim Giderimi
Sıfır Yük için RRH Güç Tüketimi	$P_{0,r} : 84 \text{ W}$
Sıfır Yük için LPN (Piko-hücre) Güç Tüketimi	$P_{0,f} : 6.8 \text{ W}$
Sıfır Yük için LPN (Femto-hücre) Güç Tüketimi	$P_{0,f} : 4.8 \text{ W}$
RRH Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,r} : 2.8$
LPN (Piko-hücre) Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,f} : 4.0$
LPN (Femto-hücre) Güç Tüketimi Eğimi	$\Delta_{P,f} : 8.0$

### 4.3 ENİYİLEME PROBLEMİ ve BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ

Bu kısım için sürekli güç yönetimi (CPM) tasarısı kullanılarak eniyileme problemi düzenlenmektedir. NOMA tekniğinin başarımı, dikgen çoklu erişim (OMA) başarımı ile karşılaştırılmaktadır. OMA'yı tekrar etmek gerekirse, bütün kullanıcıların hizmet görmesi şartıyla birlikte, her RB her hücrede sadece bir kullanıcı tarafından kullanılabilir. Bu koşulun doğası gereği RB sayısı hücredeki kullanıcı sayısından fazla olmalıdır, bir başka deyişle  $1 \leq n \leq M$  için  $N \geq K_n$  olmalıdır, ve dolayısıyla alınan sinyaldeki aynı hücre içindeki kullanıcılar arası girişim yok olacaktır. Adil karşılaştırma için, bulut mimarisi için de bu koşul devam ettirilmiştir, yani hücredeki her kullanıcı için ayrı bir RB tahsis edilmekle birlikte, komşu hücrelerde aynı RB'lerin kullanımına izin verilmektedir.

OMA için kullanıcılar arasında RB tahsisi Algoritma ?? ile verilmektedir:

#### 4.3.1 Enerji Verimliliğinin Enbüyütülmesi

Haberleşme stratejisi buluttaki enerji verimliliğinin enbüyütülmesi olmakla birlikte, sistemde adaleti sağlamak için Jain Adaletliliği, enküçük kullanıcı veri hızı ve erişim noktalarının azami güç kısıtları mevcuttur.

Sürekli Güç Yönetimi (CPM) için eniyileme problemi

$$\begin{aligned}
 \max_{\alpha} \quad & \mu_{EE}(\alpha) \\
 \text{s.t.} \quad & \alpha \in [0, 1]^{MLK_tN}, \\
 & \left[ \bigoplus_{i=1}^N \mathbf{1}_{K_t}^T \left( \bigoplus_{n=1}^M \mathbf{A}_{K_n}^i \right) \otimes \mathbf{I}_{ML} \right] \alpha \leq \mathbf{1}_{ML}, \\
 & c_{MC} \left( \mathbf{I}_{K_tM} \otimes \left[ \mathbf{1}_{L_r}^T \quad \mathbf{0}_{L_f}^T \right] \alpha \right) \circ \left( \mathbf{I}_{K_tM} \otimes \left[ \mathbf{0}_{L_r}^T \quad \mathbf{1}_{L_f}^T \right] \alpha \right) = \mathbf{0}_{K_t} \\
 & r_k(\alpha) \geq r_0, \quad \forall k, \\
 & J(\alpha) \geq J_0
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

olarak düzenlenmektedir, burada birinci kısıt erişim noktalarının her bir kullanıcıya her RB üzerinde ayırdığı iletim gücünü kısıtlamaktadır. İkinci kısıt ise her erişim noktasının bütün bantgenişliği boyunca bütün kullanıcılara harcayabileceği toplam iletim gücünü kendi güç sınırı ile sınırlamaktadır. Her erişim noktası için bulunan bu kısıt,

açık olarak  $1 \leq \ell \leq ML$  için  $\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_t} \alpha_{\ell ki} \leq 1$  şeklinde yazılmaktadır.

$\ominus$  yatay birleştirme operatörünü,  $\otimes$  Kronecker çarpımını,  $\oplus$  doğrudan toplam operatörünü,  $\mathbf{I}_{ML}$  ve  $\mathbf{I}_{K_t}$ , sırasıyla  $(ML \times ML)$  ve  $(K_t \times K_t)$  boyutlarında birim matrisleri,  $\mathbf{1}_{K_t}$  ve  $\mathbf{1}_{ML}$ , sırasıyla  $(K_t \times 1)$  ve  $(ML \times 1)$  boyutlarında bir vektörlerini temsil etmektedirler. Kaynak tahsisi matrisi OMA için  $\mathbf{A}_{K_n}^i = \mathbf{S}_{K_n}^{\pi_n(i)}$ , NOMA için  $\mathbf{A}_{K_n}^i = \mathbf{I}_{K_n}$  olacak şekilde seçilmektedir. Burada  $n$ 'inci hücredeki  $i$ 'inci kaynak bloğunu kullanan kullanıcı  $\pi_n(i)$  ile gösterilmektedir. Burada Algoritma ?? ile eniyilenen  $\mathbf{S}_{K_n}^{\pi_n(i)}$ ,  $(K_n \times K_n)$  boyutlarında, sadece  $(\pi_n(i), \pi_n(i))$ 'inci elemanlarının bir, geri kalan elemanlarının sıfır olduğu tek girdi matrisidir. Üçüncü kısıt Çoklu-Bağlantıya izin verilip verilmemesi ile ilgilidir. Eğer  $c_{MC}$  katsayısı sıfır olarak seçilirse kısıtın etkisi kalmamakta ve Çoklu-Bağlantıya izin verilmekte, yani kullanıcılar hem RRH'lere hem de LPN'lere aynı anda bağlanabilmektedirler. Ancak  $c_{MC}$  sıfırdan farklı seçilirse, aldığı değerın büyüklüğüyle doğru orantılı bir şekilde Çoklu-Bağlantıya ceza uygulanmaktadır. Burada  $\circ$  Hadamard çarpımını tanımlar.  $\mathbf{0}_{ML}$  ise  $(ML \times 1)$  boyutunda sıfır vektörü oluşturmaktadır. Bu kısıt

$$c_{MC} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\ell=1}^{L_r} \alpha_{\ell ki} \right) \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\ell=L_r+1}^{L_r+L_f} \alpha_{\ell ki} \right) = 0, \quad \forall k, \quad (4.21)$$

olacak şekilde buluttaki her  $k$  kullanıcısı için daha açık olarak yazılabilir. Son iki kısıt ise sırasıyla kullanıcıların en düşük veri hızını alttan sınırlamakta ve sistem genelinde Jain adaletliliği için kullanılmaktadır. Jain adaletliliği indeksi, eniyileme problemi için

$$J(\alpha) = \frac{\left( \sum_{k=1}^{K_t} r_k(\alpha) \right)^2}{K_t \sum_{k=1}^{K_t} r_k^2(\alpha)} \quad (4.22)$$

olarak düzenlenmektedir.

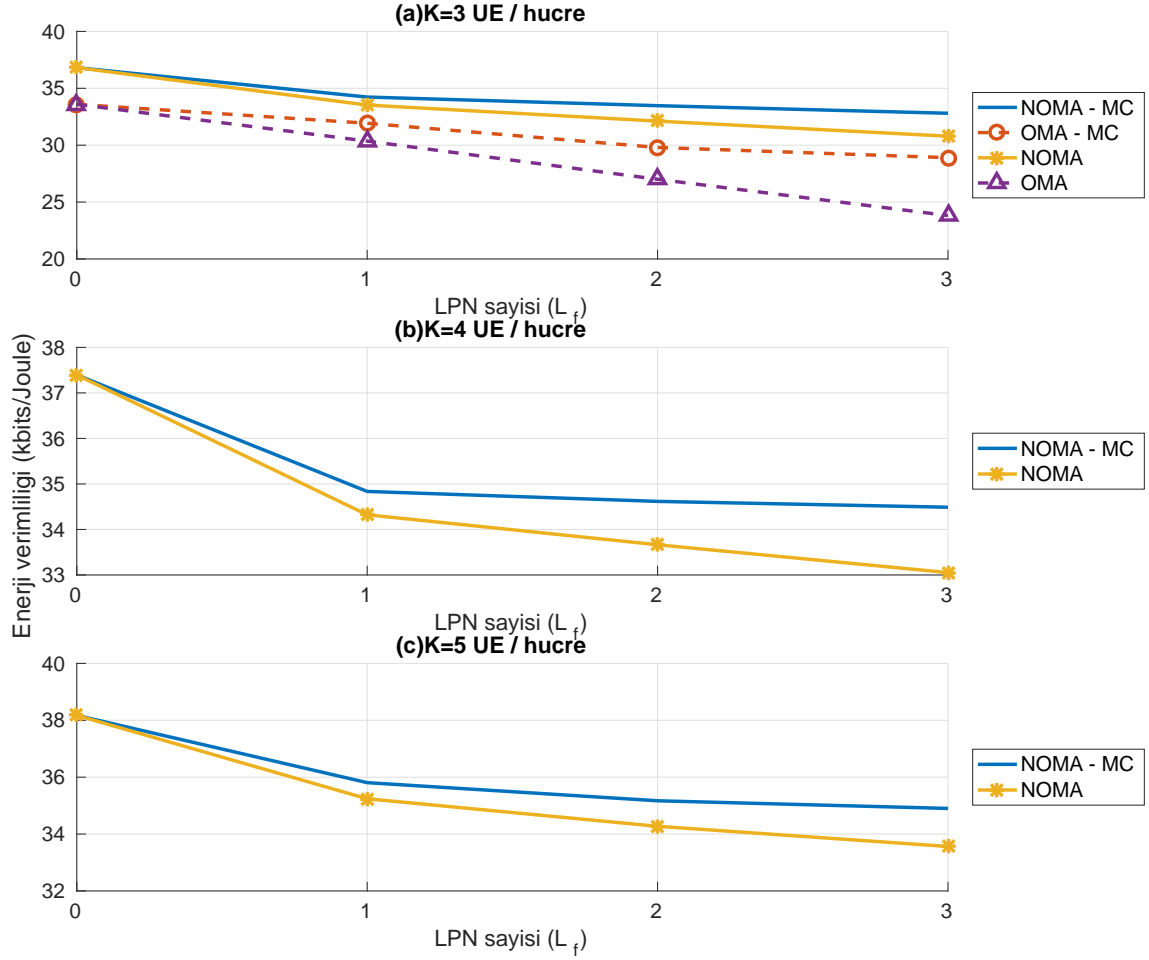


## Başarım Değerlendirmesi

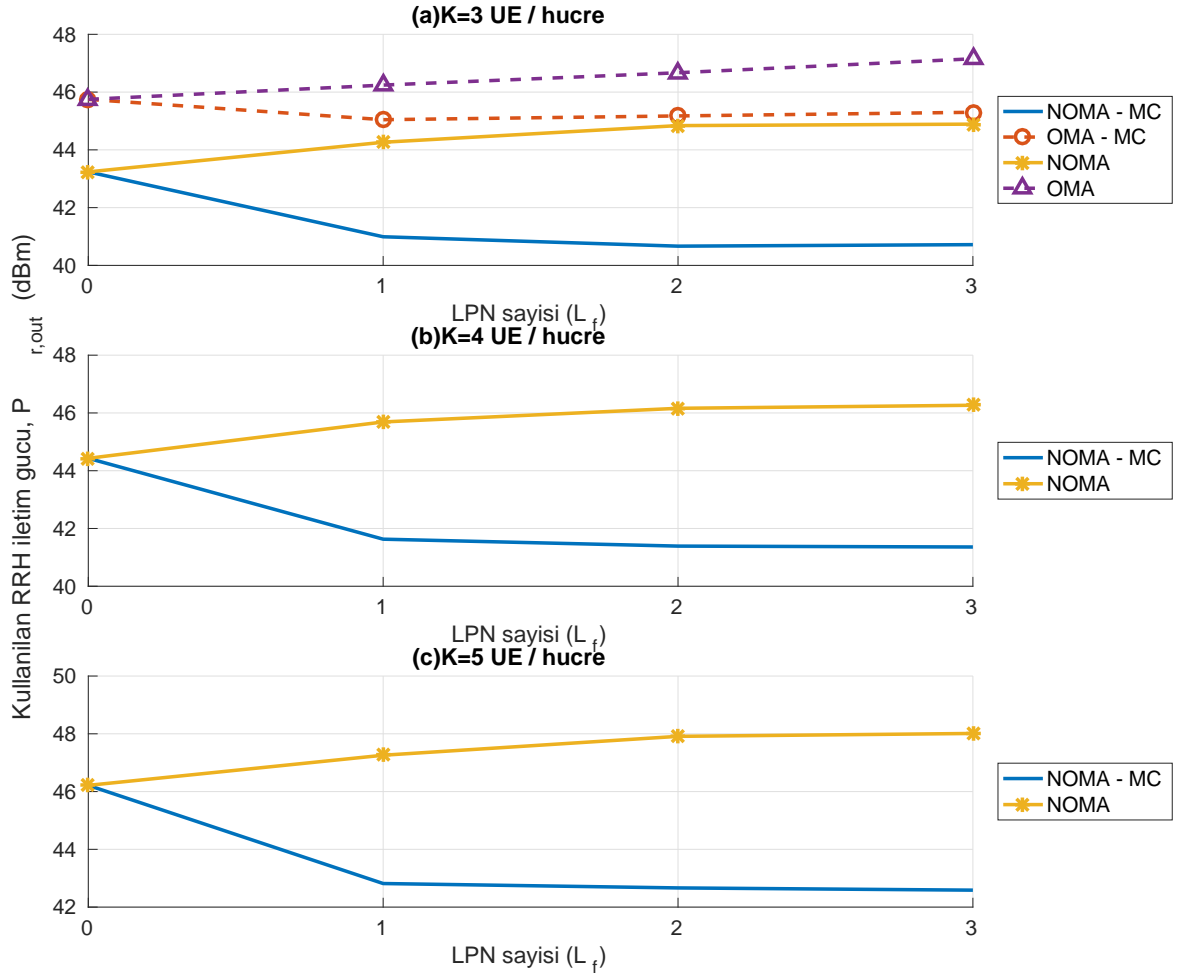
Burada sistem genelinde en düşük veri hızı, Jain adaletliliği ve farklı güç değerlerine sahip erişim noktalarının azami güç kısıtları altında enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü senaryolar incelenmektedir. Küçük hücreler için Femto-hücreler kullanılmaktadır. Sistem incelemesi farklı çoklu erişim modelleri (NOMA, OMA) için ve çoklu bağlantının (MC) aktif olup olmamasına göre ayrıca incelenmektedir. LPN sayısının artırımı genellikle kapsamayı artırmak amaçlıdır, bu çalışmada kapsama başarımı dikkate alınmadan, LPN sayısının ağ fonksiyonları ile birlikte başarımı nasıl etkilediği incelenmektedir. Kullanılan LPN'lerin sürekli aktif olduğu kabul edilmiştir, yani, kullanıcıların bağlanmadığı durumlarda da iletim gücü hariç çalışmaya devam edebilmek için güç harcamaya devam etmektedirler. Şekil 4.1'de  $N = 3$  RB ve hücre başına  $3 \leq K \leq 5$  kullanıcı için, NOMA'nın kullanılıp kullanılmadığı, MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda,  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm azami güç sınırları için,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$  kısıtlarıyla, EE'nin LPN sayısına ( $L_f$ ) göre değişimi incelenmektedir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ise sırasıyla, harcanan RRH ve LPN iletim güçlerini göstermektedir. OMA yöntemi için hücre başına en fazla  $K = N$  kullanıcı desteklenebildiği unutulmamalıdır. Burada  $N = 3$  alınmaktadır.

MC fonksiyonu kullanılmadığında, kullanıcıların servis alabilmek için erişim noktalarından (RRH veya LPN) birini seçmek durumunda oldukları unutulmamalıdır, ve C-RAN mimarisinde kullanıcıların RRH'lere bağlanması tercih edilmektedir. Şekil 4.2'de RRH iletim gücünün MC aktif olduğu duruma kıyasla yüksek olması ve Şekil 4.3'te LPN iletim gücünün MC aktif olmadığı durumda düşmesi bunu doğrulamaktadır. Ancak LPN'lerin iletim gücü haricinde, çalıştığı süre boyunca harcanan diğer güçler dolayısıyla, artan LPN sayısı ile EE başarımı düşmektedir. MC fonksiyonu kullanılmadığı durumda, aktif LPN sayısı ile artan tüketim gücünün EE'de yol açtığı kaybın telafi edilmesi için daha fazla RRH iletim gücü kullanılarak EE enbüyütülmeye çalışılmaktadır; ancak yine de EE için başarımlı kayıplı olmaktadır. Kullanıcı sayısının artması durumunda, RRH iletim gücünün arttığı; ancak LPN sayısının daha fazla artmasıyla bu artış miktarı daha da arttığı gözükmektedir. Burada, merkezi girişim kontrolü altında komşu hücrelerdeki kullanıcılara da yayın yapılması etkilidir. MC fonksiyonu aktif iken RRH iletim gücünden ziyade LPN iletim gücü ile başarımlı

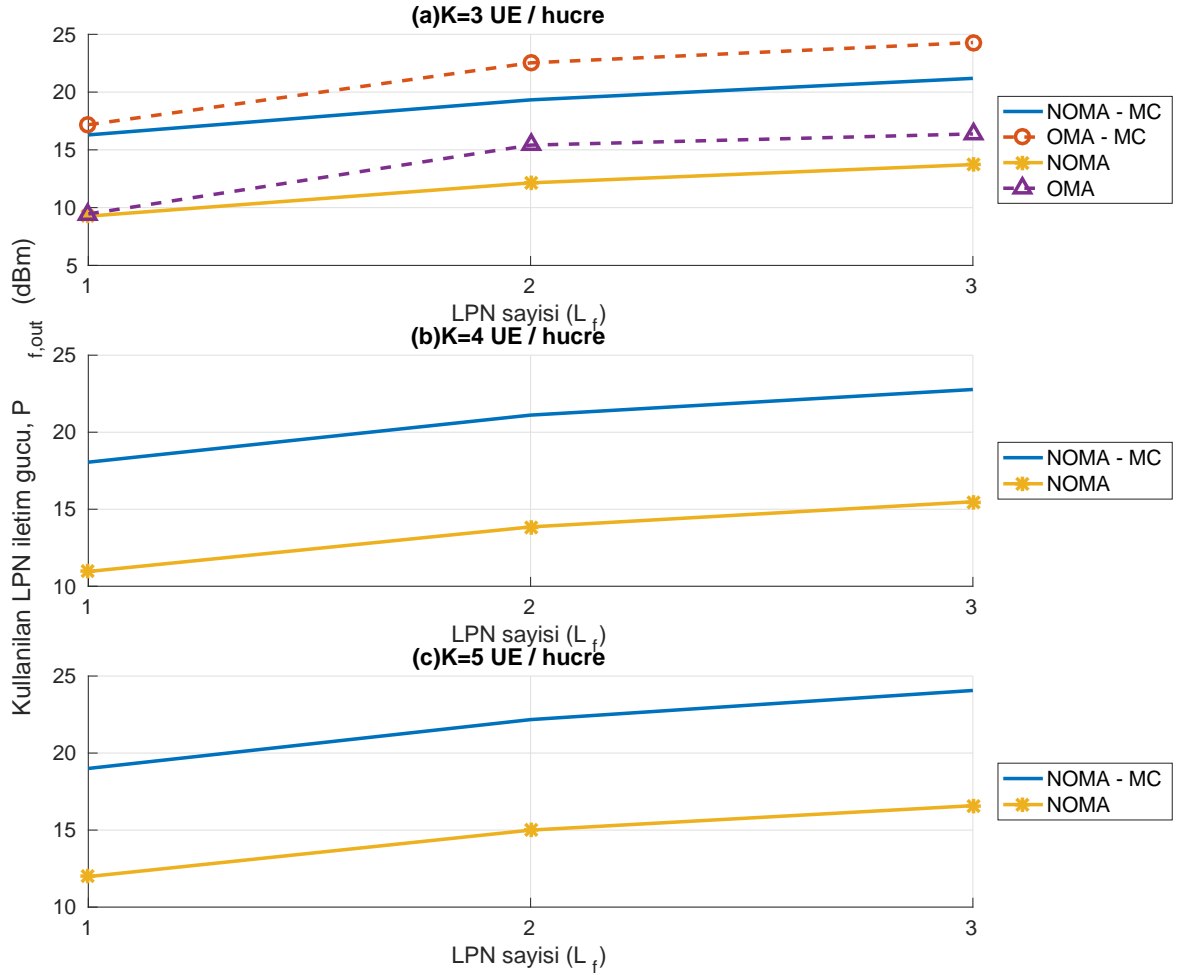
artırılmaya çalışıldığı gözükmektedir. Kullanıcı sayısının artması ile RRH iletim gücündeki (nispeten yüksek değerlerdeki) ufak değişimlerin de büyüklüğü artmaktadır. MC fonksiyonu aktif iken LPN'lerin de enbüyük fayda ile kullanımı dikkat çekmektedir; ancak MC'nin kullanılmamasıyla LPN güçleri de düşmektedir. Bunlarla birlikte, MC kullanılması başarımların artışı sağlasa da, NOMA'nın katkısının çok daha yüksek olduğu gözükmektedir. Her durum için, LPN eklenmesiyle kapsama artırılmış olsa da, erişilebilir EE değeri LPN'siz durumdaki değere ulaşamamaktadır, burada, eklenen LPN'ler anten çeşitlemesi ve fazladan erişim gücü sunsa da, BS'lerde önemli miktarda iletim harici güç tüketilmesi ile EE başarımlarını düşmektedir.



Şekil 4.1. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRM ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda enerji verimliliğinin (EE) LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .



Şekil 4.2. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda kullanılan RRH iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .



Şekil 4.3. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K \in [3, 5]$  kullanıcı ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRM ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda kullanılan LPN iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a)  $K = 3$ , (b)  $K = 4$ , (c)  $K = 5$ .

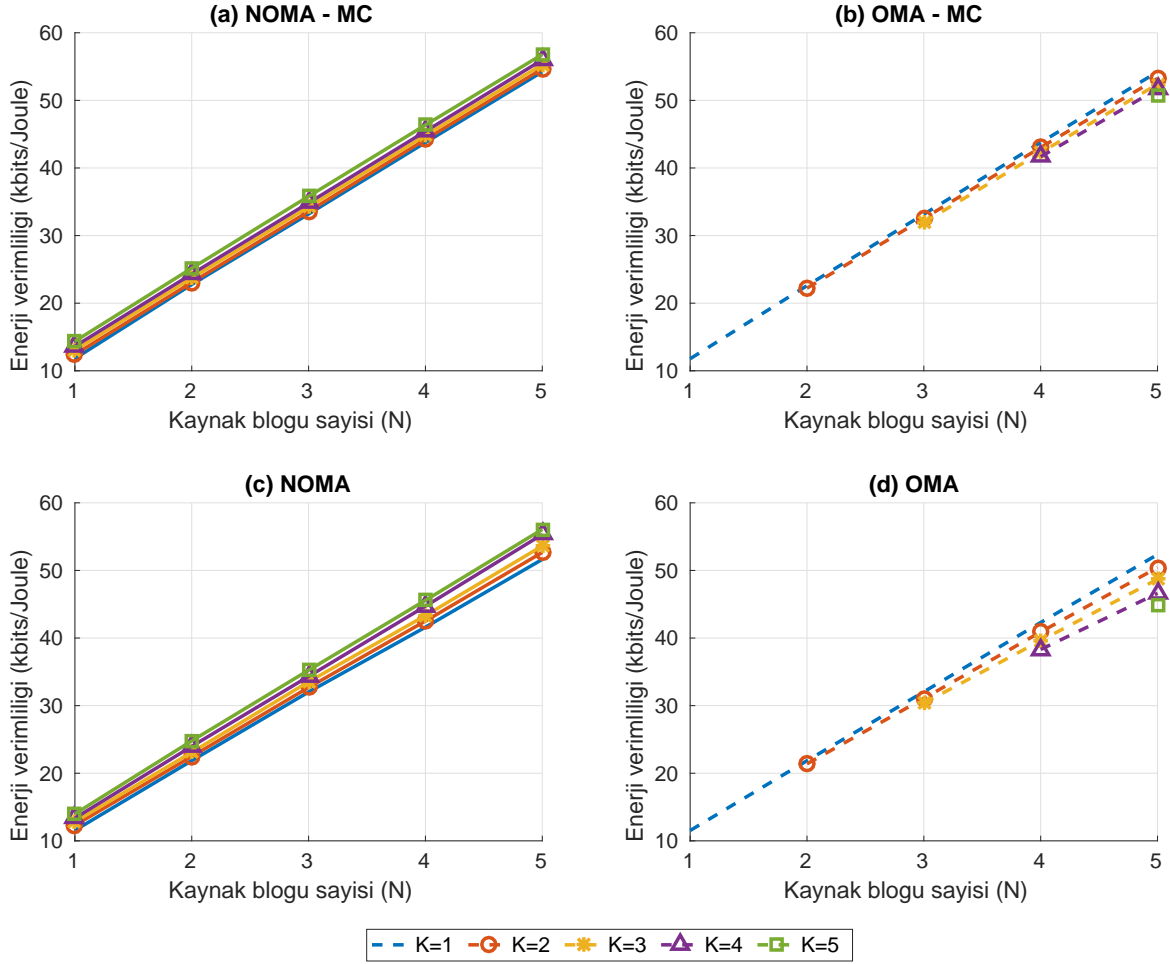
Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 sistem genelinde EE'nin ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütüldüğü problemde,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$ ,  $L_f = 1$  LPN ve  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm için, NOMA ve MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, enerji verimliliğinin (EE), izgesel verimliliğin (SE), enerji izgesel verimliliğinin (ESE), RRH ve LPN'lerin harcadığı toplam iletim güçlerinin RB ve hücre başına kullanıcı sayısı ile değişimi incelenmektedir.

EE başarımı her NOMA, OMA ve MC kombinasyonu için RB sayısı ile paralel olarak artmaktadır. DDRAN-cRRM başarımının aksine artış hızı yüksek RB sayıları için de değişmemektedir. Kısıtların daha da sıkılaşmasına rağmen CRAN ile gelen fazladan serbestlik derecesi başarımın sürekli artmasını sağlamaktadır. NOMA tekniğinin kullanıldığı durumda kullanıcı sayısının artmasıyla EE başarımının yükseldiği; OMA tekniğinin kullanıldığı durumda ise artan kullanıcı sayısı ile başarımın düştüğü gözükmemektedir. NOMA için EE başarımı çok net olmamakla birlikte, kullanıcı çeşitlenmesinin etkisi ESE başarım grafiğinde de görülebilmektedir. ESE başarımının kullanıcı sayısına bağlı değişimi, EE başarımınkiyle aynı doğrultudadır.

EE'nin enbüyütüldüğü bu problemde, izgesel verimlilik (SE) başarımı, RB sayısının artmasıyla her durum için düşmekte, kullanıcı sayısı ( $K$ ) ile paralel olarak artmaktadır. NOMA yönteminde, DDRAN mimarisinde cRRM ile, RB sayısı arttıkça  $\frac{K}{N} = 1$  için SE başarımının yaklaşık olarak aynı değerleri aldığı gözlemlenmiş; CRAN mimarisi ile  $\frac{K}{N} = 1$  için artan RB sayısı ile ESE başarımının da SE başarımı gibi benzer değerler aldığı gözlemlenmektedir. Burada bulut mimari ile iletim gücünün de daha verimli kullanıldığı kullanıcılara benzer verimler oluşturacak şekilde dağıtıldığı görülmektedir. NOMA ile kullanıcı çeşitlenmesinden daha fazla faydalanılmakta; ancak OMA yönteminde  $K$  arttıkça SE başarımı azalmaktadır.  $\frac{K}{N} = 1$  için artan RB sayısı ile SE başarımı azalmaktadır. NOMA tekniği kullanıcılara bütün izgeyi kullanma izni vermesine rağmen hücre ve RB başına kullanıcı sayısına göre başarımı değişmektedir. Bu sebeple (EE'nin eniyileştirildiği durumda) SE'nin ve ESE'nin  $\frac{K}{N}$  değerine göre nasıl değiştiği de incelenmektedir. Burada  $\frac{K}{N}$  bir değişken olmamakla birlikte, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'daki verilerden,  $\frac{K}{N}$ 'e göre SE ve ESE değerleri bulunarak, eşit  $\frac{K}{N}$  değerleri için karşılık gelen SE ve ESE değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu

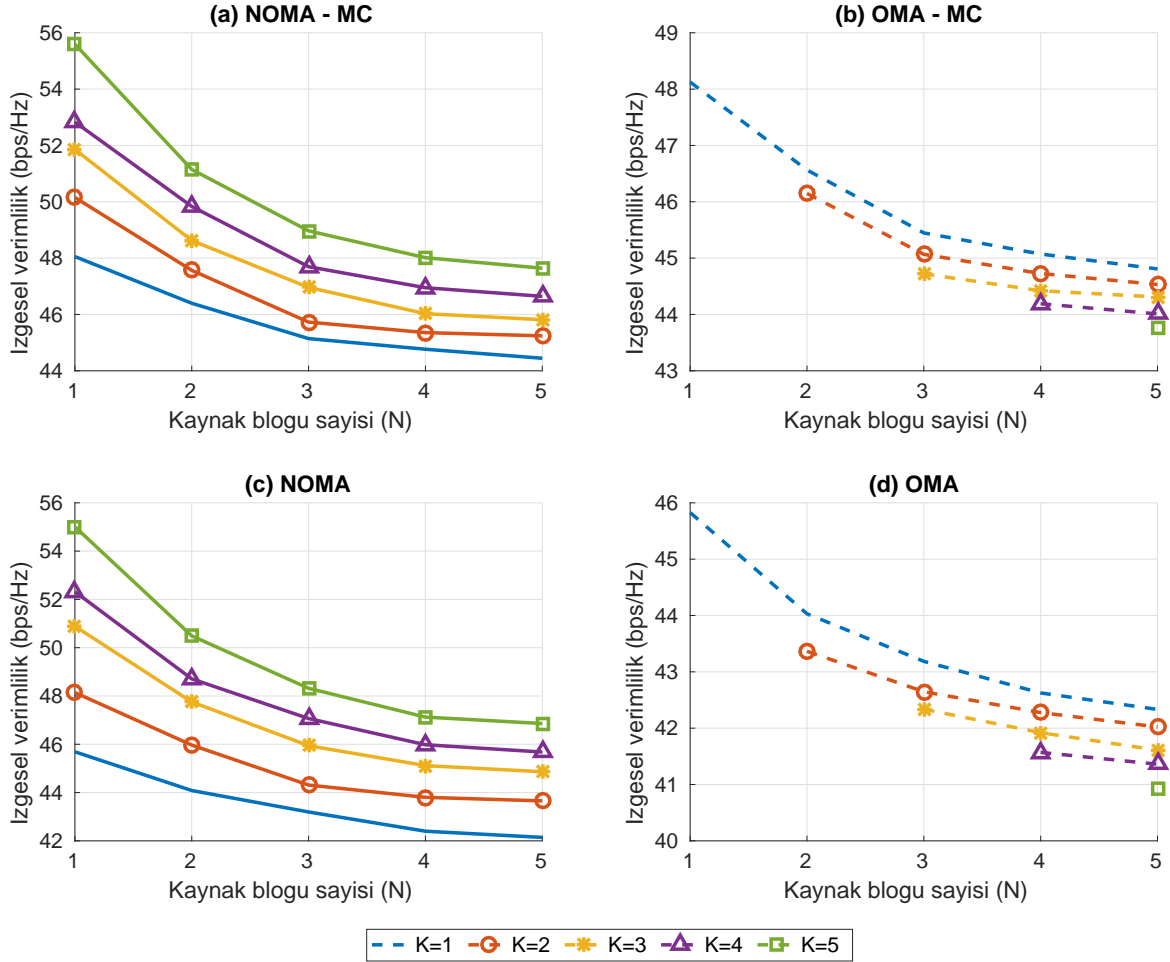
başarım  $1 \leq N \leq 5$  RB için Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Buradaki  $N$  ve  $K$  sayısı sınırlı olduğu için,  $\frac{K}{N}$  değerleri de sınırlıdır, ve dolayısıyla, örneklem seti her  $\frac{K}{N}$  değeri için aynı değildir. Bu sebeple, pürüzsüz bir eğri çıkmamaktadır. NOMA'nın tercih edildiği senaryoda, RB sayısı arttıkça RB'lerin daha verimli kullanılabildiği gözlemlenmektedir. Bunun yanısıra, ESE'nin RB başına kullanıcı sayısı değişimi daha pürüzsüz ve doğrusal bir davranış sergilemektedir.

Harcanan iletim güçleri incelendiğinde, MC kullanılmadığı durumda, RRH'lerin tercih edildiği; LPN güçlerinin sıfıra çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. RB sayısı arttıkça, kullanılan RRH iletim gücü artmakta; ancak bu artış yüksek RB sayıları için oldukça düşük kalmaktadır. Aynı şekilde, kullanıcı çeşitlenmesi de kullanılan RRH iletim gücünü artırmakta, bununla birlikte RB sayısının artması ile RRH iletim gücü (RB sayısının artmasına rağmen) daha fazla artmaktadır, yani, az kullanıcılu durumlarda, RB sayısı RRH iletim gücünü daha az etkilemektedir.

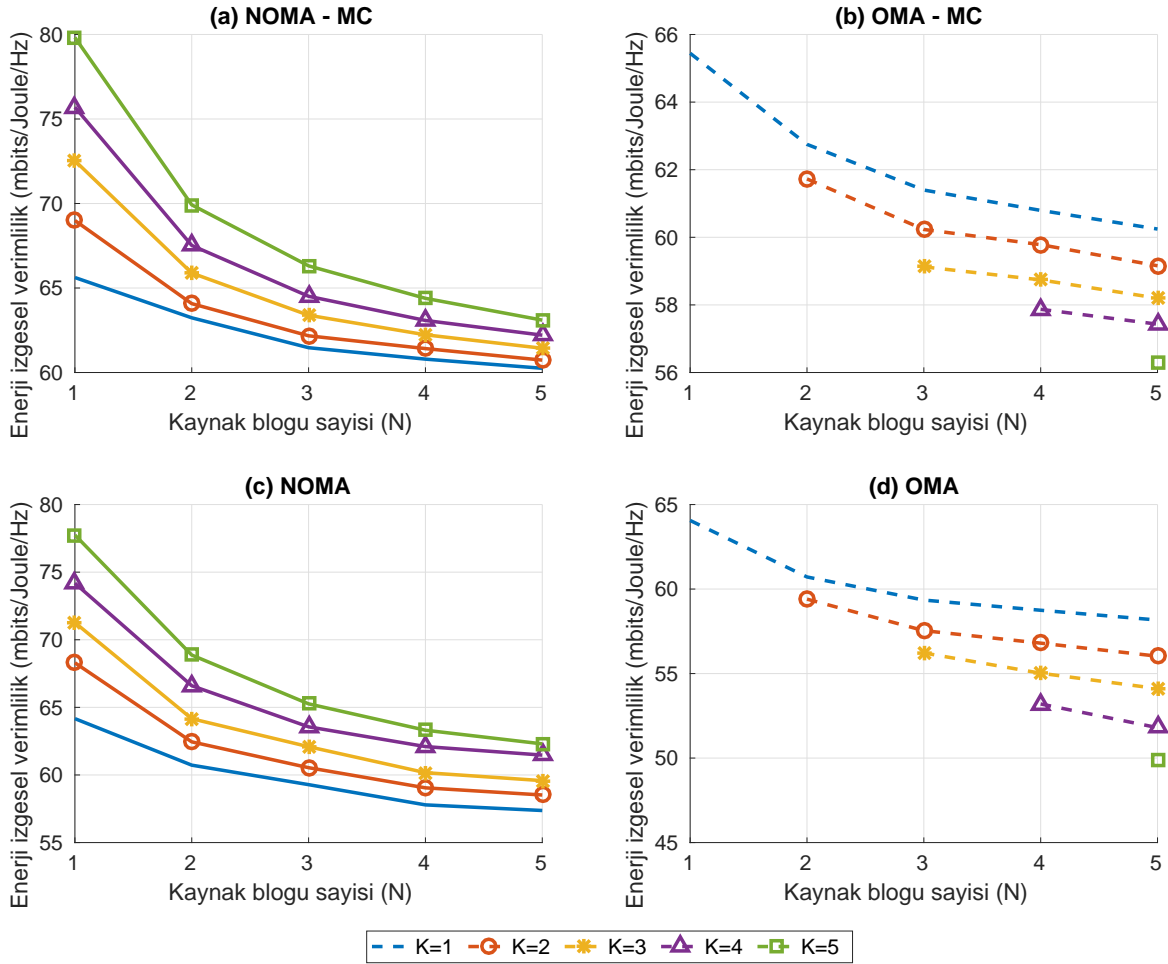


Şekil 4.4. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

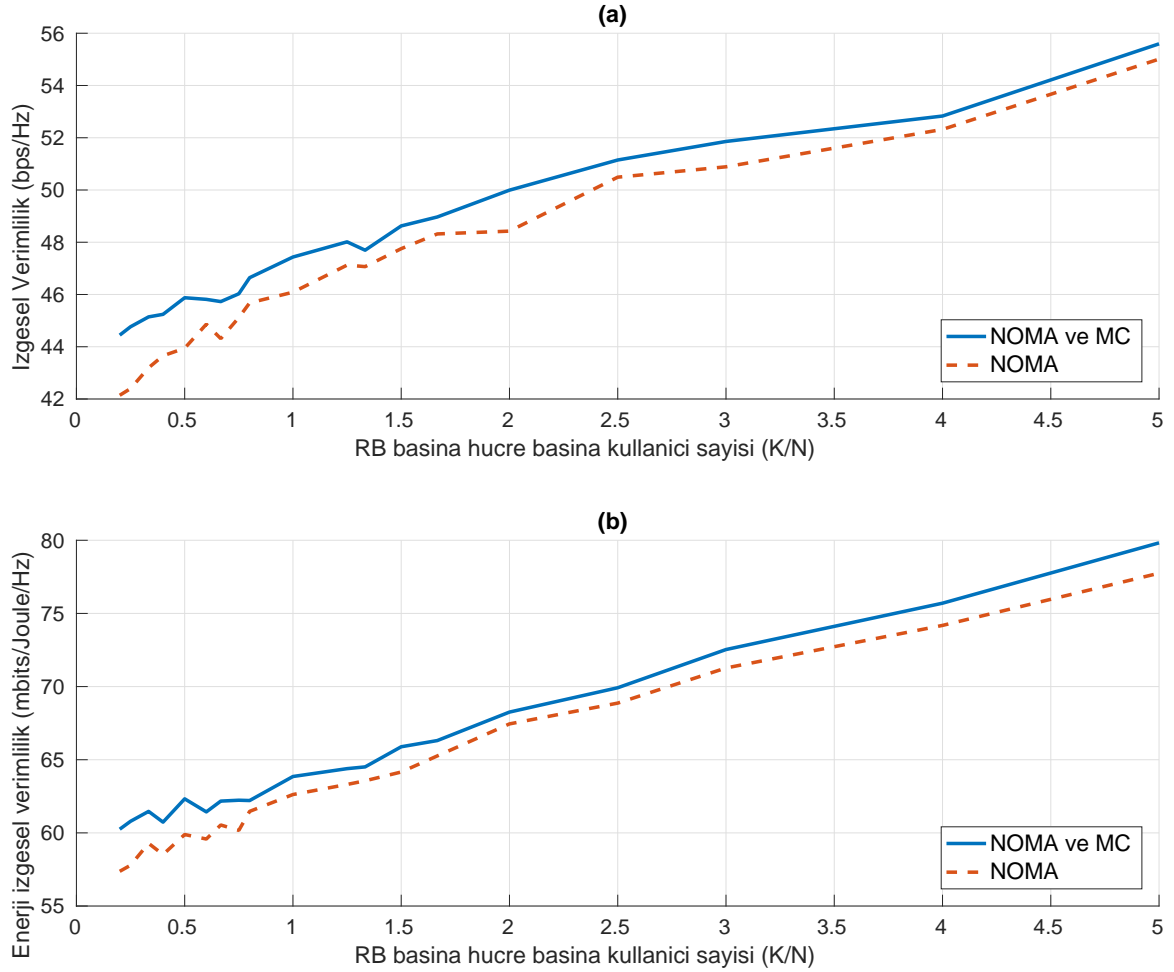




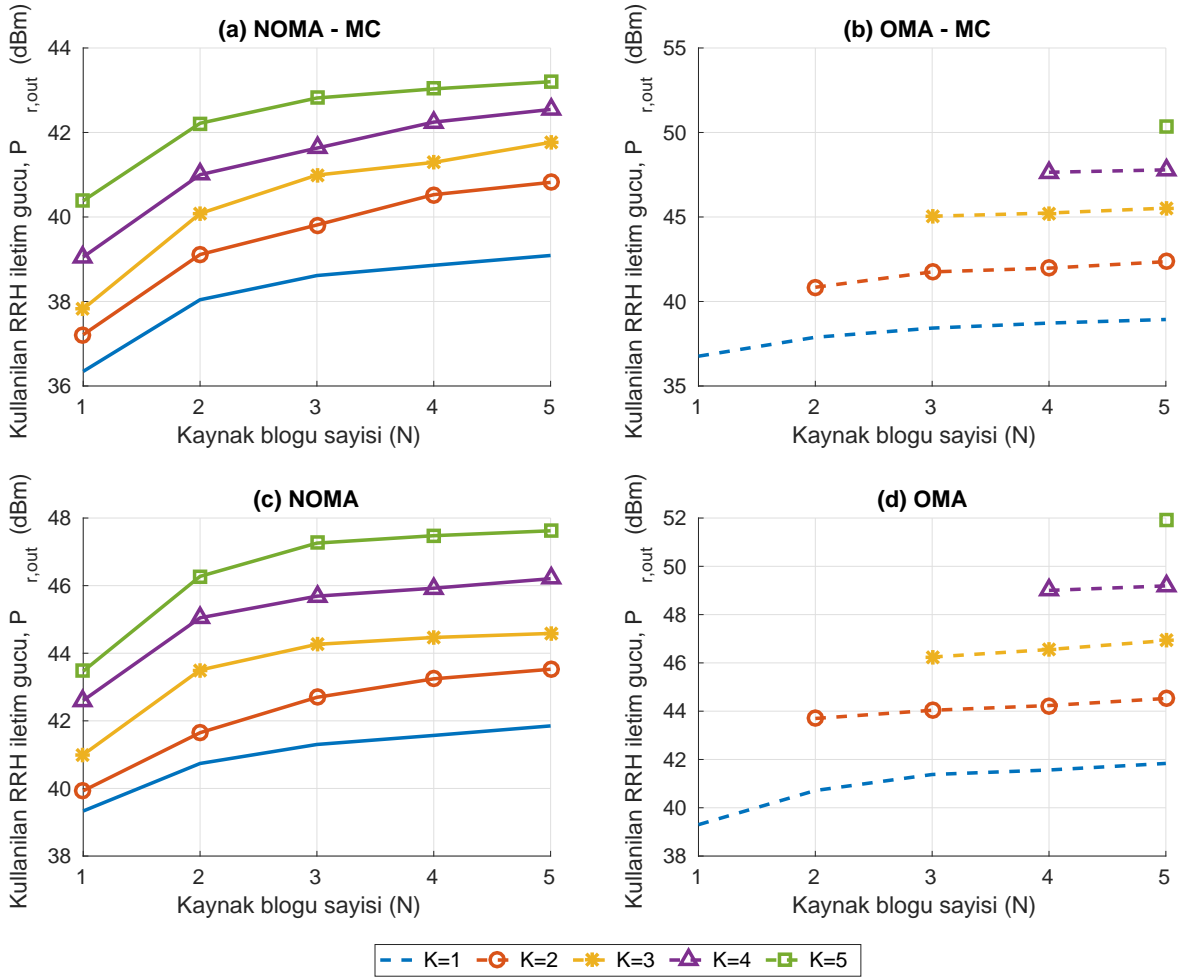
Şekil 4.5. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



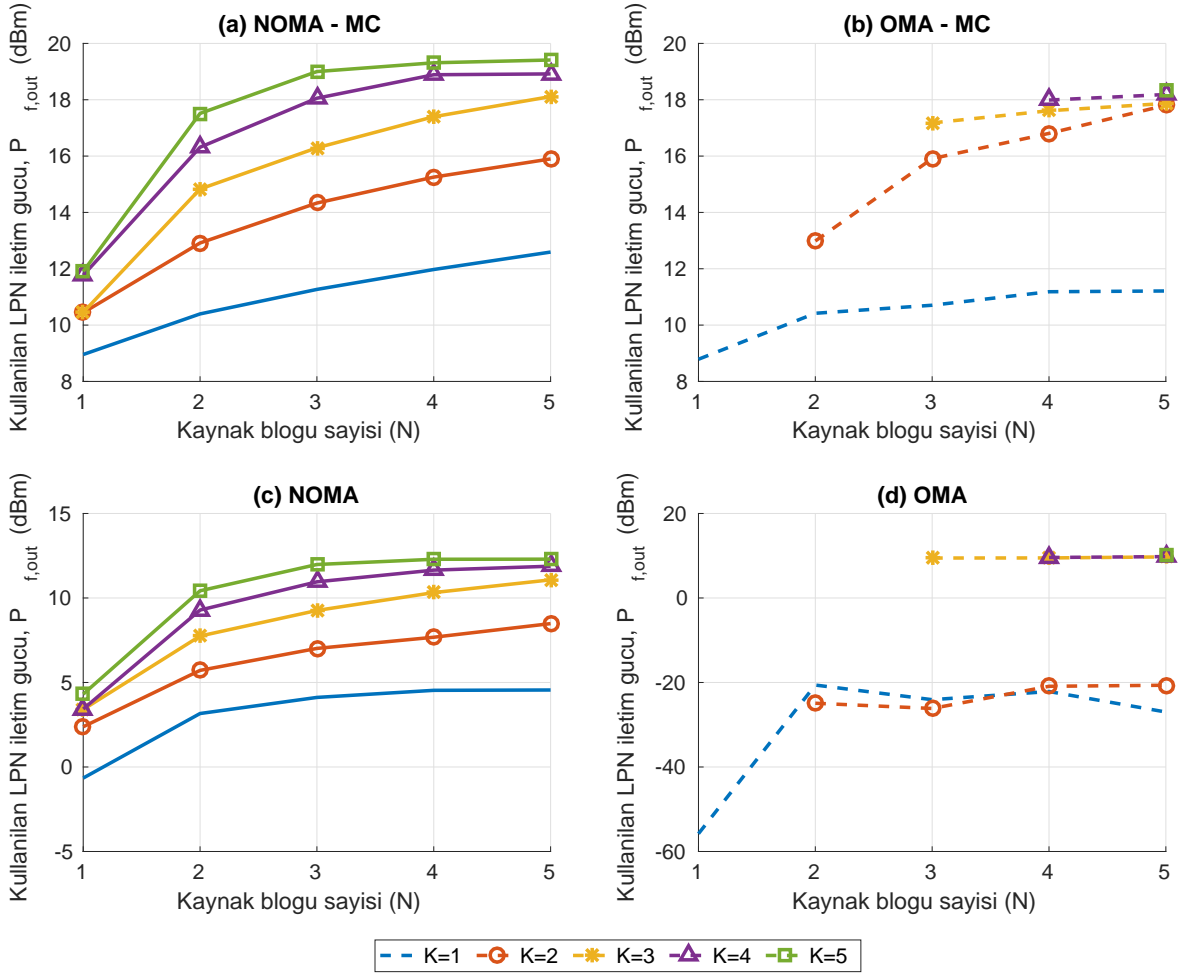
Şekil 4.6. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 4.7. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA'nın kullanıldığı, MC fonksiyonunun aktif olup olmadığı iki ayrı durum için izgesel verimliliğin (SE) ve enerji izgesel verimliliğin (ESE), her hücrede RB başına düşen kullanıcı sayısına ( $K/N$ ) göre değişimi incelenmektedir.



Şekil 4.8. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 4.9. Bulut mimaride (C-RAN) merkezi RRM (cRRM) uygulanan,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

#### 4.4 SONUÇLAR

Bu Bölümde, çok kullanıcılı, çok taşıyıcı ve çoklu hücre yapısına sahip topak tek bir bulut (C-RAN) mimari olarak düşünülerek, cRRM uygulanmaktadır. Bölümler 2 ve 3'ün aksine, kullanıcılar iletişim kurmak için sadece bulunduğu hücrenin erişim noktaları ile sınırlandırılmamış; ve bütün topak bir bulut olarak düşünüldüğü için bütün erişim noktalarından sinyal alabilmektedir. CoMP ve MC fonksiyonları merkezileştirilmiştir ve koordinasyon ağıdaki bütün erişim noktaları üzerinden merkezi kontrolör tarafından yapılmaktadır. Bu bölümde adaletlilik, BS azami güç, enküçük veri hızı gibi kısıtlar altında enerji verimliliği eniyileştirilmektedir. Sürekli güç yönetimi (CPM) tasarısı kullanılarak eniyileme problemi çözülmektedir. NOMA tekniğinin başarımı, OMA başarımı ile karşılaştırılmaktadır. OMA tasarısında, adil karşılaştırma için, bulut mimarisi için de hücredeki her kullanıcı için ayrı bir RB tahsis edilmekle birlikte, komşu hücrelerde aynı RB'lerin kullanımına izin verilmektedir. Kullanıcıların özdeş olmayan erişim noktalarına aynı anda bağlanmasına olanak sağlayan MC fonksiyonunun etkileri, NOMA ve OMA fonksiyonları ile birlikte incelenmektedir.

Sistem genelinde en düşük veri hızı, Jain adaletliliği ve farklı güç değerlerine sahip erişim noktalarının azami güç kısıtları altında enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü senaryolar için EE, SE, ESE başarımları ve kullanılan RRH ve LPN iletim güçleri, aktif LPN sayısına ve kullanılabilir RB sayısına göre incelenmektedir. Kullanılan LPN'lerin sürekli aktif olduğu kabul edildiği için, kullanıcıların bağlanmadığı durumlarda da iletim gücü hariç çalışmaya devam edebilmek için güç harcamaya devam etmektedirle bu da EE başarımını genel olarak düşürmektedir. MC fonksiyonunun aktif olmadığı durumlarda, kullanıcıların RRH'leri tercih ettiği gözlemlenmiştir. MC fonksiyonu ile başarımların artışı elde edilse de, NOMA'nın katkısının çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

EE başarımı her NOMA, OMA ve MC kombinasyonu için RB sayısı ile paralel olarak artmaktadır. DDRAN-cRRM başarımının aksine artış hızı yüksek RB sayıları için de korunmaktadır. CRAN ile gelen fazladan serbestlik derecesi başarımın sürekli artmasını sağlamaktadır. NOMA tekniğinin kullanıldığı durumda kullanıcı sayısının artmasıyla EE başarımının arttığı; OMA tekniğinin kullanıldığı durumda ise artan kullanıcı sayısı ile başarımın düştüğü gözlemlenmiştir. Kullanıcı sayısına bağlı bu

başarım değişimi, ESE çizgesinde daha net gözükmeştir. EE'nin enbüyütüldüğü bu problemde, izgesel verimlilik (SE) başarımı, RB sayısının artmasıyla her durum için düşmekte, kullanıcı sayısı ( $K$ ) ile paralel olarak artmaktadır. NOMA yönteminde, CRAN mimarisi ile her kullanıcıya 1 RB tahsis edildiği durumda ESE ve SE başarımlarının her RB değeri için benzer başarımlar alındığı gözlemlenmektedir. NOMA tekniği kullanıcılara bütün izgeyi kullanma izni vermesine rağmen hücre ve RB başına kullanıcı sayısına göre başarımın değiştiği, NOMA'nın tercih edildiği incelenen senaryoda, RB sayısı arttıkça RB'lerin daha verimli kullanılabildiği gözlemlenmektedir. NOMA ile kullanıcı çeşitlemesinden daha fazla faydalanılmakta; ancak OMA yönteminde  $K$  arttıkça SE başarımı azalmaktadır. Aynı şekilde  $\frac{K}{N} = 1$  için artan RB sayısı ile SE başarımı da azalmaktadır. RB sayısı arttıkça, kullanılan RRH iletim gücü artmaktadır; ancak bu artış yüksek RB sayıları için oldukça düşük kalmaktadır. Yine aynı şekilde, kullanıcı sayısının artması da kullanılan RRH iletim gücünü artırmaktadır, bununla birlikte düşük kullanıcılı durumlarda, RB sayısı RRH iletim gücünü daha az etkilemektedir.

## 5. RAN MİMARİLERİ VE RRM KOORDİNASYON SEVİYELERİNİN BAŞARIM KARŞILAŞTIRMALARI

Bölüm 2’de, RRM ve ICIC gibi ağ fonksiyonlarının merkezi (cRRM) olarak, CoMP gibi ağ fonksiyonlarının ise dağıtık olarak kullanıldığı DD-RAN (dinamik dağıtık RAN) mimarisi incelenmekte, Bölüm 3’te, D-RAN mimarisinde, her hücrede CoMP, ICIC ve RRM’in dağıtık (dRRM) ve merkezi olmayan (decRRM) bir şekilde yapıldığı senaryolar incelenmekte, Bölüm 4’te, C-RAN (bulut RAN) mimarisi ile ağ fonksiyonlarının merkezi olarak kullanıldığı, merkezi sinyal işleme ile kazanılan çeşitlemeden faydalandığı sistem mimarisi incelenmektedir. Basitten karmaşığa doğru çeşitli senaryolarda, farklı maliyet işlevleri ve çeşitli kısıtlar altında (örn., azami güç, enküçük veri hızı ve adalet) RRM problemleri irdelenmektedir.

Bu bölümde, yukarıda değinilen mimariler ve RRM koordinasyon seviyeleri için,  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtları ile, topaktaki enerji verimliliğinin ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütüldüğü senaryolar karşılaştırılmaktadır. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, ve problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki sistem başarımının, çeşitli kullanıcı sayıları, RB ve aktif olarak kullanılan LPN sayılarına göre değişimi incelenmektedir. Merkezi olmayan RRM için komşu hücreden gelen girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir.

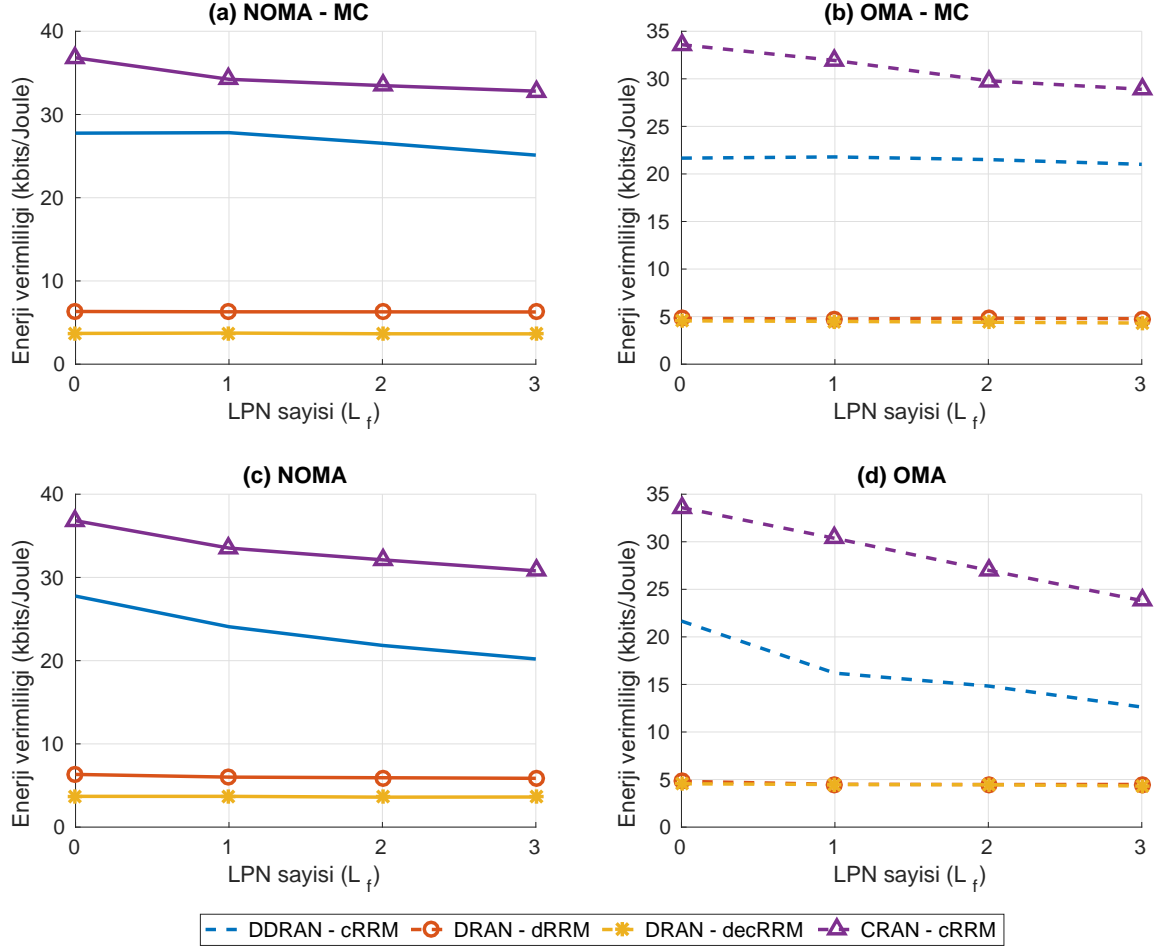
Şekil 5.1’de  $N = 3$  RB ve hücre başına  $K = 3$  kullanıcı için, NOMA’nın ve MC’nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, EE’nin LPN sayısına ( $L_f$ ) göre değişimi incelenmektedir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 ise sırasıyla, harcanan RRH ve LPN iletim güçlerini göstermektedir.

Enbüyük EE başarımı, en yüksek serbestlik derecesine sahip olan C-RAN mimarisinde cRRM uygulandığı durumda elde edilmekte, daha sonra DD-RAN ve cRRM yönetimi gelmektedir. Önerilen dağıtık RRM algoritması ile yeteri kadar iyi başarım alınamamakta ve merkezi olmayan RRM ile benzer sonuçlar elde edilmektedir. Buradan BS’ler arasındaki bilgi paylaşımı ve koordinasyonun, merkezi RRM’in başarım

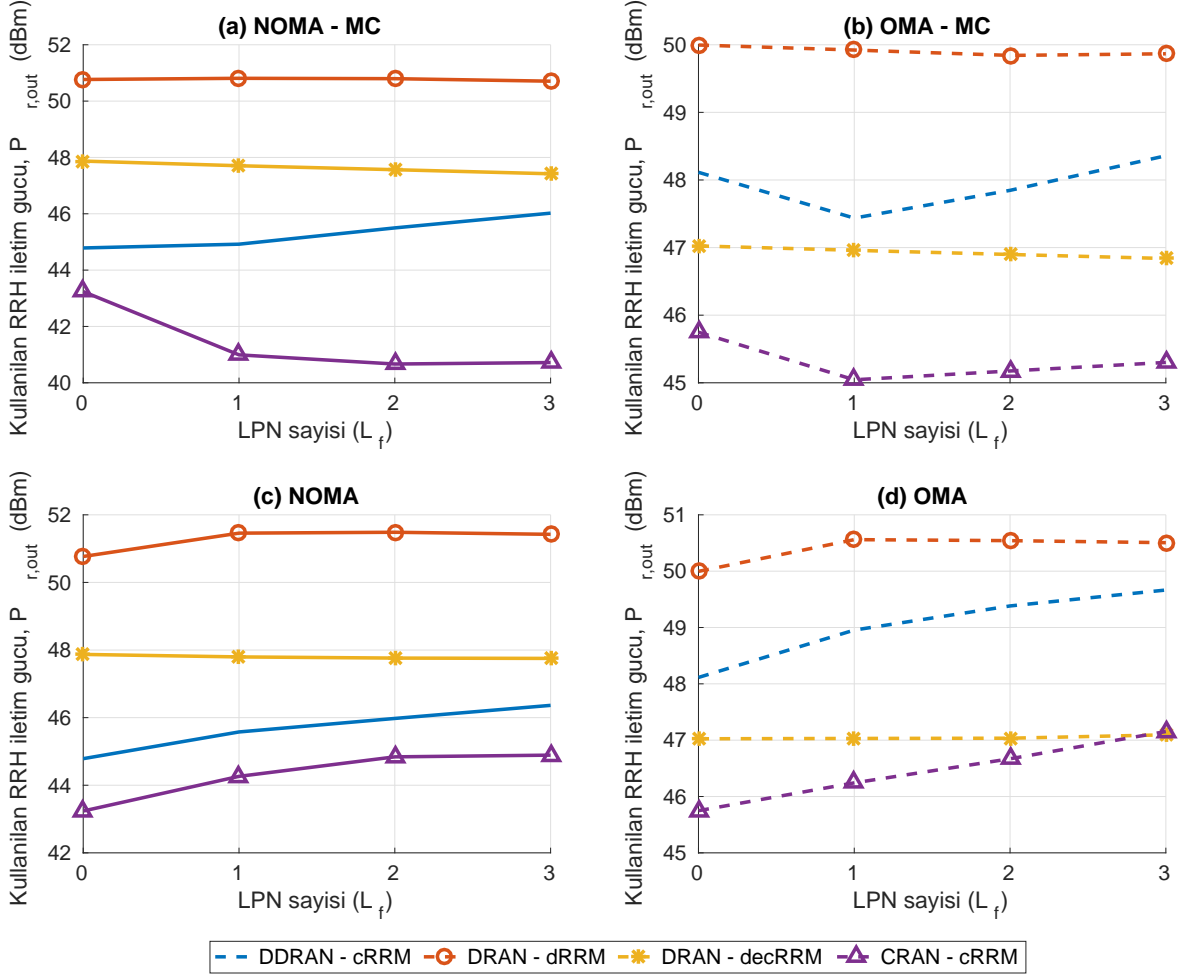


için önemi görülebilmektedir.

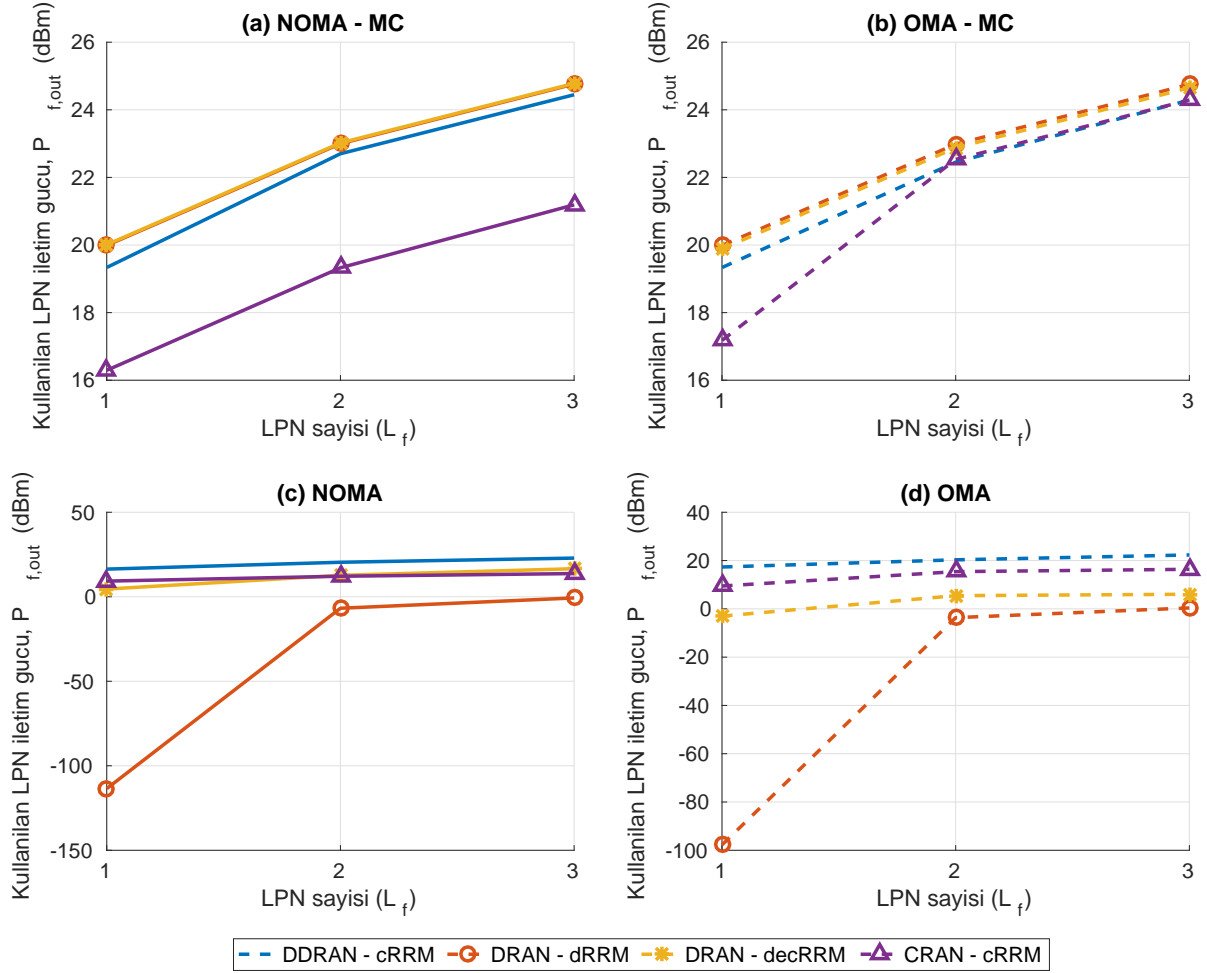
Kullanılan RRH iletim güçleri karşılaştırıldığında ise en az güç kullanımının yine C-RAN mimarisinde olduğu gözlemlenmektedir. NOMA ile cRRM birlikte kullanıldığında en az iletim gücü kullanılırken, OMA kullanıldığında ise merkezi decRRM ile daha az güç tüketilmektedir, ancak unutulmamalıdır ki decRRM ile en kötü EE başarımı elde edilmektedir. MC fonksiyonu aktif olmadığında, aktif LPN arttıkça RRH iletim gücü de genellikle artmaktadır. Bununla birlikte, MC aktif olduğunda, C-RAN mimarisinde fazladan anten çeşitlemesi, MC ile birlikte kullanılan RRH iletim gücünü düşürmektedir. dRRM ve decRRM için, MC aktif değilken kullanılan LPN iletim güçleri genellikle düşüktür, bir başka deyişle LPN'ler pek tercih edilmemektedir. Ancak MC aktif olduğunda neredeyse LPN'ler bütün güçleriyle iletim yapmaya başlanırlar.



Şekil 5.1.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı,  $N = 3$  RB ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı farklı durumlarda enerji verimliliğinin (EE) LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 5.2.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı,  $N = 3$  RB ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı farklı durumlarda kullanılan RRH iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



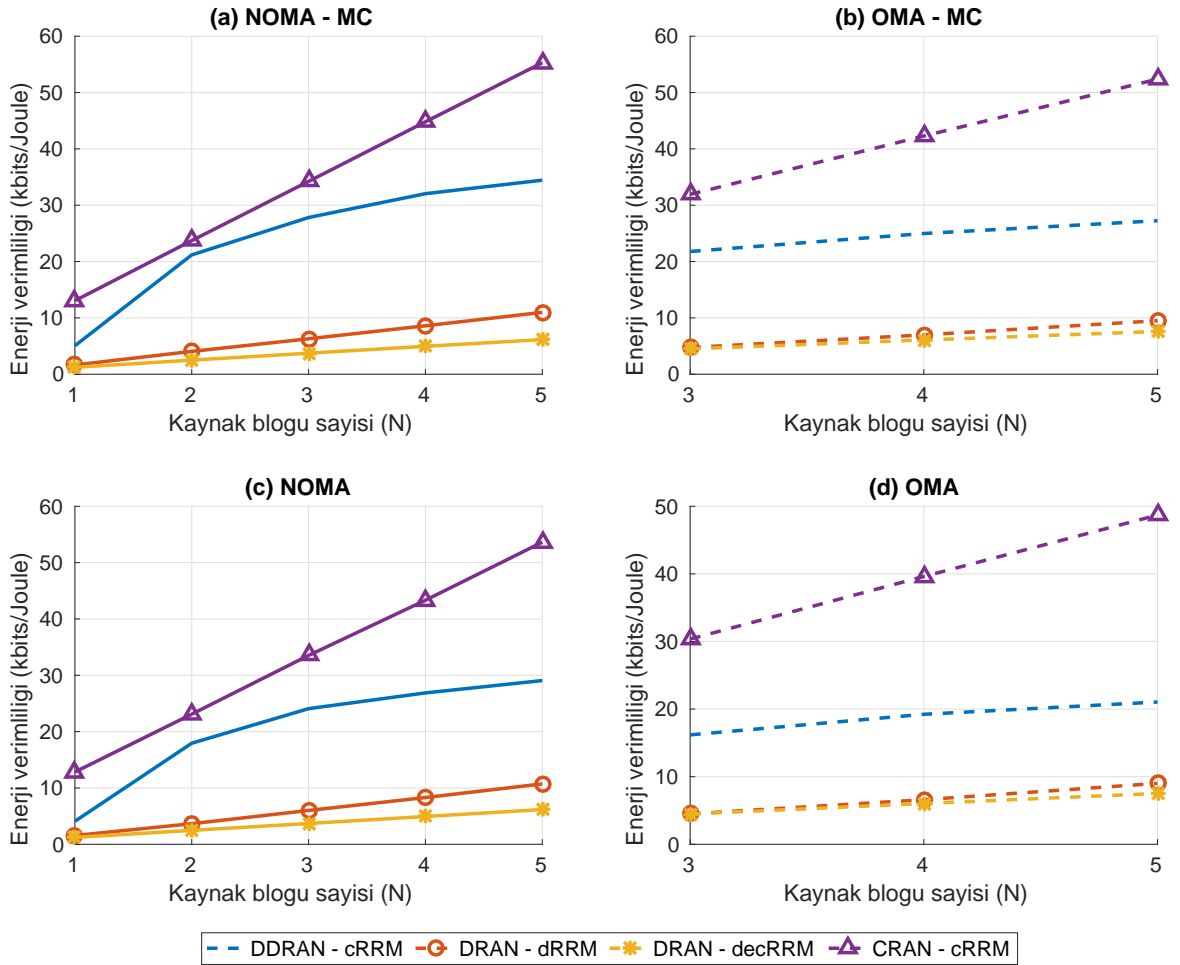
Şekil 5.3.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve  $N = 3$  taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile, hücre başına  $K = 3$  kullanıcı,  $N = 3$  RB ve  $L_f \in [0, 3]$  LPN için topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu ve olmadığı farklı durumlarda kullanılan LPN iletim gücünün, LPN (femto-hücre) sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 sistem genelinde EE'nin ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütüldüğü problemde,  $r_0 = 0.1$  Mbps,  $J_0 = 0.7$ ,  $L_f = 1$  LPN ve  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm için, NOMA ve MC'nin aktif olup olmadığı farklı durumlarda, toplam enerji verimliliğinin (EE), izgesel verimliliğin (SE), enerji izgesel verimliliğinin (ESE), RRH ve LPN'lerin harcadığı toplam iletim güçlerinin RB ve hücre başına kullanıcı sayısı ile değişimi, farklı RAN mimarileri ve RRM koordinasyon seviyeleri için incelenmektedir. OMA yönteminde  $N \geq K$  olacak şekilde kullanıcı sayısı desteklenemediği için  $3 \leq N \leq 5$  RB için irdelenmektedir.

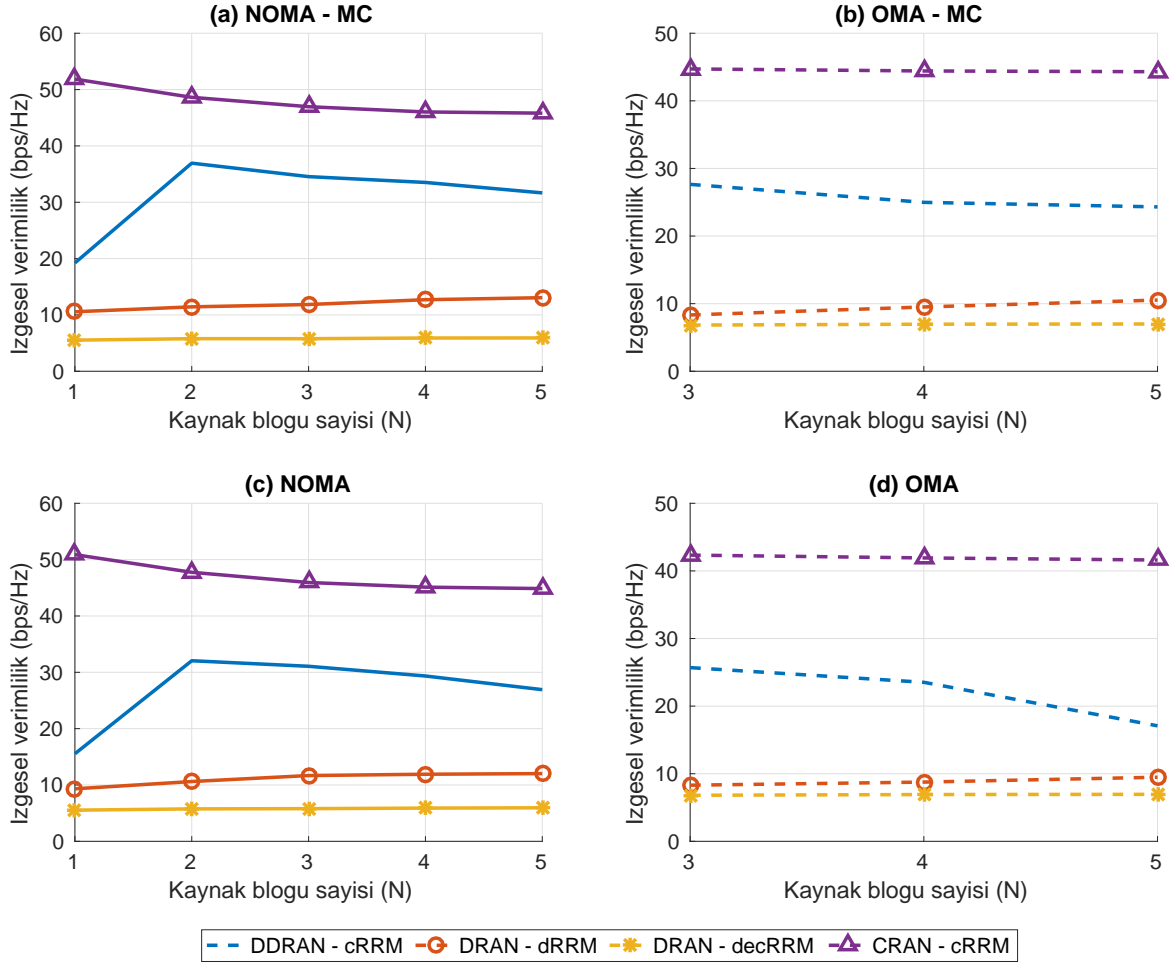
C-RAN mimarisinde cRRM kullanıldığında, RB sayısı ile doğrusal bir EE başarımı elde edilmektedir, bununla birlikte bu doğrusallık NOMA veya MC'nin etkisinden bağımsızdır. DD-RAN mimarisinde cRRM kullanıldığında ise yine RB sayısı ile artan bir EE başarımına ulaşılmakta, ancak artış hızı yüksek bantgenişliklerinde yavaşlamaktadır. DD-RAN ile tek taşıyıcılı ( $N = 1$  RB) sistemde, başarımı zayıf olmakla birlikte, çok taşıyıcılı sisteme geçildiğinde C-RAN başarımına yaklaşmaktadır. Ancak bantgenişliği arttıkça, C-RAN ile başarımların farkı tekrar artmaya başlamaktadır. Burada C-RAN mimarisinde artan anten çeşitlenmesi ve dolayısıyla, iletim gücü ile bantgenişliğinin daha verimli kullanılması etkilidir. RRH iletim güçleri incelendiğinde, NOMA ve  $N = 1$  için C-RAN ile daha yüksek iletim gücü kullanılırken, çok taşıyıcılı sistemde, DD-RAN mimarisinde kullanılan RRH iletim gücü miktarı daha fazla artmaktadır, bu da EE başarımını etkilemektedir. OMA tasarısında ise, C-RAN ile daha az RRH iletim gücüyle (daha verimli kullanılarak) daha yüksek EE değerlerine ulaşılmaktadır. dRRM ve decRRM kullanıldığında, RB sayısı ile paralel ve doğrusal bir artış elde ediliyor olsa da, cRRM başarımına erişememektedir, sadece  $N = 1$  RB için DD-RAN mimarisinde cRRM başarımına yakın olduğu gözlemlenmektedir. dRRM, decRRM'e kıyasla daha iyi başarımlar göstermektedir ve bantgenişliği büyüdükçe bu başarımların farkı da artmaktadır.

İzgesel verimlilik (SE) ve enerji izgesel verimlilik (ESE) incelendiğinde, bantgenişliğinin ne kadar verimli kullanıldığı görülebilmektedir. C-RAN mimarisi ile  $N = 1$  RB için en yüksek izgesel verimlilik değerine ulaşılmaktadır, ancak DD-RAN mimarisinde ise tek taşıyıcılı sistemde verimlilik en düşük seviyededir. DD-RAN mimarisinde, çok taşıyıcılı sisteme geçiş ( $N = 1$  RB  $\rightarrow$   $N = 2$  RB) bölgesinde izgesel verimliliğin en

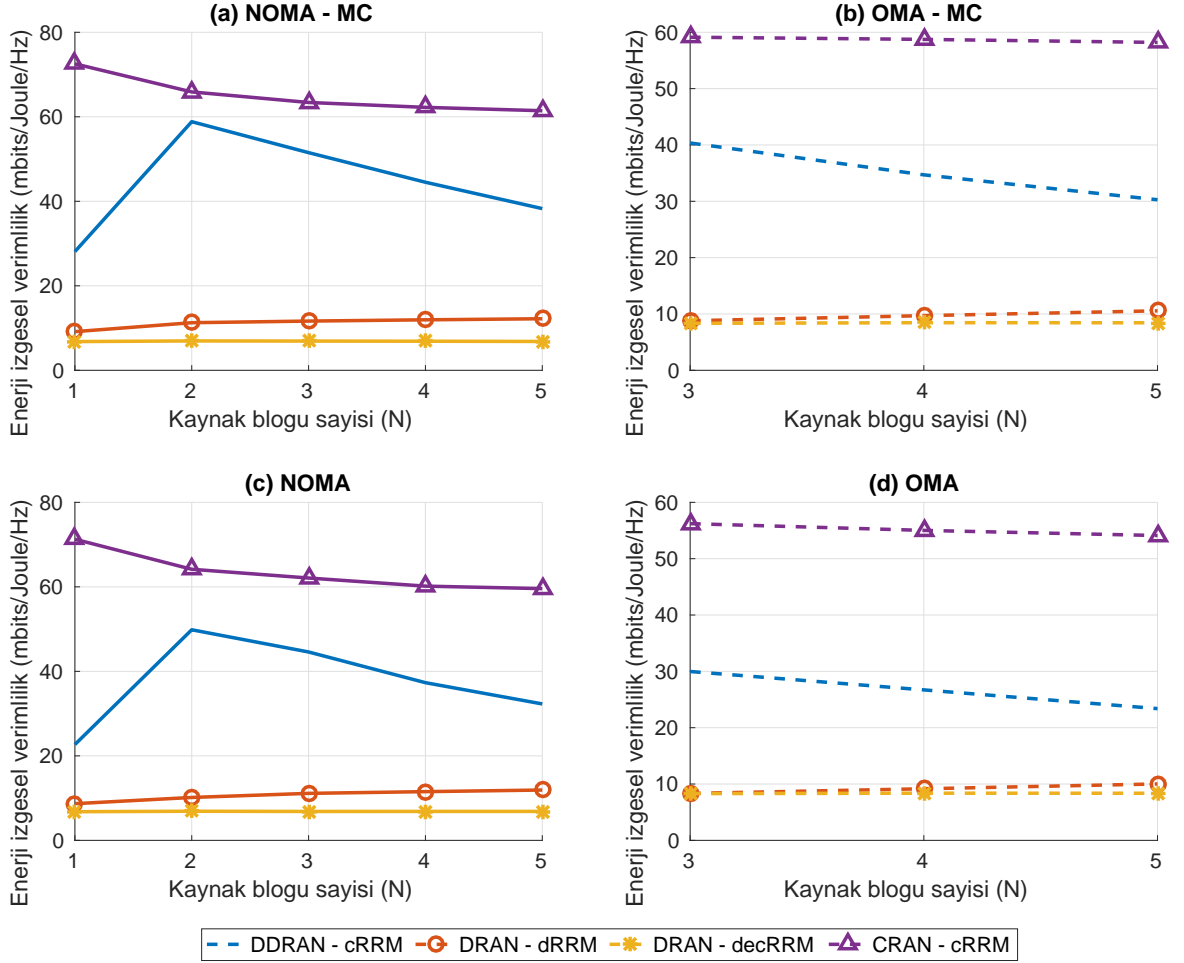
yüksek değer alması, EE başarımında da artış hızının yüksek olmasına sebep olmaktadır. Çok taşıyıcılı sistemler için C-RAN ve DD-RAN mimarilerinde, cRRM kullanıldığında, bantgenişliği arttıkça maliyet işlevi olan EE başarımı artmakta, ancak SE ve ESE düşmektedir. D-RAN mimarisinde ise, zaten yüksek başarımlara ulaşılamamakta, bantgenişliğinin artmasıyla izgeye bağlı verimlilik de artmaktadır. OMA tasarısı kullanıldığında ise, beklenildiği üzere başarım düşmektedir; ancak en çok başarım kaybeden DD-RAN mimarisidir.



Şekil 5.4.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcıli ve çok taşıyıcılı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütölmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji verimliliğinin (EE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

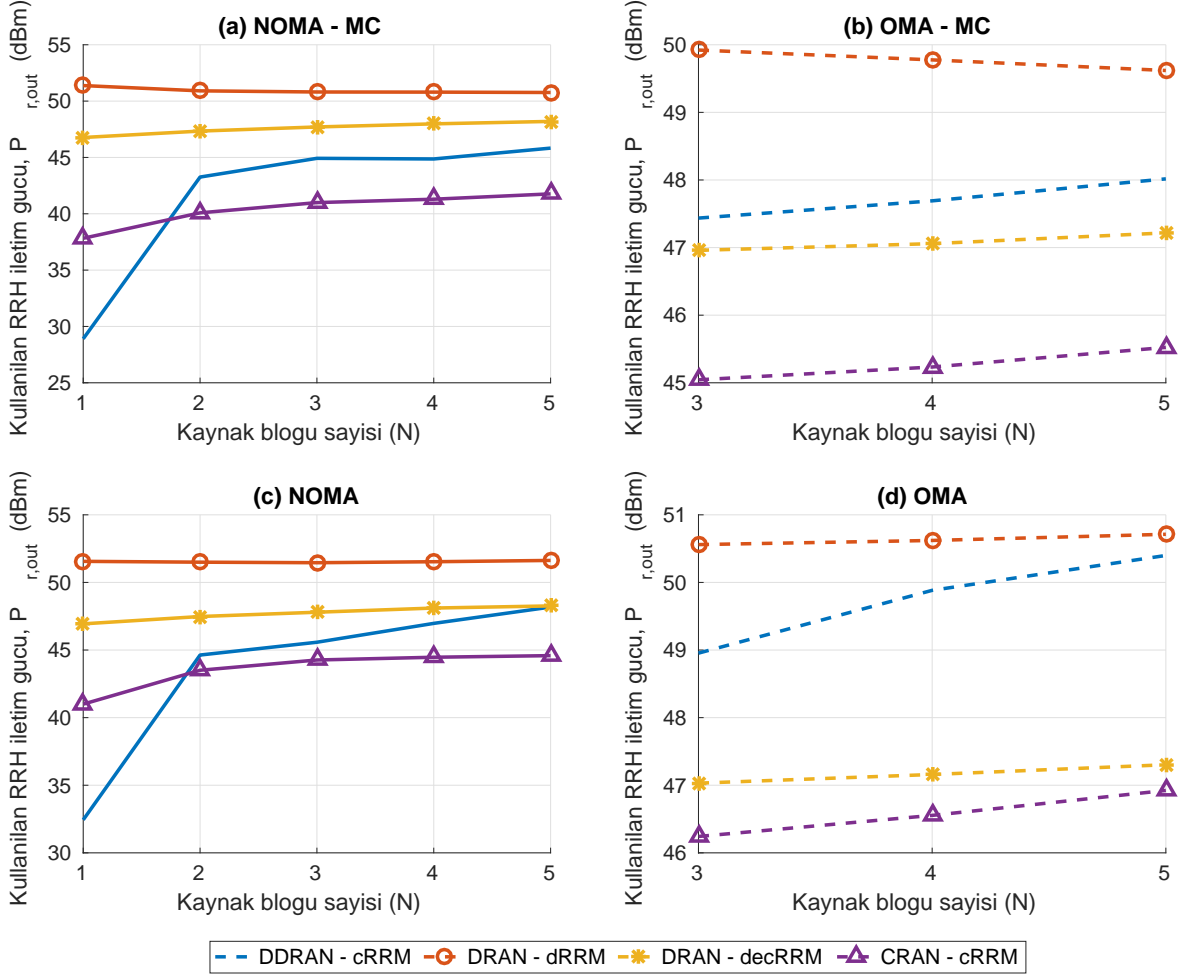


Şekil 5.5.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

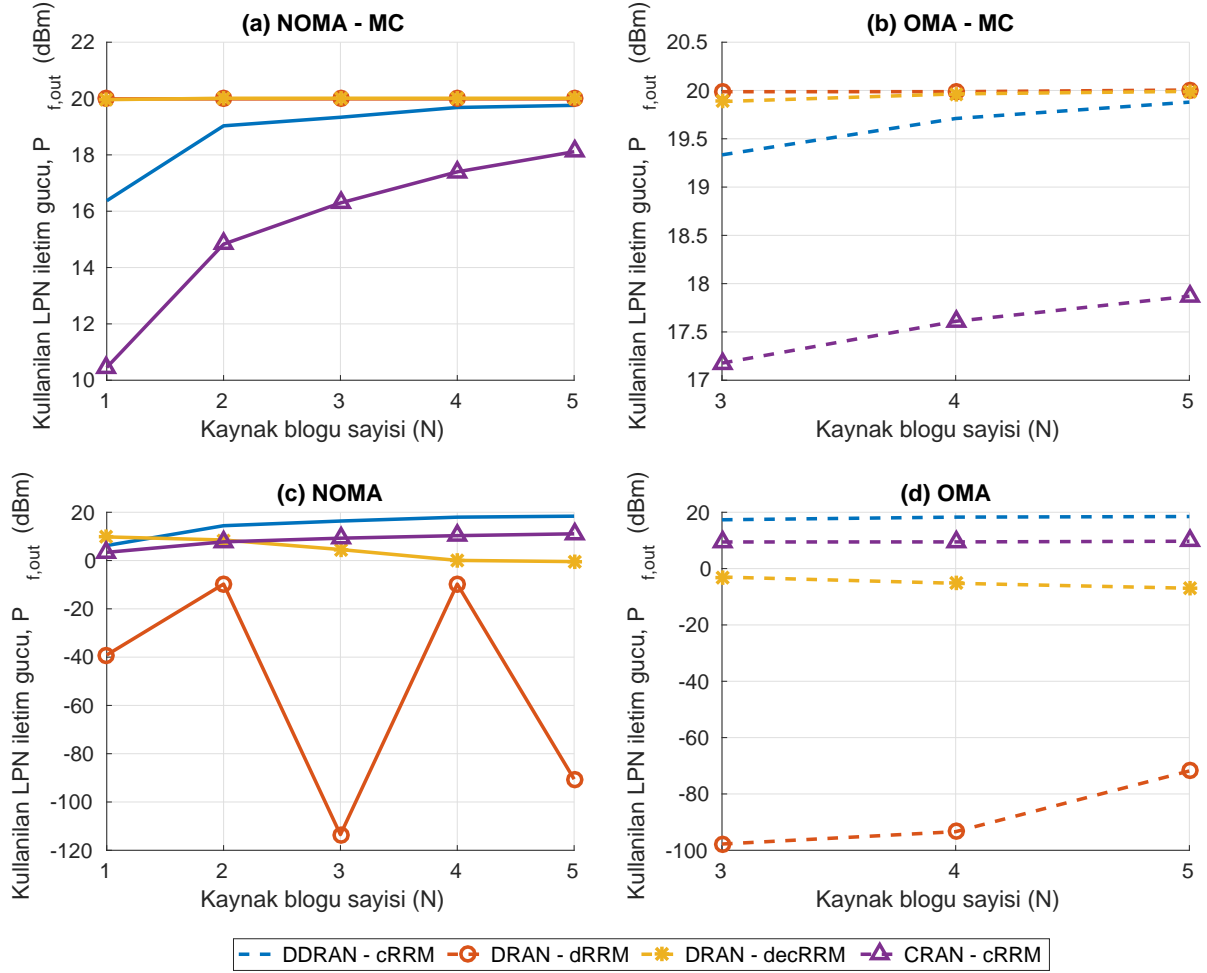


Şekil 5.6.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRM ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topaktaki enerji izgesel verimliliğinin (ESE), çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



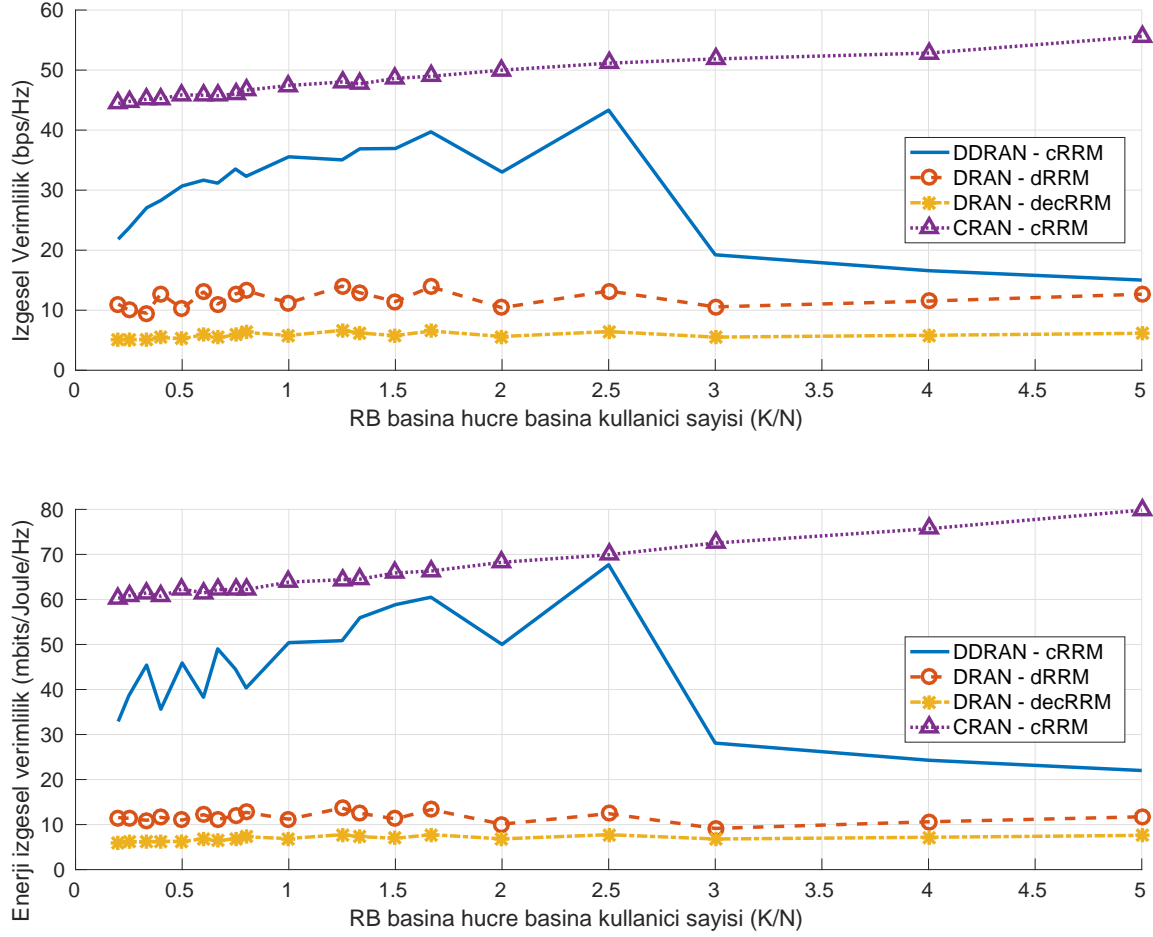


Şekil 5.7.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, enküçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan RRH iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.



Şekil 5.8.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRH ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu veya olmadığı farklı durumlarda, topakta kullanılan LPN iletim gücünün, çeşitli kullanıcı sayıları için RB sayısına göre değişimi incelenmektedir. (a) NOMA - MC, (b) OMA - MC, (c) NOMA, (d) OMA.

Şekil 5.9'da, EE ve ESE başarımlarının RB başına hizmet sunulan kullanıcı sayısı  $\left(\frac{K}{N}\right)$  ile değişimi incelenmektedir.  $\frac{K}{N}$  değeri arttıkça C-RAN mimarisinde başarımın arttığı, D-RAN mimarisinde ise başarımın azaldığı gözlemlenmektedir. Burada girişim yönetim yetenekleri, anten çeşitlemesi gibi serbestlik derecesini artıran faktörler etkilidir. Bu konuda daha orta noktada duran DD-RAN mimarisinde ise başarım önce artmakta, sonra azalmaktadır, bir başka deyişle, RB başına çok kullanıcı olması başarımı artırmaktadır; ancak tek RB olduğunda, kullanıcı sayısının  $K > 2$  olarak seçilmesi başarımı düşürmektedir.



Şekil 5.9.  $M = 2$  hücreli, hücre başına çok kullanıcı ve çok taşıyıcı sistemde, azami güç, en küçük veri hızı ( $r_0 = 0.1$  Mbps) ve Jain adaletliliği ( $J_0 = 0.7$ ) kısıtı ile topaktaki enerji verimliliği ( $\mu_{EE}$ ) enbüyütülmektedir. Her hücrede 1 LPN aktif olarak hizmet etmektedir. RRM ve LPN güç sınırları sırasıyla  $P_{r,max} = 43$  dBm ve  $P_{f,max} = 17$  dBm olarak seçilmekte, decRRM için hücrelerarası girişim  $I_{max} = 0$  dBm olarak seçilmektedir. Problem formülasyonunda SIC ve CPM kullanılmaktadır. Farklı mimariler ve farklı RRM koordinasyon seviyeleri için, NOMA ile MC fonksiyonlarının aktif olduğu durumda, topaktaki izgesel verimliliğinin (SE) ve enerji izgesel verimliliğinin (ESE), her hücrede RB başına düşen kullanıcı sayısına ( $K/N$ ) göre değişimi incelenmektedir. (a) İzgesel Verimliliği (SE), (b) Enerji İzgesel Verimliliği (ESE).

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLEN ÇALIŞMALAR

### 6.1 SONUÇLAR

Tez kapsamında, telsiz haberleşme sistemlerinde son yıllarda ön plana çıkan heterojen ağlarda RRM ve IM problemi ele alınmaktadır. İlk olarak, homojen ağlarda (RRH) tek tek ele alınarak problemin çözümü aranmakta, ilerleyen aşamalarda heterojen ağlarda farklı erişim noktalarının (RRH, femto-hücre, piko-hücre) bu yapılarla birlikte çalışabilirliği sorgulanmakta ve uygun RRM algoritmaları geliştirilmektedir. Basitten karmaşığa doğru karmaşıklığı değişen senaryolarda ve uygun kısıtlar altında (örn., azami güç, adalet) RRM problemi irdelenmekte ve eniyi veya eniyeye yakın çözümler önerilmektedir. Bu algoritmalarda, 5G ve ötesinde kullanılması öngörülen çok taşıyıcılı NOMA (dikgen olmayan çoklu erişim), MC (çoklu-bağlantı) ve CoMP (koordine edilmiş haberleşme) gibi ağ fonksiyonlarının birlikte kullanıldığı durumlarda başarımları incelenmektedir. CoMP ağlarında, NOMA'nın kullanılmasının getirdiği kazanç incelenmekte, heterojen ağlarda çoklu-bağlantının katkıları araştırılmaktadır. CoMP kullanılan heterojen ağlarda, başarımlar ve karmaşıklık ödünleşimi göz önüne alınarak NOMA ve/veya MC fonksiyonlarının tercihleri karşılaştırılmaktadır.

Ağ fonksiyonlarının sanallaştırılması sayesinde kullanım amacına göre bazı fonksiyonlar merkezi bazı fonksiyonlar ise dağıtık olarak kullanılabilir. Yukarıda belirtilen RRM, NOMA, MC ve CoMP gibi ağ fonksiyonları hem merkezi hem de dağıtık olarak kullanılabilir. Bu bağlamda, bazı ağ fonksiyonlarının (örn., RRM, ICIC) merkezi olarak, bazılarının (örn., taşıyıcı tabanlı bağlantılık, CoMP) ise dağıtık olarak kullanıldığı DD-RAN (dinamik dağıtık RAN) mimarisinde cRRM (merkezi RRM) incelenmektedir. Ayrıca, D-RAN mimarisi göz önüne alınarak, her hücrede RRM'in dağıtık (dRRM) ve merkezi olmayan (decRRM) bir şekilde yapıldığı durumlar incelenmektedir. Bununla birlikte, C-RAN (bulut RAN) mimarisi ile ağ fonksiyonlarının merkezi olarak kullanıldığı, merkezi sinyal işleme ve temelbant işlem havuzlaması ile kazanılan çeşitlemeden faydalanan sistem mimarisi incelenmektedir.

İlk olarak, **2'de Dinamik Dağıtık RAN (DD-RAN) mimarisinde**, CoMP haberleşmesinin kullanıldığı ağlarda, merkezi RRM ve IM uygulanmaktadır. Öncelikle, homojen

ağlarda özdeş erişim noktaları, RRH, dağıtık bir şekilde yerleştirilerek problemin çözümü aranmakta, ilerleyen aşamalarda ise farklı güç seviyelerindeki erişim noktalarının (RRH, femto-hücre, piko-hücre) birlikte yerleştirildiği heterojen ağlara uygun RRM problemleri irdelenmekte ve eniyi veya eniyeye yakın çözümler önerilmektedir. Tek taşıyıcılı senaryolar hem BPM hem CPM yöntemi ile incelenmiş; ancak çok taşıyıcılı sistemler sadece CPM yöntemi ile çalışılmıştır. Basitten karmaşığa çeşitli senaryolarda ve uygun kısıtlar altında (örn., enküçük veri hızı, azami güç, adalet) RRM problemi irdelenmekte ve eniyi veya eniyeye yakın çözümler önerilmektedir.

İlk olarak Kısım 2.3.1.1 ve Kısım 2.3.1.2'de tek taşıyıcılı homojen ağlarda, sırasıyla, hücre başına tek kullanıcı ve çok kullanıcı senaryolar incelenmektedir. Çok kullanıcı sistemde, kullanıcılar NOMA sayesinde aynı kaynak bloğunu aynı zaman diliminde kullanabilmektedirler. Maliyet işlevi olarak öncelikle topaktaki enküçük veri hızına sahip kullanıcının veri hızı enbüyütülmüş, daha sonra uygun kısıtlar altında toplam veri hızı enbüyütülmüştür. Erişim noktalarının doğası gereği azami güç kısıtı problemde mevcut olmakla birlikte, sırayla enküçük veri hızı kısıtı, daha sonra kullanıcılar arası Jain adaletliliği kısıtı da probleme eklenerek, sistem başarımlarının (toplam veri hızı, kullanılan RRH iletim gücü, topaktaki enküçük veri hızı) bu kısıtlarla nasıl değiştiği irdelenmektedir. Enküçük veri hızı veya adalet kısıtları sıklaştırıldığında, toplam veri hızının düştüğü ve enküçük veri hızının da problemin doğası gereği arttığı gözlemlenmektedir. Kullanıcı sayısının artması da, gerek girişim değerlerinin artması, gerekse adalet kısıtlarını sıklaştırmasından dolayı, toplam veri hızını düşürmektedir. CPM tasarısının BPM tasarısına göre her durumda (herhangi  $P_{max}$  değeri veya kullanıcı sayısı için) daha iyi başarımlar sunduğu, RRH iletim gücü limitindeki,  $P_{max}$ , artıştan BPM tasarısının çok fazla etkilenmediği, ancak CPM tasarısında ise başarımların arttığı gözlemlenmiştir. Bir başka deyişle, bütün RRH'lerini açıp kapatmaktansa iletim gücünü ayarlamak beklendiği üzere daha iyi başarımlar göstermektedir. Kısıtların gevşek olduğu durumda enbüyük değerlere ulaşan CPM yöntemi, kısıtlar sıklaştırıldığında daha fazla başarımlar kaybetmekte; ancak beklenildiği üzere BPM'den hala daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Ayrıca BPM yönteminin kısıtlı girişim yeteneği sebebiyle belirli kullanıcı sayısından sonra servis sağlayamamaktadır. Enküçük veri hızı kısıtı sağlanabilecek değerlerin üzerinde artırıldığında, hizmet verilen kullanıcı sayısı yine düşmektedir.

Daha sonra, Kısım 2.3.1.3'te çok taşıyıcılı senaryolar irdelenmektedir. Burada çok taşıyıcılı NOMA olarak güncellenmektedir ve herhangi bir kullanıcı birden fazla NOMA topağına aynı anda dahil olabilir. Çok taşıyıcılı NOMA'nın getirdiği kazanımın incelenbilmesi için OMA tasarısı ile sistem başarımları karşılaştırılmaktadır. Bu yöntemde, bütün kullanıcıların hizmet görmesi şartıyla birlikte, her RB her hücrede sadece bir kullanıcı tarafından kullanılabilir. Bu koşul gereği, her hücrede en fazla RB sayısı kadar kullanıcıya hizmet verilebilmektedir. Çok taşıyıcılı sistem için sadece CPM tasarısı kullanılarak eniyileme problemi düzenlenmektedir. Azami iletim gücü, en küçük veri hızı ve adalet kısıtları altında toplam veri hızı, enerji verimliliği ve bu tezde önerilen ödünleşimli enerji verimliliği enbüyütülmüştür.

Çok taşıyıcılı durumda, belirli RB sayısı için hücre başına kullanıcı sayısı arttıkça en küçük kullanıcı veri hızları kısıtlar sebebiyle en küçük değere doğru azalmaktadır. Kullanılan kaynak bloğu sayısı arttıkça, problemin olurlu bölgesinin de büyümesi sebebiyle, en küçük kullanıcı veri hızının arttığı gözlemlenmektedir. Yüksek serbestlik derecesine sahip NOMA için, kullanıcı çeşitlemesi ve bantgenişliğinin artması, maliyet işlevini (toplam veri hızı, enerji verimliliği) artırmaktadır. Burada, tek taşıyıcı için kullanıcı sayısı arttıkça toplam veri hızı (veya enerji verimliliği) düşmekte, ancak birden fazla RB sayısı için kullanıcı sayısı ile paralel bir şekilde başarımın da arttığı gözlemlenmektedir. Ancak OMA yönteminde, kullanıcı çeşitlemesi, belirli sayıda kullanıcıya kadar başarımı artırmakta, daha sonra iletim gücünün paylaşımı sebebiyle ya değişmemektedir ya da ufak miktarlarda düşmektedir, bu düşüş Jain adaletliliği kısıtının sıkılaşmasına bağlıdır, ki adalet kısıtı sıkılaştıkça en küçük kullanıcı veri hızı da artmaktadır.

Ayrıca, toplam veri hızının enbüyütülmesi ile kullanılan iletim gücünün en küçültülmesi arasında bir ödünleşim oluşturularak sistem davranışının incelenebildiği bir maliyet işlevi önerilmektedir. Azami iletim gücü, en küçük veri hızı ve adalet kısıtları altında, bir ödünleşim parametresine ve  $P_{max}$  değerine karşı enerji verimliliğinin ve toplam veri hızının nasıl davrandığı incelenmektedir. Parametrenin etkisiz olduğu durumda, iletim gücünün en küçültülmesinin önemsiz olduğu görülmekte ve toplam veri hızının enbüyütüldüğü durumla benzer sonuçlar elde edilmektedir. Ancak bu durumda, enerji verimliliğinin düştüğü, yani iletim gücünün verimsiz kullanıldığı göz-

lemlemektedir. Parametre değeri değiştirilerek, hem toplam veri hızının hem de enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü bölgeler elde edilebilmektedir. Arzu edildiği takdirde, parametre değiştirilerek, iletim gücünün enküçültüğü bölgeye ulaşılabilir; ancak bu durumda enerji verimliliği ve toplam veri hızı düşmektedir.

Daha sonra Kısım 2.3.2.1'de ise çok kullanıcı ve çok taşıyıcı heterojen ağlarda, CPM tasarısı kullanılarak enerji verimliliği başarımı yine aynı kısıtlar altında incelenmektedir. Bu kısımda, kullanıcıların RRH'lere ve farklı güç değerlerine sahip LPN'lere aynı anda bağlanıp sinyal alabilmesine olanak sağlayan MC fonksiyonunun kullanılıp kullanılmamasını etkileyen yeni bir kısıt eklenmiştir. NOMA ile MC fonksiyonlarının katkıları irdelenmiş, aktif olan LPN sayısının, tüketilen iletim güçlerini, enerji ve izgesel verimliliği nasıl etkilediği incelenmiştir. İlk olarak EE'nin kullanıcı sayısı ve erişim noktalarının güç sınırları (RRH için  $P_{r,max}$ , küçük hücreler için  $P_{f,max}$ ) ile nasıl değiştiği incelenmiş, azami iletim gücü değerlerinin artması ve dolayısıyla problemin olurlu bölgesinin büyümesi sebebiyle, NOMA ve MC'nin aktif olup olmamasına bağlı olmaksızın, sistem başarımının arttığı gözlemlenmiştir.

Artan LPN sayısının, MC fonksiyonunun kullanılmadığı durumlarda başarımı (her  $P_{max}$  değeri için) düşürdüğü, MC fonksiyonunun aktif olduğu durumlarda ise başarımı çok fazla etkilemediği görülmektedir. Aktif olan LPN'lerin çalışması için gereken gücün sürekli tüketilmesi sebebiyle başarımlar düşerken, MC fonksiyonu ile RRH ve LPN'lerden aynı anda yararlanarak bu zararı giderebilmektedirler. Tek taşıyıcı durumunda, kullanıcı sayısı artarken kullanıcılar arasındaki adalet kısıtının etkisi daha çok etkili olarak başarımı düşürürken, çok taşıyıcı durumda genişleyen olurlu bölge ile kısıtların sağlanması kolaylaşmakta ve kullanıcı çeşitlemesi ile başarımın arttığı görülmüştür. Girişim yönetimi becerisi ve serbestlik derecesi daha düşük olan OMA tasarısında, aktif LPN sayısının başarıma etkisi NOMA'ya kıyasla daha belirgin olarak gözükmektedir. NOMA veya MC fonksiyonlarının aynı anda aktif olarak kullanılmasıyla alıcıda artacak olan hesaplama karmaşıklığının istenmediği durumlarda, aktif olan LPN sayısına göre değişecek şekilde, NOMA veya MC fonksiyonundan herhangi birisinin seçilebileceği gözlemlenmektedir.

İletim güçlerinin aktif olan LPN sayısı ile nasıl değiştiği de ayrıca incelenmiştir. RRH iletim gücü sınırı LPN iletim gücüne yakın olduğunda, RRH ve LPN'ler benzer güç



değerlerinde çalışmaktadırlar. MC'nin kullanılmadığı durumda LPN sayısının artmasıyla kullanılan RRH iletim gücünün sürekli azaldığı gözlemlenmiştir. Burada, bazı kullanıcıların LPN seçimi ile, hiç LPN kullanılmadığı homojen ağlara kıyasla RRH iletim gücü azalmaktadır. MC fonksiyonunun aktifleştirilmesiyle bir LPN kullanımı ile yine iletim yükünün bir kısmı RRH'lerden LPN'lere aktarılmakta; ancak aktif LPN sayısının daha da artmasıyla RRH iletim gücü tekrar artmaya başladığı görülmektedir. Yüksek RRH güç sınırlamaları için sistem davranışının daha farklı olduğu görülmektedir. Burada, NOMA'nın kullanıldığı durumda, kullanılan RRH iletim gücü NOMA kullanılmayan duruma göre yaklaşık olarak yarı yarıya azaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, tek LPN için, OMA yönetiminde kullanılan RRH iletim gücü en az iken, LPN sayısının artmasıyla harcanan RRH iletim gücü de artmaktadır. MC'nin aktif olmadığı durumda ise artan LPN sayısı ile harcanan RRH iletim gücü sürekli artmaktadır. NOMA ile zaten daha düşük RRH iletim gücü ile çalışılmasından dolayı, MC'nin etkisi net olarak görülmemektedir. MC aktif olduğu durumlarda daha fazla LPN iletim gücü kullanılırken, MC aktif olmadığı durumda kullanılan LPN iletim gücünün azaldığı görülmüştür. Yüksek RRH iletim gücü kullanıldığında ve MC aktif olmadığı durumda, kullanıcıların LPN'leri daha az tercih ettiği gözlemlenmektedir.

Enküçük veri hızına ( $r_{min}$ ) sahip kullanıcının kesintiye uğramama olasılığı incelenmekte, hizmet alan kullanıcı sayısı arttıkça daha düşük  $r_{min}$  değerlerinin elde edildiği ve bu değerlerin daha düşük olasılıklara sahip olduğu görülmektedir. Burada, kullanıcı sayısının artmasıyla adalet kısıtı daha da sıkılaşmakta ve kullanıcılar daha düşük veri hızlarında çalışmaktadırlar. Ağda aktif durumda olan LPN sayısı arttıkça,  $r_{min}$  değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Farklı LPN sayıları için, NOMA ve MC'nin aktif olup olmadığı çeşitli durumlarda, enküçük veri hızına sahip kullanıcının servis kesintisine uğramama olasılığı incelendiğinde, NOMA ve MC tekniklerinin enküçük veri hızını daha fazla artırabildiği gözlemlenmektedir. Burada bu tekniklerle eniyileme probleminin olurlu bölgesinin genişlemesi ve kısıtların daha rahat bir şekilde sağlanması temel sebeptir.

EE başarımı her NOMA, OMA ve MC kombinasyonu için RB sayısı ile paralel olarak artmaktadır. Ancak farklı RB sayıları için kullanıcı sayısına bağlı olarak başarımlar değişebilmektedir. NOMA tekniğinin kullanıldığı durum incelendiğinde, kullanılabilir

tek taşıyıcı olduğunda, tek kullanıcılı durumun en iyi başarımı sağladığı gözükmektedir, kullanıcı sayısının artmasıyla başarımlar düşmektedir. Burada, tek taşıyıcılı senaryoda, kullanıcı sayısının artması adaletlilik kısıtının sağlanmasını zorlaştırmakta ve kullanıcı çeşitlenmesine rağmen daha düşük EE değerlerinde bu kısıtın sağlandığı gözlemlenmektedir. Aynı şekilde homojen ağlarda tek taşıyıcılı sistemlerde de bu sonuç görülmektedir. Çok taşıyıcılı sistem için olurlu bölge genişlemekte ve EE başarımının kullanıcı sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir. Burada çok taşıyıcılı olmasının, kullanıcı çeşitlenmesi kazancını daha etkin kılmaktadır. OMA durumunda, RB sayısı arttıkça EE başarımının arttığı, ancak desteklenen kullanıcı sayısı arttıkça başarımın düştüğü, bantgenişliğine bağlı olmaksızın tek kullanıcılı senaryonun üst sınır olarak çalıştığı gösterilmektedir. EE'nin enbüyütüldüğü problemde, izgesel verimlilik (SE), kullanılabilir RB sayısının artmasıyla genel olarak her durum için düşmektedir. Tek istisnası, NOMA yönteminde tek taşıyıcıdan iki taşıyıcıya artış olduğunda görülmektedir. Çok taşıyıcılı sistem için, SE başarımı, kullanıcı sayısı ile paralel olarak artmaktadır; ancak bu artışın yüksek bantgenişliğinde azaldığı gözlemlenmektedir. RB başına kaç adet kullanıcıya hizmet verilerek bantgenişliğinin en verimli şekilde kullanıldığı gözlemlenebilmesi için, elde edilen sonuçlardan RB başına düşen kullanıcı sayısına göre izgesel verimlilik karşılaştırılmıştır. Buradan ortalama iki RB başına beş kullanıcı ile bantgenişliğinden enbüyük verimle faydalandığı görülmektedir. RRH ve LPN iletim güçlerinin kullanılabilir RB sayısı ile arttığı gösterilmektedir. Kullanıcı sayısının artmasıyla NOMA'nın kullanıldığı durumda kullanılan RRH iletim gücünün azaldığı, LPN gücünün ise arttığı gösterilmektedir. OMA yönteminin girişim yönetimindeki eksikliği sebebiyle yüksek iletim gücü kullanımı ile başarımlar artırılabilirdiği, dolayısıyla kullanıcı sayısı arttıkça kullanılan RRH iletim gücünün de arttığı gözlemlenmektedir.

Bu Bölüm için genel bir karşılaştırma yapıldığında serbestlik derecesi en yüksek olan NOMA ile MC'nin aktif olduğu durum en iyi başarımı sunmaktadır. Düşük  $P_{r,max}$  değeri için, MC aktif olmadan sadece NOMA kullanımı, OMA ile MC'nin aktif olduğu durumdan genellikle daha iyi EE sunmaktadır; yani NOMA'nın kullanımı MC'nin aktif olmasından daha önemlidir, LPN sayısı çok fazla arttığında ise MC aktif olmadığında başarımlar daha fazla düşmeye başlamaktadır. Yüksek  $P_{r,max}$  değeri için, heterojen ağlarda, NOMA'nın kullanımının MC'nin aktif olması arasındaki başarımlar farkı LPN sa-

yısına bağılılığı önemlidir. Eğer karmaşıklığın çok artmaması için, NOMA veya MC fonksiyonlarından bir tanesi seçilecekse, düşük sayıda LPN için NOMA daha önemliken, yüksek sayıda LPN için NOMA yerine MC seçilebilir. Bu seçim kullanıcı uç birimlerinin kodçözümü yeteneğine de bağılı olacaktır.

Daha sonra, **3'te Dağıtık RAN (D-RAN) mimarisinde**, çok kullanıcılı, çok taşıyıcı ve çoklu hücre yapısına sahip topakta, CoMP, MC, RRM gibi ağ fonksiyonları her hücre kontrolörüne dağıtılmaktadır ve her hücre kendi kararlarını vermektedir. RRM iki ayrı koordinasyon seviyesinde incelenmektedir. Birincisi, dağıtık RRM (dRRM), ağ eniyilemesinin yapıldığı bir önceki andaki komşu hücrelerden gelen girişim seviyelerine göre kendi başarımını eniyilemektedir, ve bu eniyileme sonucu bir sonraki adımda etkili olacak şekilde yinelemeli bir RRM algoritması önerilmektedir. Bir diğeri, merkezi olmayan RRM (decRRM), komşu hücre girişim seviyelerini bilmeden sabit bir hücrelerarası girişim değeri ( $I_{max}$ ) kabul edilerek sistem eniyilemesi yapılmaktadır. Sistem eniyilemesi yapıldıktan sonra elde edilen güç kontrol katsayıları kullanılarak (gerçek) sistem başarımı hesaplanmakta ve incelenmektedir. Bu bölümde adaletlilik, BS azami güç, enküçük veri hızı gibi kısıtlar altında, hem dRRM hem de decRRM için enerji verimliliği eniyileştirilmektedir. Sürekli güç yönetimi (CPM) tasarısı kullanılarak eniyileme problemi çözülmektedir. Kullanıcıların özdeş olmayan erişim noktalarına aynı anda bağlanmasına olanak sağlayan MC fonksiyonunun etkileri, NOMA ve OMA fonksiyonları ile birlikte incelenmektedir.

Hem dRRM hem decRRM için sistem genelinde en düşük veri hızı, Jain adaletliliği ve farklı güç değerlerine sahip erişim noktalarının azami güç kısıtları altında enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü senaryolar için EE, SE, ESE başarımları ve erişim noktalarının kullandığı iletim güçleri aktif LPN sayısına ve kullanılabilir RB sayısına göre incelenmektedir. decRRM için ayrıca, varsayılan hücrelerarası girişim değerinin de sistem başarımına etkisi incelenmektedir.

Dağıtık RRM (dRRM) başarımları incelendiğinde, LPN'lerin aktif olabilmesi için harcadığı iletim harici güçler dolayısıyla, artan LPN sayısı ile EE başarımının düştüğü ve homojen ağlara kıyasla başarımların kaybı olduğu gözlemlenmektedir. MC fonksiyonunun aktif olmadığı durumlarda, kullanıcılar RRH'lere bağlanmayı tercih etmektedir. Ayrıca, LPN kullanılmadan diğeri mimarilerin destekleyebildiği kadar kullanıcıya

hizmet sunulamadığı gözlemlenmektedir. EE başarımı her NOMA ve MC kombinasyonu için bantgenişliği ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bantgenişliği arttığında girişim daha etkin bir şekilde giderilebilmekte, bu sebeple NOMA'nın etkisi daha da artmaktadır. Bu mimari ile hücrelerarası koordinasyon eksikliği nedeniyle girişim arzu edilen seviyede giderilememekte ve fazladan bantgenişliği sistem başarımını iyileştirse de; cRRM çözümüne erişememektedir. DDRAN mimarisinde cRRM sonuçlarının aksine düşük izgesel verimlilik elde edilmekte, ancak artan bantgenişliğiyle sürekli artma eğilimindedir.

Merkezi olmayan RRM (decRRM) başarımları incelendiğinde, OMA durumunda artan  $I_{max}$  değeri ile EE başarımı sürekli düşmektedir. Hücrelerarası girişimin olmadığı varsayıldığında ve NOMA kullanıldığında EE başarımı, sıfırdan farklı  $I_{max}$  değerlerine göre daha düşük sonuç vermektedir. MC fonksiyonu kullanılmadığında kullanıcılar RRH'lere bağlanmaktadır, sadece hücrelerarası girişim olmadığı ve NOMA'nın kullanıldığı durumda LPN'lere bağlanan kullanıcı(lar) bulunmaktadır. MC fonksiyonu kullanıldığında ise LPN'ler de veri iletiminde görev alacak şekilde sistem eniyilenmektedir. NOMA kullanıldığında, hücrelerarası girişimin mevcut ancak düşük seviyelerde olduğu varsayıldığında RRH'lerin en az iletim gücü harcadıkları, daha yüksek girişim değerleri için daha yüksek RRH iletim gücü kullanıldığı görülmektedir. NOMA'nın kullanılmadığı durumda, yüksek hücrelerarası girişim kabul edildiğinde kullanılan RRH iletim gücü de artmaktadır.

Hücrelerarası girişimin olmadığı uç noktada NOMA yöntemi kullanıldığında, tek kullanıcı durumunda en yüksek EE başarımı elde edilmektedir. Eniyileme sonucunda bulunan güç kontrol katsayıları kullanılarak elde edilen gerçek girişim değerlerinin kullanılması sebebiyle kullanıcı sayısı arttıkça başarımın düştüğü görülmektedir. Bu mimari ve RRM seviyesinde hücrelerarası koordinasyon eksikliğinin en küçük düzeyde kalması sebebiyle girişim arzu edilen seviyede giderilememekte ve fazladan bantgenişliği sistem başarımını iyileştirse de; diğer çözümlere yaklaşmamaktadır.

**Bölüm 4'te**, çok kullanıcı, çok taşıyıcı ve çoklu hücre yapısına sahip topak tek bir bulut (C-RAN) mimari olarak düşünülerek, cRRM uygulanmaktadır. Bölümler 2 ve 3'ün aksine, kullanıcılar iletişim kurmak için sadece bulunduğu hücrenin erişim noktaları ile sınırlandırılmamış; ve bütün topak bir bulut olarak düşünüldüğü için bütün

erişim noktalarından sinyal alabilmektedir. CoMP ve MC fonksiyonları merkezileştirilmiş ve koordinasyon ağıdaki bütün erişim noktaları üzerinden merkezi kontrolör tarafından yapılmaktadır. Bu bölümde adaletlilik, BS azami güç, enküçük veri hızı gibi kısıtlar altında enerji verimliliği eniyileştirilmektedir. Sürekli güç yönetimi (CPM) tasarısı kullanılarak eniyileme problemi çözülmektedir. NOMA tekniğinin başarımı, OMA başarımı ile karşılaştırılmaktadır. OMA tasarısında, adil karşılaştırma için, bulut mimarisi için de hücredeki her kullanıcı için ayrı bir RB tahsis edilmekle birlikte, komşu hücrelerde aynı RB'lerin kullanımına izin verilmektedir. Kullanıcıların özdeş olmayan erişim noktalarına aynı anda bağlanmasına olanak sağlayan MC fonksiyonunun etkileri, NOMA ve OMA fonksiyonları ile birlikte incelenmektedir.

Sistem genelinde en düşük veri hızı, Jain adaletliliği ve farklı güç değerlerine sahip erişim noktalarının azami güç kısıtları altında enerji verimliliğinin enbüyütüldüğü senaryolar için EE, SE, ESE başarımları ve kullanılan RRH ve LPN iletim güçleri, aktif LPN sayısına ve kullanılabilir RB sayısına göre incelenmektedir. Kullanılan LPN'lerin sürekli aktif olduğu kabul edildiği için, kullanıcıların bağlanmadığı durumlarda da iletim gücü hariç çalışmaya devam edebilmek için güç harcamaya devam etmektedirle bu da EE başarımını genel olarak düşürmektedir. MC fonksiyonunun aktif olmadığı durumlarda, kullanıcıların RRH'leri tercih ettiği gözlemlenmiştir. MC fonksiyonu ile başarımların artışı elde edilse de, NOMA'nın katkısının çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

EE başarımı her NOMA, OMA ve MC kombinasyonu için bantgenişliği ile paralel olarak artmaktadır. DDRAN-cRRM başarımının aksine, CRAN ile gelen fazladan serbestlik derecesi sayesinde artış hızı yüksek RB sayıları için de devam etmektedir. NOMA tekniğinin kullanıldığı durumda kullanıcı çeşitlemesi ile enerji verimliliğine dayalı başarımlar artmakta; OMA tekniğinin kullanıldığı durumda ise artan kullanıcı sayısı ile bu başarımlar düşmektedir. EE'nin enbüyütüldüğü problemde, izgesel verimlilik (SE) başarımı, RB sayısının artmasıyla düşmekte, kullanıcı çeşitlemesi ile artmaktadır. NOMA yönteminde, CRAN mimarisi ile her kullanıcıya bir taşıyıcı tahsis edildiği durumda izgeye bağlı başarımlar her RB değeri için benzer değerler almaktadır. NOMA tekniği kullanıcılara bütün izgeyi kullanma izni vermesine rağmen hücre ve RB başına kullanıcı sayısına göre başarımın değiştiği, NOMA'nın tercih edildiği

incelenen senaryoda, RB sayısı arttıkça RB'lerin daha verimli kullanılabildiği görülmektedir. Bantgenişliği arttıkça, kullanılan RRH iletim gücü artmaktadır; ancak bu artış yüksek bantgenişliğinde oldukça düşük kalmaktadır.

**Bölüm 5'de** bütün mimarilerin ve hücrelerarası koordinasyon seviyelerinin başarımları karşılaştırılmaktadır. Enbüyük EE başarımları, en yüksek serbestlik derecesine sahip olan C-RAN mimarisinde cRRM uygulandığı durumda elde edilmekte, daha sonra DD-RAN ve cRRM yönetimi gelmektedir. Önerilen dağıtık RRM algoritması ile yeteri kadar iyi başarımların alınamamakta ve merkezi olmayan RRM ile benzer sonuçlar elde edilmektedir. Buradan BS'ler arasındaki bilgi paylaşımı ve koordinasyonun, merkezi RRM'in başarımları için önemi görülebilmektedir.

Kullanılan RRH iletim güçleri karşılaştırıldığında ise en az güç kullanımının yine C-RAN mimarisinde olduğu gözlemlenmektedir. NOMA ile cRRM birlikte kullanıldığında en az iletim gücü kullanılırken, OMA kullanıldığında ise merkezi decRRM ile daha az güç tüketilmektedir, ancak unutulmamalıdır ki decRRM ile en kötü EE başarımları elde edilmektedir.

C-RAN mimarisinde cRRM kullanıldığında, RB sayısı ile doğrusal bir EE başarımları elde edilmektedir. DD-RAN mimarisinde cRRM kullanıldığında ise yine RB sayısı ile artan bir EE başarımlarına ulaşılmakta, ancak artış hızı yüksek bantgenişliklerinde yavaşlamaktadır. Çok taşıyıcılı sistemde bantgenişliği arttıkça, DD-RAN ile C-RAN mimarileri arasındaki başarımlar farkı da artmaktadır. Burada C-RAN mimarisinde artan anten çeşitilmesi ve dolayısıyla, iletim gücü ile bantgenişliğinin daha verimli kullanılması etkilidir. dRRM ve decRRM kullanıldığında, RB sayısı ile paralel ve doğrusal bir artış elde ediliyor olsa da, cRRM başarımlarına erişilememektedir, sadece tek taşıyıcılı durum için DD-RAN mimarisinde cRRM başarımlarına yaklaşabilmektedir. dRRM, decRRM'e kıyasla daha iyi başarımlar göstermektedir ve bantgenişliği büyüdükçe bu başarımlar farkı da artmaktadır.

İzgesel verimlilik (SE) ve enerji izgesel verimlilik (ESE) incelendiğinde, bantgenişliğinin ne kadar verimli kullanıldığı görülmektedir. C-RAN mimarisi ile tek taşıyıcılı durumu için en yüksek izgesel verimlilik değeri ulaşılmakta, ancak DD-RAN mimarisinde ise tek taşıyıcılı sistemde verimlilik en düşük seviyededir. Çok taşıyıcılı

sistemler için C-RAN ve DD-RAN mimarilerinde, bantgenişliği arttıkça izgeye dayalı verimlilik düşmektedir. D-RAN mimarisinde ise, zaten yüksek başarımlara ulaşılmamakta, ancak bantgenişliğinin artmasıyla izgeye bağlı verimlilik de artmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarla, ortak iletim CoMP (JT-CoMP) ile NOMA teknikleri birlikte kullanılmaktadır. Literatürden farklı olarak, her erişim noktasının bir hücre olarak düşünülmesi yerine, hücrelerde dağıtık anten sistemi (DAS) yapısı eklenmektedir. Daha önce yapılan CoMP-NOMA çalışmalarında, kullanıcıların bir NOMA topağında (bir RB) bulunduğu kabul edilirken, bu çalışmada çok taşıyıcılı NOMA ile kullanıcılar birden fazla NOMA topağına dahil olabilmektedirler, bu sayede herhangi bir kullanıcı eşlemesi veya gruplamasına gerek kalmamaktadır, ancak bu sebeple sistemin karmaşıklığı oldukça artmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda kullanıcılar arası adalet dikkate alınmaması sebebiyle bu tezdeki eniyileme problemlerine kısıt olarak eklenmiştir. Çok hücreli ve DAS yapısıyla karmaşık sinyal modeli, ve ağır girişim altında karmaşık sistem modeli ele alınmıştır. Literatürde genellikle toplam veri hızı veya enerji verimliliği enbüyütölmektedir, bu çalışmada buna ek olarak veri hızının enbüyütölmesi ile toplam iletim gücünün enküçöltölmesi arasında bir ödünleşim oluşturularak, sistemin çalışma bölgeleri de incelenmektedir. Çoklu-bağlantı (MC) fonksiyonun katkısı CoMP-NOMA ve CoMP-OMA ağlarında irdelenmektedir. Bu incelemeler, bulut ve dağıtık fiziksel mimariler altında da gerçekleştirilerek karşılaştırılmaktadır. D-RAN mimarinin ihtiyaç duyduğu dağıtık RRM veya merkezi olmayan RRM algoritmaları önerilmektedir.

## 6.2 ÖNERİLEN EK ALIşMALAR

- decRRM çalışmasında,  $I_{max}$  değerlerinin seçiminde, hata payları hesaplanarak hassasiyet çalışması yapılacaktır.
- Çok taşıyıcılı NOMA'da RB başına kaç kullanıcı desteklenebileceği farklı mimariler altında incelenebilir. Literatürdeki CoMP-NOMA çalışmalarında kullanılan kullanıcı gruplandırma algoritmalarında, RB başına hizmet verilen kullanıcı sayısı için bir eniyileme yapılmamakta, önceden belirlenen bir sayı için kanal kazançlarının büyüklükleri ile belirlenmektedir. Burada kullanıcıların kanal katsayılarının ilintileri ve dikgenliklerine göre NOMA topaklarında bulunabilecek

kullanıcı sayısı eniyiye yakın olarak bulunabilir. Böylece eniyiye yakın hibrit bir NOMA çözümü önerilebilir.

- Tez kapsamında, ideal SIC işlemi yapıldığı kabul edilmektedir, ancak pratik SIC uygulamaları NOMA sistemlerinin başarımını etkileyebilmektedir. SIC işleminde kodçözümü için gerekli SNR değerleri eniyileme problemine eklenebilir. Özellikle yüksek kullanıcı sayısı ile SIC'in hata yayılımı da artacaktır, ve pratikteki etkisi incelenebilir. İdeal olmayan SIC uygulamalarının bir NOMA topağında desteklenen kullanıcı sayısına da etkisi olacaktır.
- dRRM algoritmasının başarımını cRRM'e yakınsamasını sağlayacak düzenlemeler yapılması önemli bir katkı sağlayacaktır.
- Koordinasyon seviyelerinde, bilgi paylaşımı sırasındaki kayıplar da dikkate alınarak bir inceleme yapılması özellikle C-RAN mimarisi için oldukça önemli bir katkı olacaktır.
- Tez kapsamında eMBB bağlamında çalışılmaktadır; ancak çok fazla cihazın kullanıldığı (mMTC) senaryolarında, düşük  $P_{\max}$  değerlerinde, ölçeklenebilirlik problemlerinin de incelenmesi önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Benjebbour, A., Saito, Y., Kishiyama, Y., Li, A., Harada, A., Nakamura, T., Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access, in *ISAPCS 2013 - 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 770–774, **2013**.
- [2] Horn, R. A., Johnson, C. R., *Matrix analysis*, Cambridge University Press, **1990**.
- [3] Jain, R., Chiu, D., Hawe, W. R., *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*, cs.NI/9809, Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation Hudson, MA, **1984**.
- [4] Han, C., Harrold, T., Armour, S., Krikidis, I., Videv, S., Grant, P. M., Haas, H., Thompson, J. S., Ku, I., Wang, C., Le, T. A., Nakhai, M. R., Zhang, J., Hanzo, L., Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks, *IEEE Communications Magazine*, 49, 6, 46–54, June, **2011**.
- [5] ITU,, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, *Recommendation ITU*, 0, 21, **2015**.
- [6] 5GPPP,, Deliverable 1.5 METIS project, Updated scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system with recommendations for future investigations,” Tech. Rep. ICT-317669, METIS, **2015**.
- [7] Fallgren, M., Timus, B., Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system,” Tech. Rep. ICT-3176699, METIS, **2013**.
- [8] Bernardos, C. J., Dugeon, O., Galis, A., Morris, D., Simon, C., Szabó, R., 5G Exchange (5GEx) – Multi-domain Orchestration for Software Defined Infrastructures, *Eucnc2015*, 4, 5, 2, **2015**.
- [9] 5GPPP,, EU PROJECT 5G SONATA – View on 5G Architecture,” Tech. Rep., **2016**.
- [10] 5GPPP,, EU PROJECT 5G NORMA – Deliverable 3.1 Functional Network Architecture and Security Requirements,” Tech. Rep., **2015**.
- [11] Parker, M. C., Koczian, G., Adeyemi-Ejeye, F., Quinlan, T., Walker, S. D., Legarrea, A., Siddiqui, M. S., Escalona, E., Spirou, S., Kritharidis, D., Habel, K., Jungnickel, V., Trouva, E., Kourtis, A., Liu, Y., Sander Frigau, M., Point, J. C., Lyberopoulos, G., Theodoropoulou, E., Filis, K., Rokkas, Th, Neokosmidis, I., Levi, D., Zetserov, E., Foglar, A., Ulbricht, M., Peternel, B., Gustincic, D., CHARISMA: Converged heterogeneous advanced 5G cloud-RAN architecture for intelligent and secure media access, in *EUCNC 2016 - European Conference on Networks and Communications*. IEEE, 240–244, **2016**.

- [12] Ravanshid, A., Rost, P., Michalopoulos, D. S., Phan, V. V., Bakker, H., Aziz, D., Tayade, S., Schotten, H. D., Wong, S., Holland, O., Multi-connectivity functional architectures in 5G, in *2016 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC 2016*, 187–192, may, **2016**.
- [13] Jungnickel, V., Manolakis, K., Zirwas, W., Panzner, B., Braun, V., Lossow, M., Sternad, M., Apelfröjd, R., Svensson, T., The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G, *IEEE Communications Magazine*, 52, 5, 44–51, **2014**.
- [14] Chih-Lin, I., Huang, J., Duan, R., Cui, C., Jiang, J., Li, L., Recent progress on C-RAN centralization and cloudification, *IEEE Access*, 2, 1030–1039, **2014**.
- [15] 5GPPP, „Deliverable 6.4 – Final report on architecture,” Tech. Rep. ICT-317669, METIS, **2015**.
- [16] Jungnickel, V., Habel, K., Parker, M., Walker, S., Bock, C., Riera, J. F., Marques, V., Levi, D., Software-defined open architecture for front- and backhaul in 5G mobile networks, in *International Conference on Transparent Optical Networks*, 1–4, **2014**.
- [17] Dötsch, U., Doll, M., Mayer, H. P., Schaich, F., Segel, J., Sehier, P., Quantitative analysis of split base station processing and determination of advantageous architectures for LTE, *Bell Labs Technical Journal*, 18, 1, 105–128, **2013**.
- [18] Wübben, D., Rost, P., Bartelt, J. S., Lalam, M., Savin, V., Gorgoglione, M., Dekorsy, A., Fettweis, G., Benefits and impact of cloud computing on 5g signal processing: Flexible centralization through cloud-RAN, *IEEE Signal Processing Magazine*, 31, 6, 35–44, **2014**.
- [19] Gomes, N. J., Jungnickel, V., Chanclou, P., Elbers, J., Turnbull, P., A Flexible, Ethernet Fronthaul for 5th Generation Mobile and Beyond, in *Optical Fiber Communication Conference*, **2016**.
- [20] De La Oliva, A., Perez, X. C., Azcorra, A., Di Giglio, A., Cavaliere, F., Tiegelbegg, D., Lessmann, J., Haustein, T., Mourad, A., Iovanna, P., Xhaul: Toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks, *IEEE Wireless Communications*, 22, 5, 32–40, **2015**.
- [21] Venkatesan, S., Lozano, A., Valenzuela, R., Alcatel-lucent, Bell Labs, Overcoming Intercell Interference in Indoor Wireless Systems, *Proc. 41st Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, 83–87, **2007**.
- [22] 3GPP, „Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects,” Tech. Rep. V.11.1.0, 3GPP TR 36.819, **2011**.
- [23] Barbieri, A., Gaal, P., Geirhofer, S., Ji, T., Malladi, D., Wei, Y., Xue, F., Coordinated downlink multi-point communications in heterogeneous cellular networks, in *2012 Information Theory and Applications Workshop, ITA 2012 - Conference Proceedings*, 7–16, **2012**.

- [24] Ding, Z., Yang, Z., Fan, P., Poor, H. V., On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users, *IEEE Signal Processing Letters*, 21, 12, 1501–1505, **2014**.
- [25] Saito, Y., Benjebbour, A., Kishiyama, Y., Nakamura, T., System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA), in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 611–615, **2013**.
- [26] Higuchi, K., Kishiyama, Y., Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink, in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 1–5, **2013**.
- [27] Tse, D., Viswanath, P., *Fundamentals of Wireless Communication 1*, Cambridge university press, **2004**.
- [28] Yu, F. R., Zhang, X., Leung, V. C. M., *Green communications and networking*, CRC Press, **2012**.
- [29] Global e-Sustainability Initiative,, Using ICTs to tackle climate change, **2010**.
- [30] The Climate Group,, SMART 2020 : Enabling the low carbon economy in the information age, **2008**.
- [31] Monserrat, J. F., Martin S., D., Maternia, M., Weber, A., Agyapong, P., Rosowski, T., Zimmerman, G., Fallgren, M., Sharma, S., Kousaridas, A., Diğerleri,, D2.1 Performance evaluation framework, **2016**.
- [32] Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C.K., Zhang, J. C., What will 5G be?, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32, 6, 1065–1082, **2014**.
- [33] Samarakoon, S., Bennis, M., Saad, W., Debbah, M., Latva-Aho, M., Ultra dense small cell networks: Turning density into energy efficiency, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34, 5, 1267–1280, may, **2016**.
- [34] Liu, C., Natarajan, B., Xia, H., Small Cell Base Station Sleep Strategies for Energy Efficiency, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 3, 1652–1661, **2016**.
- [35] Chen, S., Qin, F., Hu, B., Li, X., Chen, Z., User-centric ultra-dense networks for 5G: Challenges, methodologies, and directions, *IEEE Wireless Communications*, 23, 2, 78–85, **2016**.
- [36] Auer, G., Blume, O., Giannini, V., Istvan, G., Imran, M. A., Ylva, J., Katranaras, E., Magnus, O., TI, D. S., Per, S., ve diğerleri,, Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown,” Tech. Rep. INFSO–ICT–247733 Earth, **2012**.
- [37] Lopez-Perez, D., Guvenc, I., De La Roche, G., Kountouris, M., Quek, T. Q. S., Zhang, J., Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks, *Wireless Communications, IEEE*, 18, 3, 22–30, **2011**.

- [38] Boudreau, G., Panicker, J., Guo, N., Chang, R., Wang, N., Vrzic, S., Interference Coordination and Cancellation for 4G networks, *IEEE Communications Magazine*, 47, 4, 74–81, **2009**.
- [39] Rahman, M., Yanikomeroglu, H., Enhancing cell-edge performance: A downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9, 4, 1414–1425, **2010**.
- [40] Liu, W., Ng, S. X., Hanzo, L., Multicell cooperation based SVD assisted multi-user MIMO transmission, in *IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, 1–5, **2009**.
- [41] Dahrouj, H., Yu, W., Coordinated beamforming for the multicell multi-antenna wireless system, *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 9, 5, 1748–1759, **2010**.
- [42] Venturino, L., Prasad, N., Wang, X., Coordinated scheduling and power allocation in downlink multicell OFDMA networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58, 6, 2835–2848, **2009**.
- [43] Huang, H., Trivellato, M., Performance of multiuser MIMO and network coordination in downlink cellular networks, in *Proceedings of the 6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, WiOpt 2008*. IEEE, 85–90, **2008**.
- [44] Zhang, J., Chen, R., Andrews, J. G., Ghosh, A., Heath, R. W., Networked MIMO with clustered linear precoding, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8, 4, 1910–1921, **2009**.
- [45] Foschini, G. J., Karakayali, K., Valenzuela, R. A., Coordinating multiple antenna cellular networks to achieve enormous spectral efficiency, *IEEE Proc. Commun.*, 153, 4, 548–555, **2006**.
- [46] Jing, S., Tse, D. N. C., Soriaga, J. B., Hou, J., Smees, J. E., Padovani, R., Multicell downlink capacity with coordinated processing, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, **2008**.
- [47] Saleh, A. A. M., Rustako, A. J., Roman, R. S., Distributed Antennas for Indoor Radio Communications, *IEEE Transactions on Communications*, 35, 12, 1245–1251, **1987**.
- [48] Yanikömeroglu, H., Sousa, E. S., CDMA Distributed Antenna System for Indoor Wireless Communications, in *Universal Personal Communications, 1993. Personal Communications: Gateway to the 21st Century. Conference Record., 2nd International Conference on*. IEEE, 2, 990–994, **1993**.
- [49] Yanikömeroglu, H., Sousa, E. S., CDMA sectorized distributed antenna system, in *IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications*. IEEE, 3, 792–797, **1998**.
- [50] Yanikömeroglu, H., Sousa, E. S., Antenna gain against interference in CDMA macrodiversity systems, *IEEE Transactions on Communications*, 50, 8, 1356–1371, **2002**.

- [51] Liang, X., Lin, D., Hairuo, Z., Shidong, Z., Yan, Y., Information-theoretic capacity analysis in MIMO distributed antenna systems, in *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring*. IEEE, 1, 779–782, **2003**.
- [52] Wang, T., Wang, Y., Sun, K., Chen, Z., On the performance of downlink transmission for distributed antenna systems with multi-antenna arrays, in *IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, 1–5, **2009**.
- [53] Ling, L., Wang, T., Wang, Y., Shi, C., Schemes of power allocation and antenna port selection in OFDM distributed antenna systems, in *IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, 1–5, **2010**.
- [54] Park, J., Song, E., Sung, W., Capacity analysis for distributed antenna systems using cooperative transmission schemes in fading channels, *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 8, 2, 586–592, **2009**.
- [55] Choi, W., Andrews, J. G., Downlink performance and capacity of distributed antenna systems in a multicell environment, *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6, 1, 69–73, **2007**.
- [56] Ahmad, T., Gohary, R., Yanikomeroğlu, H., Ai-Ahmadi, S., Boudreau, G., Coordinated max-min fair port selection in a multi-cell distributed antenna system using semidefinite relaxation, *IEEE International Conference on Communications*, 11, 5, 3616–3620, **2012**.
- [57] Papadimitriou, C. H., Steiglitz, K., *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*, Courier Dover Publications, **1998**.
- [58] Vandenberghe, L., Boyd, S., Semidefinite programming, *SIAM review*, 38, 1, 49–95, **1996**.
- [59] Grant, M, Boyd, S, CVX: Matlab software for disciplined convex programming, **2008**.
- [60] He, C., Sheng, B., Zhu, P., You, X., Li, G. Y., Energy-and spectral-efficiency tradeoff for distributed antenna systems with proportional fairness, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31, 5, 894–902, **2013**.
- [61] He, C., Li, G. Y., Zheng, F., You, X., Energy-efficient resource allocation in OFDM systems with distributed antennas, *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 63, 3, 1223–1231, **2014**.
- [62] Hasan, Z., Boostanimehr, H., Green Cellular Networks : A Survey , Some Research Issues and Challenges, *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 13, 4, 2009–2010, **2013**.
- [63] Feng, D., Jiang, C., Lim, G., Cimini Jr, L. J., Feng, G., Li, G. Y., A survey of energy-efficient wireless communications, *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 15, 1, 167–178, **2013**.

- [64] Benjebbovu, A., Li, A., Saito, Y., Kishiyama, Y., Harada, A., Nakamura, T., System-level performance of downlink noma for future lte enhancements, in *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 66–70, Dec, **2013**.
- [65] Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A., Higuchi, K., Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access, in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 0–4, **2013**.
- [66] Ding, Z., Fan, P., Poor, H. V., Impact of User Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 8, 6010–6023, **2016**.
- [67] Timotheou, S., Krikidis, I., Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems, *IEEE Signal Processing Letters*, 22, 10, 1647–1651, **2015**.
- [68] Liu, Y., Ding, Z. and Eikashlan M., Poor, H. V., Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems, in *IEEE 23rd European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2015*, 19, 1999–2003, **2015**.
- [69] Kimy, B., Lim, S., Kim, H., Suh, S., Kwun, J., Choi, S., Lee, C., Lee, S., Hong, D., Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system, in *Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM*, number 2012, 1278–1283, **2013**.
- [70] Ding, Z., Adachi, F., Poor, H. V., The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15, 1, 537–552, **2016**.
- [71] Sun, Q., Han, S., Chin-Lin, I., Pan, Z., On the Ergodic Capacity of MIMO NOMA Systems, *IEEE Wireless Communications Letters*, 4, 4, 405–408, **2015**.
- [72] Endo, Y., Kishiyama, Y., Higuchi, K., Uplink non-orthogonal access with MMSE-SIC in the presence of inter-cell interference, in *Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems*, 261–265, **2012**.
- [73] Al-Imari, M., Xiao, P., Imran, M. A., Tafazolli, R., Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks, in *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems, ISWCS 2014 - Proceedings*, 781–785, **2014**.
- [74] Zhang, N., Wang, J., Kang, G., Liu, Y., Uplink Nonorthogonal Multiple Access in 5G Systems, *IEEE Communications Letters*, 20, 3, 458–461, **2016**.
- [75] Zhao, J., Liu, Y., Chai, K. K., Nallanathan, A., Chen, Y., Han, Z., Resource allocation for non-orthogonal multiple access in heterogeneous networks, in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6, **2017**.
- [76] Fu, Y., Chen, Y., Sung, C. W., Distributed Power Control for the Downlink of Multi-Cell NOMA Systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16, 9, 6207–6220, **2017**.

- [77] Liu, Y., Qin, Z., El Kashlan, M., Nallanathan, A., Mccann, J. A., Non-Orthogonal Multiple Access in Large-Scale Heterogeneous Networks, 35, 12, 2667–2680, **2017**.
- [78] Choi, J., Non-orthogonal multiple access in downlink coordinated two-point systems, *IEEE Communications Letters*, 18, 2, 313–316, **2014**.
- [79] Cover, T. M., Thomas, J. A., *Elements of information theory*, John Wiley & Sons, **2012**.
- [80] Alamouti, S. M., A simple transmit diversity technique for wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16, 8, 1451–1458, Oct, **1998**.
- [81] Tian, Y., Nix, A. R., Beach, M., On the Performance of Opportunistic NOMA in Downlink CoMP Networks, *IEEE Communications Letters*, 20, 5, 998–1001, **2016**.
- [82] Beylerian, A., Coordinated Non-Orthogonal Multiple Access, **2016**.
- [83] Liu, F., Mahonen, P., Petrova, M., Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access, in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 2015-Decem*, 1127–1131, **2015**.
- [84] Li, A. and Harada A., Kayama, H., A novel low computational complexity power assignment method for non-orthogonal multiple access systems, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 97, 1, 57–68, **2014**.
- [85] Tian, Y., Nix, A., Beach, M., On the Performance of a Multi-Tier NOMA Strategy in Coordinated Multi-Point Networks, *IEEE Communications Letters*, 21, 11, 2448–2451, **2017**.
- [86] Shin, W., Vaezi, M., Lee, B., Love, D. J., Lee, J., Poor, H. V., Non-orthogonal multiple access in multi-cell networks: Theory, performance, and practical challenges, *IEEE Communications Magazine*, 55, 10, 176–183, **2017**.
- [87] Yang, Z., Pan, C., Xu, W., Pan, Y., Chen, M., El Kashlan, M., Power Control for Multi-Cell Networks with Non-Orthogonal Multiple Access, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17, 2, 927–942, **2018**.
- [88] Ali, M. S., Hossain, E., Kim, D. I., Coordinated Multipoint Transmission in Downlink Multi-Cell NOMA Systems: Models and Spectral Efficiency Performance, *IEEE Wireless Communications*, 25, 2, 24–31, **2018**.
- [89] Ali, M. S., Hossain, E., Al-Dweik, A., Kim, D. I., Downlink Power Allocation for CoMP-NOMA in Multi-Cell Networks, *IEEE Transactions on Communications*, 6778, c, 1–17, **2018**.
- [90] Sun, Q., Han, S. and I Chin L., Pan, Z., Energy efficiency optimization for fading MIMO non-orthogonal multiple access systems, in *IEEE International Conference on Communications, 2015-Septe*, 2668–2673, **2015**.

- [91] Fang, F., Zhang, H., Cheng, J., Leung, V. C. M., Energy Efficiency of Resource Scheduling for Non-Orthogonal Multiple Access ( NOMA ) Wireless Network, **2016**.
- [92] Zhang, Y., Wang, H. M., Zheng, T. X., Yang, Q., Energy-Efficient Transmission Design in Non-orthogonal Multiple Access, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66, 3, 2852–2857, **2017**.
- [93] Lei, L., Yuan, D., Ho, C. K., Sun, S., Power and Channel Allocation for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems: Tractability and Computation, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15, 12, 8580–8594, **2016**.
- [94] Liu, Z., Kang, G., Lei, L., Zhang, N., Zhang, S., Power Allocation for Energy Efficiency Maximization in Downlink CoMP Systems with NOMA, *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1–6, **2017**.
- [95] Patel, P., Holtzman, J., Analysis of a Simple Successive Interference Cancellation Scheme in a DS/CDMA System, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 12, 5, 796–807, **1994**.
- [96] Report ITU-R M.2135-1,, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMTadvanced,” Tech. Rep. 3, ITU, Tech. Rep, **2009**.
- [97] Maternia, M. (Nokia), El Ayoubi, S. E. (Orange), 5G PPP use cases and performance evaluation models,” Tech. Rep. ICT-3176699, METIS, **2016**.