



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GELECEK NESİL KABLOSUZ İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİNDE
ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI (ÇGÇÇ) TEKNİKLERLE
PERFORMANS İYİLEŞTİRİLMESİ**

OSMAN DİKMEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. SELMAN KULAÇ**

DÜZCE, 2017

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GELECEK NESİL KABLOSUZ İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİNDE
ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI (ÇGÇÇ) TEKNİKLERLE
PERFORMANS İYİLEŞTİRİLMESİ

Osman DİKMEN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Selman KULAÇ

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Selman KULAÇ

Düzce Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hakan KAYA

Bülent Ecevit Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞİMŞEK

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 04/08/2017

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

04 Ağustos 2017

(İmza)

Osman DİKMEN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Selman KULAÇ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, çalışma arkadaşlarıma ve bu süreçte her zaman yanımda olan değerli eşim Zeynep AKIN DİKMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2017.06.03.530 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

04 Ağustos 2017

Osman DİKMEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR.....	IX
SİMGELER.....	X
ÖZET	XI
ABSTRACT.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. KABLOSUZ HÜCRESEL AĞLARIN GELİŞİMİ	3
2.1.1. Birinci Nesil Teknoloji.....	3
2.1.2. İkinci Nesil Teknoloji	4
2.1.3. Üçüncü Nesil Teknoloji	4
2.1.4. Dördüncü Nesil Teknoloji	5
2.1.5. Beşinci Nesil Teknoloji	6
2.1.5.1. <i>Veri Hızı</i>	7
2.1.5.2. <i>Gecikme</i>	9
2.1.5.3. <i>Enerji ve Maliyet Verimliliği</i>	10
2.1.5.4. <i>Spektrum Verimliliği</i>	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO’NUN TEORİK YAKLAŞIMI.....	16
3.1.1. Yukarı Bağlantı İletimi	18
3.1.2. Aşağı Bağlantı İletimi	19
3.2. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO’NUN AVANTAJLARI	21
3.2.1. Sistem Kapasitesinde, Spektrum ve Enerji Verimliliğinde Artış.....	21
3.2.2. Maliyet Etkin ve Enerji Verimli (Düşük Güç Tüketimli) Bileşenler	22
3.3. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO’NUN ZORLUKLARI	24
3.3.1. Karşılıklı Anten Bağlantısı ve Mekansal Korelasyon.....	24
3.3.2. Donanım Bozukluklarının Zorluğu.....	25
3.3.3. Düşük Karmaşıklık Doğru Kanal Tahmini	25

3.3.4. Sınırlı Geribildirimle Çalışma	26
3.4. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO’NUN 5G’DEKİ YERİ.....	26
3.4.1. 5G için Veri Hızı	27
3.4.2. 5G için Gecikme	27
3.4.3. 5G için Enerji ve Maliyet	27
3.4.4. 5G için Spektrum Verimliliği.....	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	29
4.1. GİRİŞ	29
4.2. SPEKTRUM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNİN ÖNEMİ	29
4.2.1. Çok Kullanıcılı MIMO İletişimi	30
4.2.2. Büyük Ölçek MIMO Kavramı.....	31
4.3. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO İÇİN TEORİKSEL ANALİZ	33
4.3.1. Doğrusal Algılama İle Yukarı Bağlantı	33
4.3.1.1. <i>Literatür çıkarımı 1</i>	35
4.3.1.2. <i>Literatür çıkarımı 2</i>	38
4.3.1.3. <i>Literatür çıkarımı 3</i>	39
4.3.2. Doğrusal Ön Kodlama ile Aşağı Bağlantı.....	40
4.3.2.1. <i>Literatür çıkarımı 4</i>	43
4.3.2.2. <i>Literatür çıkarımı 5</i>	43
4.4. ELDE EDİLEN SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ KAZANÇLARI	44
4.4.1. Sabit Kullanıcılı, Değişen BS Anten Sayılı Büyük Ölçek MIMO Sisteminde Spektrum Verimliliği	45
4.4.2. TDD ve FDD Modunda Farklı İşleme Şemaları ve Farklı CSI ile Spektrum Verimliliği.....	46
4.4.3. Pilot Yeniden Kullanım Faktörleri Kullanılarak Sabit BS Anten Sayılı, Değişen Kullanıcı Sayılı Büyük Ölçek MIMO Sisteminde Spektrum Verimliliği	50
4.4.4. 5G Teknolojisinde Büyük Ölçek MIMO ile Artan Spektrum Verimliliği	54
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
6. KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. 5G Teknolojisinden Beklenen İyileştirmeler [6].....	7
Şekil 3.1. Büyük Ölçek MIMO Aşağı Bağlantı (a) ve Yukarı Bağlantı (b) [2].....	15
Şekil 3.2. H Kanalında MIMO İletimi.....	16
Şekil 3.3. MU-MIMO Sistemi [46].	18
Şekil 3.4. Hibrit Analog/Dijital Mimariye Sahip bir BS [56].....	23
Şekil 3.5. Anahtar Kullanılan Hibrit Mimariye Sahip Alıcı [57].....	23
Şekil 3.6. Anahtar ve Faz Kaydırıcı Kombinasyonu Kullanılan Hibrit Mimari [58].	24
Şekil 4.1. Büyük Ölçek MIMO İletim Protokolünün Gösterimi [28].....	32
Şekil 4.2. Bir MIMO Sisteminde Doğrusal Algılama ile Yukarı Bağlantı İletiminin Blok Diyagramı.	37
Şekil 4.3. Çok Hücreli MIMO Sisteminde Doğrusal Ön Kodlama İle Aşağı Bağlantı İletiminin Blok Diyagramı.	42
Şekil 4.4. Altıgen Hücreli Hücre Modellerin Gösterimi [85].....	44
Şekil 4.5. Sabit Kullanıcı, Değişen BS Anten Sayılı Büyük Ölçek MIMO Sisteminde Spektrum Verimliliği.....	45
Şekil 4.6. MR Şeması Kullanılarak TDD ve FDD Modunda Farklı CSI İle Spektrum Verimliliği.	48
Şekil 4.7. ZF Şeması Kullanılarak TDD ve FDD Modunda Farklı CSI İle Spektrum Verimliliği.	49
Şekil 4.8. MR Algılaması İçin Farklı Pilot Yeniden Kullanım Faktörlerindeki Spektrum Verimliliği.....	52
Şekil 4.9. ZF Algılaması İçin Farklı Pilot Yeniden Kullanım Faktörlerindeki Spektrum Verimliliği.....	53
Şekil 4.10. ZF ve MR Algılamalı, Pilot Yeniden Kullanım Faktörü $f = 3$ ve 5 dB SNR'a Sahip BS Anten Sayısına Bağlı Olarak Spektrum Verimliliği.....	55

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. 3G ve 4G'nin Karşılaştırılması [8].	5
Çizelge 3.1. Teoriksel Yaklaşımda Kullanılan İfadelerin Karşılıkları [40], [49].	21



KISALTMALAR

1G	First generation (Birinci nesil)
2G	Second generation (İkinci nesil)
3G	Third generation (Üçüncü nesil)
4G	Fourth generation (Dördüncü nesil)
5G	Fifth generation (Beşinci nesil)
BS	Base station (Baz istasyonu)
CDMA	Code division multiple access (Kod bölmeli çoklu erişim)
CSI	Channel state information (Kanal durum bilgisi)
ÇGÇÇ	Çoklu giriş çoklu çıkış
FDD	Frequency division duplex (Frekans bölmeli çiftleme)
FM	Frekans modülasyonu
LAS-CDMA	Large area synchronized-Code division multiple Access (Geniş alanlı senkronize edilmiş- Kod bölmeli çoklu erişim)
LMMSE	Linear minimum mean square error (Doğrusal minimum ortalama karesel hata)
LTE	Long term evolution (Uzun vadeli evrim)
HetNet	Heterogeneous network (Heterojen ağ)
MIMO	Multiple input multiple output (Çoklu giriş çoklu çıkış)
MMSE	Minimum mean square error (Minimum ortalama karesel hata)
MR	Maximal ratio (Maksimum oran)
MRC	Maximum ratio combining (Maksimum oran birleştirici)
MSC	Mobile switching center (Mobil anahtarlama merkezi)
MU-MIMO	Multi user multiple input multiple output (Çok kullanıcılı çoklu giriş çoklu çıkış)
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing (Dik frekans bölmeli çoğullama)
PAPR	Peak to average power ratio (Tepe ortalama güç oranı)
QAM	Quadrature amplitude modulation (Karesel genlik modülasyonu)
SISO	Single input single output (Tekli giriş tekli çıkış)
SNR	Signal noise ratio (Sinyal gürültü oranı)
SV	Spektrum verimliliği
TDD	Time division duplexing (Zaman bölmeli çiftleme)
TDMA	Time division multiple access (Zaman bölmeli çoklu erişim)
TTI	Transmission time intervals (İletim süre aralığı)
UE	User equipment (Kullanıcı ekipmanı)
ZF	Zero forcing (Sıfır zorlama)

SİMGELER

$(.)^T$	Transpoz
$[...]_{k,k}$	Bir matrisin k. diyagonal elemanı
$\hat{h}_{i,k}^l$	Kanal tahmini
$\tilde{x}_{l,k}$	BS l'de tespit edilen sinyal
$h_{i,k}^l$	Gerçek kanal tepkisi
n_d	Ek Gürültü
n_u	Sıfır ortalamalı bir gürültü vektörü
\mathbb{P}_j	j hücresi ile aynı gruba ait hücre indeksleri kümesi
x_d	BS tarafından iletilen sinyal vektörü
x_u	Tüm kullanıcıların sinyal vektörü
\mathcal{C}^M	M boyutlu sayılar kümesi
$P_{i,k}$	i.hücredeki k kullanıcısının gönderim gücü
$P_{l,t}$	Hücre l'deki t kullanıcısı için iletim gücü
V_l	BS l'deki saptama vektörü
$d_{i,k,l,n}$	Büyük ölçekli sönümleme katsayısı
$g_{i,k,l,n}$	Karmaşık küçük ölçekli sönümleme katsayısı
p_d	Aşağı bağlantı iletim gücü
p_u	Yukarı bağlantı iletim gücü
s_k	k. kullanıcıdan iletilen sinyal
$s_{l,t}$	Hücre l'deki t kullanıcısı için tasarlanan yük sembolü
$v_{l,k}$	Doğrusal algılama vektörü
$w_{l,t}$	Her bir kullanıcıya gönderilen sinyalin mekansal yönlendirmesini belirleyen doğrusal ön kodlama vektörü
$x_{i,k}$	Normalleştirilmiş iletim simgesi
$x_{i,t}$	Hücre i'deki t kullanıcısı tarafından iletilen veri simgesi
$x_{l,k}$	Gerçek sinyal
x_l	l hücresinin k kullanıcısındaki alınan sinyal
y_l	Baz istasyonundaki alınan temel bant sinyali
γ^{DL}	Aşağı bağlantı yük iletimi
γ^{UL}	Yukarı bağlantı yük iletimi
τ_c	Tutarlılık aralığına uyan iletim simgeleri sayısı
τ_p	Tutarlılık aralığındaki sembollerin CSI (Kanal Durum Bilgisi) uzunluğu
$\Phi_{i,K}$	i hücresindeki K kullanıcısı tarafından kullanılan pilot matrisi
H	Kanal matrisi
K	Kullanıcı sayısı
L	Hücre sayısı
N	Anten sayısı
λ	Dalga boyu
$Cov\{\dots\}$	Kovaryans
f	Pilot yeniden kullanım faktörü
\mathfrak{X}	QAM (Karesel Genlik Modülasyonu) kümesi

ÖZET

GELECEK NESİL KABLOSUZ İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİNDE ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI (ÇGÇÇ) SİSTEMLERLE PERFORMANS İYİLEŞTİRİLMESİ

Osman DİKMEN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Selman KULAÇ

Ağustos 2017, 64 sayfa

Mobil iletişim sistemlerinin geliştirilmesinin en önemli nedeni sürekli gelişen ihtiyaçlardır. Bu ihtiyaçlar nedeniyle, mobil iletişimden beklenen talepler artmıştır. Başlangıçta, özellikle yalnızca ses iletme kapasitesine sahip sistemler vardı. Ancak son zamanlarda multimedya iletimi ve internet bağlantı yeteneklerine olanak tanıyan yeni sistemler ortaya çıkmıştır. Bu sistemler arasında günümüzde son teknoloji olarak 5. Nesil kablosuz haberleşme yer alacaktır. Gelecek nesil kablosuz haberleşme teknolojilerine katkı yapmak amacıyla yeni teknikler geliştirilmektedir. Bu teknikler arasında, uzun süredir üzerinde çalışılan teknik MIMO (Çok Girişli Çok Çıkışlı) da yer almaktadır. Büyük Ölçek MIMO tekniği, MIMO'nun daha gelişmiş bir versiyonudur. Bu anlamda Büyük Ölçek MIMO tekniğinin de bazı katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Büyük Ölçek MIMO teknolojisi, mevcut şebekelerde olduğu gibi aynı bant genişliği ve baz istasyon yoğunluğunu kullanırken, spektral verimliliği (*bit/s/Hz/Hücre*) artırarak alan veriminde en az on kat iyileşme sağlayabilmektedir. Bu büyük kazançlar, onlarca kullanıcı terminalinin mekansal çoğullamasını mümkün kılmak için baz istasyonlarını onlarca antenli dizilerle donatarak elde edilir. Bu tez çalışmasında, 5G ve ötesi uygulamaları için spektral verimlilikte fayda sağlayacak MIMO yöntemleri üzerinde durulmuş olup ilgili nümerik analizlerle kıyaslamalar yapılarak önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar sözcükler: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (ÇGÇÇ), 5. Nesil, Spektrum verimlilik.

ABSTRACT

PERFORMANCE IMPROVEMENT WITH MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT (MIMO) TECHNIQUES IN NEXT GENERATION WIRELESS COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Osman DİKMEN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and
Electronic Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selman KULAÇ

August 2017, 64 pages

The most important reason for the development of mobile communication systems is the constantly evolving needs. Due to these needs, the demand for mobile communication has increased. Initially, there were only systems with voice transmission capacity in particular. Recently, however, new systems have emerged that allow multimedia transmission and Internet connectivity capabilities. Among these systems, 5th Generation wireless communication will be the modern technology in the future. New techniques have been developed to contribute to the next generation wireless communication technologies. Among these techniques, MIMO (Multiple Input Multi Output), which is a technique that works on long decay, is also included. The Massive MIMO technique is a more advanced version of MIMO. In this sense, the Massive MIMO technique is also expected to provide some improvements. Massive MIMO technology can improve at least ten times the field efficiency by increasing spectral efficiency ($bit/ / Hz/Cell$) while using the same bandwidth and base station density as in existing networks. These great advantages are gained by equipping base stations with tens antennas arrays to enable spatial multiplexing of dozens of user terminals. In this thesis study, MIMO methods which will benefit spectral efficiency for 5G and beyond applications have been emphasized and some suggestions have been made by making comparisons with related numerical analysis.

Keywords: Multiple Input Multiple Output (MIMO), 5G, Spectrum efficiency.

1. GİRİŞ

Elektromanyetik dalga teorisinin ortaya atıldığı zamandan itibaren sürekli olarak gelişen kablosuz iletişim teknolojileri son zamanlarda gözle görülen bir atılım sergilemiştir. Bu atılım, 1970’li yıllarda kullanılmaya başlayan 1.Nesil (1G) teknolojisinden 2020 yılında kullanıma hazır olması planlanan 5.Nesil (5G) teknolojisine kadar gelmektedir [1]. 2020 yılında 50 milyarı aşkın cihazın bulut bilişim üzerinden bağlantılı olacağı tahmin edildiğinden dolayı 5G teknolojisinin bir an önce kullanılmaya başlanması düşünülmektedir [1]. Ayrıca bu cihazların birbirleriyle veri alış-verişlerinin istenilen zamanda, istenilen yerde gerçekleşmesinin önemi veri aktarım hızında ciddi iyileştirmelerin yapılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu kapsamda 5G teknolojisi önemli bir gelişme olacaktır.

Kablosuz iletişim teknolojilerinde karşılaşılan sorunlardan biri elektromanyetik spektrumdur. Çünkü kablosuz iletişim veri hacmi gün geçtikçe artmasına rağmen, elektromanyetik spektrum asla artmayacaktır [2]. Diğer bir problem yüksek veri hızı ihtiyacıdır. Örneğin, nesnelerin interneti teknolojisinin gelişmesi düşük veri hızı ile mümkün değildir. Bu sebeple yüksek veri hızına ulaşım, daha etkin ve kaliteli hizmet sağlanması gerekmektedir. Bunların yanında çağımızın en büyük sorunlarından olan enerji verimliliğine yönelik çalışmaların yapılması ve bu sayılan gelişmelerin maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, gelecek çalışmaların konusu veri hızının artırılması, enerji ve spektrum verimliliği ve maliyetlerin düşürülmesi adına olacaktır. Bunu gerçekleştirebileceği düşünülen sistemlerden birisi olan sistem Çok Girişli Çok Çıkışlı, literatürdeki ismiyle MIMO sistemidir. Bu sistem, yüzlerce antenin kullanıldığı Büyük Ölçek MIMO halini almış olup belirtilen alanlarda çeşitli çözümler sunması beklenmektedir. Büyük Ölçek MIMO’nun avantajları hakkındaki değerlendirmelere [3]’te yer verilmiştir. Ayrıca Büyük Ölçek MIMO ile birlikte kullanılması düşünülen bir teknik Dik Olmayan Çoklu Erişim (NOMA) tekniğidir. NOMA’nın ana fikri ise çoklu kullanıcıların aynı anda, frekans ve yayma kodunda eşzamanlı olarak hizmet edilebileceği anlamına gelen çoklu erişim için güç alanını kullanmak olarak belirtilmektedir [4]. Bu teknik özellikle 5G ve ötesi teknolojiler için sağlayabileceği bazı fırsatlar nedeniyle üzerinde durulması beklenilmektedir. Nitekim

NOMA'nın yeniliği; kullanıcıların kanal koşulları durumunu göz ardı ederek yani başka bir deyişle daha kötü kanal koşullarına sahip kullanıcılara dahi daha fazla iletim gücü tahsis edebilmesidir [5].



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kablosuz ağların kullanıldığı birçok alan mevcuttur. En yaygın uygulamalar, evlerde, ofis binalarında veya cep telefonu şebekelerinde bulunan ağları içermektedir. İnsanların kablolu ağlardan ziyade ya da kablolu ağlara ek olarak kablosuz ağlar kullanmasının birçok nedeni vardır. Kabloların yerleştirilmesi gerekmediğinden, kablosuz ağların kurulumu daha kolaydır. Kurulum kolaylığı nedeniyle bir kablosuz ağın maliyeti kablolu bir ağın maliyetinden daha düşüktür. Kablosuz ağların, ek bağlantı kablolarının kurulması gerekmediğinden genişlemesi daha kolaydır. Kablosuz ağların en büyük avantajı, kullanıcının ağa bağlıyken hareket edebilmesidir.

Şu anda kullanımda olan iki ana kablosuz ağ vardır. Birinci tip ağa hücresele ağ denir. Bu tip ağın temel özellikleri arasında, tüm iletişimin bir baz istasyonu tarafından kontrol edilmesi, ağın kapsadığı alanın bölgelere veya hücrelere bölünmesi ve bu verilerin bir baz istasyonu tarafından kontrol edilen bir ağdan çeşitli tekniklerin kullanılmasıyla başka bir ana istasyon tarafından kontrol edilmesi bulunmaktadır [6]. İkinci kablosuz ağ türündeki bir ağ ile, haberleşmeyi kontrol eden herhangi bir baz istasyonu ve spesifik bir yapı yoktur. Bu tür ağların birincil hedefleri, çoklu ve rastgele erişimdir. Çoklu erişim, aynı anda birçok iletişim bağlantısı olabileceği anlamına gelirken, rastgele erişim, ağa istediğiniz zaman yeni bir aygıtın veya düğümün eklenebileceği anlamına gelmektedir [6].

2.1. KABLOSUZ HÜCRESEL AĞLARIN GELİŞİMİ

2.1.1. Birinci Nesil Teknoloji

İlk nesil hücresele kablosuz ağlarda, iletişim kurmak için analog teknolojiler kullanıldı. Aslında, birinci nesil kablosuz mobil iletişim sistemi, dijital teknoloji değil, sadece 1980'lerin başında ses hizmeti için kullanılan analog hücresele telefon sistemidir [7]. 1979'da, dünyadaki ilk hücresele sistem Tokyo, Japonya'daki Nippon Telephone and Telegraph (NTT) tarafından faaliyete geçmiştir. Tüm işlemlerde FM modülasyon kullanılmaktadır. Kullanıcının verileri, bir baz istasyonunu aracılığıyla, verilerin başka bir baz istasyonuna gönderildiği mobil anahtarlama merkezine (MSC-Mobile Switching

Center) ulaşır. Tüm ağ işlemleri MSC'de gerçekleşmektedir [8].

2.1.2. İkinci Nesil Teknoloji

İkinci nesil (2G) kablosuz mobil sistemler dijital hücreli sistemlerdir. Birinci kuşağa kıyasla, ikinci nesil kablosuz sistem, zaman bölme çoklu erişim (TDMA) ve kod bölme çoklu erişim (CDMA) gibi dijital modülasyon şemasını kullanmıştır. İki tekniğe dayanarak üç ana 2G mobil iletişim sistemi vardır. Bunlar TDMA (IS-136), CDMA (IS-95) ve GSM'dir. Tamamen dijital bir sistem olan TDMA (IS 136), 1993 yılında Kuzey Amerika'da konuşlandırılmıştır ancak 824-894 MHz AMPS frekans bandında çalışmaktadır. İkinci nesil sistemlerin birinci kuşak sistemlerden farklı olması baz istasyonlarının MSC'ye bağlanması yerine birçok baz istasyonunun baz istasyonu kontrol cihazlarına (BSC) bağlanması ve BSC'lerin MSC'ye bağlanması yapısıdır. BSC'leri tanıtarak, birinci nesil MSC'nin sorumlu olduğu işlemlerin çoğunu BSC'ye aktarabilmek mümkündür. BSC ve MSC arasında, aynı sistemdeki farklı üreticiler tarafından üretilen bileşenlere izin vermek için standart bir iletişim kuruldu. İkinci nesil sistemler sadece ses için değil, aynı zamanda veri iletimi için de kullanılmaktadır. İkinci nesil sistemler mesaj ve faks iletimlerini gerçekleştirebilirler. Örneğin GSM'de bu sistemler 900 MHz ve 1800 MHz frekans spektrumunu kullanır, zaman bölme çoklu erişime sahip olup uygun şartlarda veri hızı ses iletiminde 150 kilobits / saniye'ye ulaşabilmektedir [8].

2.1.3. Üçüncü Nesil Teknoloji

3G sistemleri hem ses hem de veri için tasarlanmıştır. Başlangıçta amaç, 3G dönemi için tek bir küresel standart (UMTS) elde etmektir, ancak daha sonra Avrupada GSM, CDMA teknolojisi tarafından sorgulandı. EDGE'de (Enhanced Data rate for GSM Evolution), verilerin yüksek hacimli hareketi mümkün olmakla birlikte yine de hava arabirimi üzerindeki paket aktarımı, bir devre anahtarı çağrısı gibi davranmaktaydı. Böylece, devre anahtar ortamında bu paket bağlantı verimliliğinin bir kısmı kaybolabilmekteydi. Dahası, ağların geliştirilmesi için standartlar dünyanın farklı yerlerinde değişim göstermekteydi. Bu nedenle, teknolojik platformdan bağımsız hizmet sunan ve ağ tasarımı standartları aynı küresel düzeyde olan bir ağa geçiş yapmaya karar verildi. Böylece, 3G ortaya çıktı. En az 2 Mbps'lik bir bilgi aktarım hızı sağlayan hizmetleri destekleyen 3G şebekeleri, şebeke operatörlerine gelişmiş spektral verimlilik sayesinde daha fazla şebeke kapasitesi sağlarken kullanıcılara daha geniş bir yelpazede daha gelişmiş hizmetler sunmaktadır [8].

2.1.4. Dördüncü Nesil Teknoloji

4G mobil sistem, tamamen IP (Internet Protocol) tabanlı bir ağ sistemidir. 4G teknolojisi, bir teknolojiye diğerine dolaşım özgürlüğü ve sorunsuz dolaşım sağlamak için mevcut ve gelecekteki mevcut kablosuz ağ teknolojilerini (örneğin OFDM, MC-CDMA, LAS-CDMA ve Network LMDS) entegre etmelidir. Bu, farklı teknolojilere sürekli ve her zaman en iyi şekilde erişerek mobil kullanıcılara multimedya uygulamaları sağlayacaktır. 4G şebekeleri, omurga olarak sabit internet ağlarıyla birkaç radyo erişim şebekesini entegre edebilir. 3. ve 4. Nesil Teknolojilerin bazı yönlerden karşılaştırmaları Çizelge 2.1’de verilmiştir [8].

Çizelge 2.1. 3G ve 4G’nin Karşılaştırılması [8].

Özellik	3G	4G
Hız	2Mbps'ye kadar	Tam hareketlilikte 100Mbps'ye kadar; Düşük hareketlilikte 1Gbps'ye kadar
Hizmetler	Küresel dolaşım zorluk	Sorunsuz dolaşım
Çekirdek Ağ	Geniş alan kavramı Devre ve paket anahtarlama	Geniş bant, tamamen IP tabanlı paket anahtarlama
Teknolojiler	WCDM, CDMA2000, TD- SCDMA	Tüm erişim yakınsaklığı: OFDM, MC-CDMA, LAS- CDMA, Network-LMPS

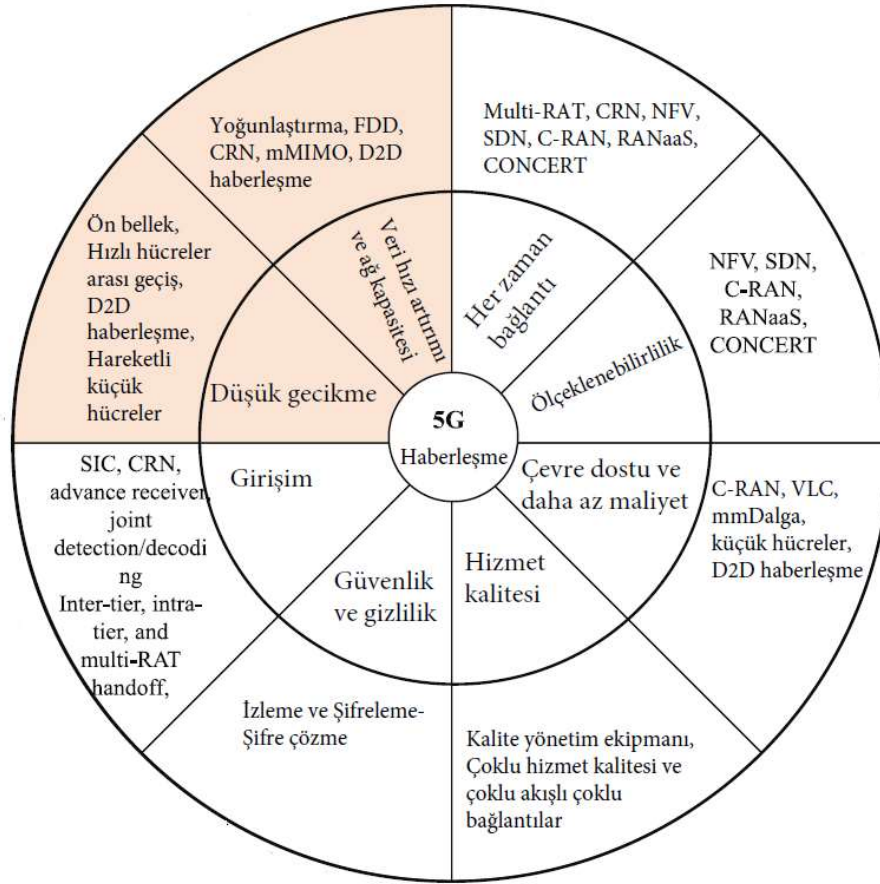
Çekirdek ağ ve radyo erişim ağları arasında bir temel arabirim bulunur ve radyo erişim ağları ile mobil kullanıcılar arasındaki iletişim için bir radyo arabirimi koleksiyonu kullanılır. Bu tür entegrasyon, birden fazla radyo erişim arabirimini, kesintisiz dolaşım ve en iyi bağlantılı hizmetleri sunmak için tek bir ağa birleştirir [9]. Uzun Vadeli Evrim (LTE-Long Term Evolution) ve uzantısı olan LTE-Advanced sistemleri pratik 4G sistemleri olarak piyasaya sürülmüştür [10]. Günümüzde, müşteriler için mobil geniş bant deneyimini daha da geliştirmek için, operatörler LTE-Advanced teknolojilerinin kullanımıyla kendi 4G şebekelerini geliştirmeye devam etmektedir [11]. [11]’deki çalışmadan da görüleceği üzere 4G, LTE, LTE-Advanced teknolojilerini benimsenmesiyle mevcut şebekelerin veri hızlarının artırılması mümkün olmuştur.

2.1.5. Beşinci Nesil Teknoloji

Kullanıcıların sürekli olarak artan talepleri, kablosuz haberleşme sisteminin hızlı bir şekilde ilerlemesinin nedenidir ve böylece şu günlerde kullanılmakta olan 4G, 4.5G sistemler artık yerlerini 5G'ye adım adım bırakacaktır. Ayrıca servis sağlayıcıları kullanıcılarına daha kaliteli hizmet vermek için sürekli bir çalışma içerisindeyler. Bundan dolayı 5G sürecinin ilerlemesine de yardımcı olmaktadırlar. 5G teknolojisinden beklenen talepler, iyileştirmeler, kazanımlar kesin olarak belirlenmektedir. Bu doğrultuda ortaya çıkacak zorlukların üstesinden gelebilmek için çalışmalar devam etmektedir. Endüstriye yönelik çalışmalar çok yeterli seviyede olmasa dahi, akademik alanda METIS [12] ve 5GNOW [13] projeleri ihtiyaç duyulan standartları oluşturabilmek için çalışmalarını sürdürmektedir. 5G teknolojisinin mimari yapısı ve işlevsel gereklilikleri henüz belirlenmemiştir. Bu amaca yönelik olarak başlatılan projelerden bazıları şunlardır: METIS [12], 5GNOW [13], EARTH [14], MOTO [15]. 2020 yılı civarlarında tamamlanması planlanan 5G [1] için yapılan planlamalara göz atacak olursak Şekil 2.1'de verilen ana maddeler karşımıza çıkacaktır [6]. Bunlar aşağıda açıklanmıştır. Gösterilmiş olan bu şekilde 5G ağlarının geliştirilmesi için bazı gereksinimler belirtilmektedir. Bu gereksinimler için üretilecek çözümler de önerilmiştir. En içteki katmanda 5G şebekeleri için ihtiyaç duyulan gereksinimler gösterilmektedir. En dıştaki katmanda ise bu gereksinimlerin çözümleri sunulmuştur. Renkli kısım olarak verilen bölümde ise 5G için birinci öncelik olabilecek konuları belirtilmektedir. Ayrıca bunlara ek olarak 5G için uygulama alanlarına telefonlar, akıllı televizyonlar, akıllı kameralar, tabletler gibi kişisel kullanımların yanı sıra; akıllı şebekeler, otomasyon sistemleri, sağlık sistemleri, güvenlik sistemleri gibi endüstriyel kullanım olarak örnek verilebilir.

5G'de belirtilmiş olan bazı zorlukları gidermek ve 5G sistem gereksinimlerini karşılamak için hücresel mimari tasarımında önemli bir değişikliğe de ihtiyaç duyulmaktadır. Kablosuz kullanıcıların zamanlarının yaklaşık %80'i bina içinde, geri kalan %20'lik kısmı da bina dışında geçmektedir [16]. Mevcut hücresel mimari, mobil kullanıcılar ile iletişim kuran bir hücrenin ortasında, ister bina içinde ister bina dışında olmaları fark etmeksizin bina dışındaki BS'yi kullanır. Bina dışındaki BS ile iletişim kuran bina içi kullanıcılar için sinyallerde çeşitli sebeplerle birlikte kayıplar oluşmasından dolayı veri hızında ve spektral verimlilikte önemli ölçüde kayıplar meydana gelmektedir [10]. Dolayısıyla 5G'de bina içi ve bina dışı senaryoların

farklılaşması durumu da ön plandadır.



Şekil 2.1. 5G Teknolojisinden Beklenen İyileştirmeler [6].

2.1.5.1. Veri Hızı

Kablosuz haberleşmede en önemli beklenti veri hızının kullanıcıların isteklerini yeterli seviyede karşılayabilecek ölçüde olmasıdır. Dolayısıyla 5G teknolojisinin ilgilenmesi, çözüm sunması ve desteklemesi gereken öncelikli konularından birisi veri hızıdır. Nitekim [17]'de; 5G teknolojisinin saniyede gigabit seviyesindeki yüksek hızlara ulaşılabilir ve gerçekleştirilebilir geniş yelpazeli bir veri hızını desteklemek zorunda olduğuna vurgu yapılmıştır. Bu konuyla alakalı olarak yüksek veri hızı kablosuz sistem tasarımcılarının sürekli olarak karşılaştıkları talepler arasındadır ve bu talepler gün geçtikçe artmaktadır. 2020 civarlarında tamamlanması planlanan 5G'de bu talepleri gerçekleştirmek için çalışmaların sürdüğü belirtilmektedir [10]. Niçin veri hızında çok iyi bir iyileştirme yapılması gerekmektedir diye sorulduğunda, şu nedenler sıralanabilmektedir; artan teknolojik imkânlar vasıtasıyla kullanıcılar daha kaliteli hizmet beklemektedir, bunun yanı sıra ilerleyen yıllarda büyük bir sayıya ulaşacak olan

cihazların birbirleriyle haberleşmesine imkân sağlayacak geniş yelpazeli bir sistem oluşturulması gerekmesidir. Bu gerekliliklerin her biri kendi açısından değerlendirildiğinde veri hızının önemi daha iyi kavranacaktır. Basit bir örnek verilecek olursa; şu anda kullanılan hızlı trenlerin ortalama hızlarının 250 km/sa olduğu düşünüldüğünde bu hızdaki bir tren için haberleşme imkânı 4G ağlarla mümkün olabilmese rağmen, 350 ile 500 km/sa hızlarındaki bir hızlı tren için 4G sistemi yeterli veri hızı sunmayacaktır [18]. Bu durumdaki yüksek hareketli kullanıcılar için 5G'nin heterojen ağlarla ortak bir sistem oluşturması düşünülebilir [16]. Nitekim önerilen mobil femtocell (MFemtocell) sistemlerin yüksek harekete sahip araçlarda kullanılmasıyla birlikte sinyal iyileştirmesine katkıda bulunulmuştur [19]. Yukarıda belirtilen sebeplerden de anlaşılacağı üzere 5G teknolojisinde muhakkak veri hızının artırılması gerekmektedir. 10 milyarı aşkın cihazın birbirleriyle bağlantılı olmasıyla gelişen Nesnelerin İnternetinin (IoT) yaygınlaşması 4G ile karşılanabilir olması mümkün değildir, ayrıca daha kaliteli servis hizmetinin verilmesi de 4G ile sınırlı kalmaktadır [20]. Çünkü 4G için kullanılabilen veri hızı istenilen seviyede olmayacaktır. Burada oluşacak olan boşluğun ise 5G teknolojisi ile doldurulması gerekmektedir. Bu noktada Samsung Elektronik Şirketi tarafından yapılmış olan çalışmalar sonucunda veri iletim hızı açısından 4G'den 30 kat daha fazla hıza ulaşıldığı belirtilmektedir [21]. Buradaki çalışmada, 100 km/sa hızındaki bir hareket hali durumunda bile 1.2 Gbps hıza ulaşıldığı söylenmektedir. Ayrıca 28 GHz spektrum kullanılarak 7.5 Gbps hıza ulaşıldığı da belirtilmektedir. Nitekim yüksek frekans bantlarının 5G için uygun olduğu ve bu durumun yüksek veri hızlarına imkân tanıyacağı bildirilmektedir [22]. Bina içi ve bina dışı hücreli mimari kullanılarak, bina dışı kullanıcılar sadece binaların dışında büyük anten dizileri bulunan kablosuz erişim noktalarıyla (bina dışı BS'leri değil) iletişim kurmak zorunda olduklarından, yüksek veri hızlarına sahip kısa mesafeli iletişim için uygun birçok teknoloji kullanılabilir. Bunlara çeşitli örnekler WiFi, femtocell, ultra geniş bant (UWB), mm-dalga iletişim (3-300 GHz) ve görünür ışık iletişimi (VLC) (400-490 THz) örnek olarak verilebilir [16]. Kısaca özetlemek gerekirse; gelecek 10-15 yıl içerisinde teknolojik gelişmelerle birlikte akıllı cihazların kullanımı bu denli sürekli artacağından dolayı ciddi anlamda performans iyileştirmesi gerekmektedir. Bu iyileştirmeye sadece akıllı cihazların kullanımının artması sebep olmamaktadır. Buna ek olarak, kullanıcılar daha iyi bir donanıma sahip, kullanıcı arayüzü bakımından daha kaliteli uygulamalara istedikleri anda, istedikleri yerde yüksek hızlarda erişmek istemektedirler [23]. Bütün bu etkenler birlikte düşünüldüğünde 5G

için olmazsa olmaz bir nokta olarak veri hızı ortaya çıkmaktadır. Bu sebepten gelecek çalışmaların konularından birisi veri hızıdır. Dolayısıyla araştırmacılar öncelikli çalışma alanlarının başında veri hızını dikkate almalıdırlar.

2.1.5.2. *Gecikme*

Bir sinyal, iletmeye başlandığı anda yansıma, kırılma, saçılma gibi etkilerle karşılaşabileceği çeşitli yollarda ilerlemektedir. Bu etkilerle birlikte sinyal ulaşması gereken yere belirli bir zaman kaybı içerisinde gecikmeli olarak ulaşmaktadır. Bu gecikme ilk nesil sistemlerle kıyaslandığında kullanıcıların fark edebildikleri seviyelerde olmasa da yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde gereksinimleri karşılayabilmek adına aşılması gereken bir problem olarak görülmektedir. Nitekim bununla alakalı olarak, otomotiv, sağlık, güvenlik, lojistik gibi çeşitli uygulamalar için olmazsa olmaz bir alan olan daha fazla katı bir gecikmenin yani mümkün olduğu kadar daha az bir zaman kaybı süresinin 5G tarafından desteklenmesi gerektiği vurgulanmaktadır [17]. Dolayısıyla daha düşük bir gecikmenin gerçekleştirilmesi bugünkü ağ sisteminin ele alarak çözüm önerdiği bir iyileştirme değildir. Bu noktada devreye 5G'nin girmesi düşünülmekte ve gecikmenin mümkün olduğunca azaltılması 5G çalışmalarıyla planlanmaktadır. Gecikmenin azaltılması, internet tabanlı erişim ve uygulamaların sanki gerçek zamandaki gibi durmaksızın, kesintisiz şekilde yapılmasının gerçekleşmesi demektir [1]. Gecikmenin bu derece önemli bir konu olmasına örnek vermek gerekirse, ilerleyen zamanlarda özellikle taşıt teknolojisinin çok büyük bir gelişme yaşayacağı açıktır. Bu gelişmeler arasında olan sürücüsüz otomobil sistemleri için, gecikmenin iyileştirilmesi gerekliliği 5G için vazgeçilmez olmaktadır. Bu vazgeçilmez durumu destekler nitelikte olarak; şu an kullanılan 4G teknolojisinin yeteri kadar hitap etmediği zorluklardan birisi de daha düşük gecikmedir. Bundan dolayı 5G'de kesinlikle çözülmesi gereken konunun daha düşük gecikme olduğu belirtilmiştir [23]. 4G sistemindeki gecikme 15ms'dir ve bu gecikmenin 5G için yaklaşık olarak 1ms olması istenmektedir [24]. Çünkü gerek insanlarla araçlar arasında iletişim gerek makineler arasında iletişim gerekse nesnelere arasında (Nesnelerin İnterneti) iletişim gibi uygulama alanlarında tepki süresinin mümkün olduğunca hızlı olması gerekmektedir. Mümkün olduğunca azaltılacak, neredeyse 5G için 1 ms ve daha aşağı seviyelerine getirilecek bir gecikme sayesinde, ağır sanayi makinelerinin uzaktan kontrolü daha hızlı gerçekleşebilecektir ve ayrıca Kutup Bölgeleri veya okyanus tabanının parçaları gibi henüz keşfedilmemiş alanların araştırılmasına yardım edilebilecektir [21]. Gidiş-geliş

gecikmesinin 1 ms olduğu bir sistemde çok büyük bir ilerleme gösterebilecek çeşitli mobil uygulamaların gerçekleşmesi mümkün olabilecektir ki bu uygulamalar “dokunmatik internet (tactile internet)” olarak adlandırılmaktadır [25]. Bu uygulamanın geliştirilmesi sayesinde internetin sadece işitsel kısmı ile değil dokunma duyusuyla da ilgili olan kısımdaki verilerin işlemleri gerçekleştirilebilmiş olacaktır. Buna en iyi örnek olarak, gecikmenin çok az seviyelerde gerçekleştirilebildiği bir 5G sistemi ile dokunmatik internet uygulamalarının birleştirilebildiği bir sistem aracılığıyla gerekli algı eşiklerinin tanımlanmasıyla birlikte bir doktorun ameliyat yapması uzaktan mümkün olabilecektir. [26]’daki çalışmada, yüksek veri hızlarına ulaşmak ve enerji verimliliğini gerçekleştirmek için düşük bir gecikmenin önemi vurgulanmıştır. [26]’daki çalışmada önerilmiş olan 5G yapısı sayesinde kısa TDD gecikmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hasta izleme robotları tarafından mesaj iletimi uygulamaları, yaşam güvenliği sistemleri, nükleer reaktörler ve insansız hava araçları gibi gerçek zamanlı uygulamalarda daha düşük gecikmenin kritik bir nokta olduğu belirtilmiştir [6]. Başka bir çalışmada gecikmenin 5G için 1ms civarlarında olması gerektiği vurgulanmış olmasına rağmen [11], bu durumun nasıl gerçekleşeceğine dair çok az bir çalışma mevcuttur. Tüm bu durumlar incelendiğinde görülecektir ki şu an kullanılan teknoloji yapısının büyük bir kısmının yeniden tasarlanması gerekmektedir. 4G sistemi kapasitesinin en üst seviyesinde olmasına rağmen yukarıda bahsedilen konularda yeterli çözümü getirememiştir. Milyonlarca cihazın bağlantılı olduğu yeni sistemler için 5G planlaması çalışmaları devam etmektedir, Bu planlamada gecikme gerekli olan ihtiyaçları karşılayabilecek seviyede olacaktır, olmak zorundadır. 5G çok düşük hava girişimleri gecikmeli iletim moduna sahip olmalıdır. Dolayısıyla, 5G dalga şekli çok kısa TTIs(Transmission Time Intervals-İletim Zaman Aralığı) aralıklarının kullanıldığı düşük gecikmeye olanak sağlamalıdır [27]. Bununla alakalı olarak, [28]’de yapılmış bir çalışmada 5G için yeni bir radyo çerçeve formatı sunulmuştur. Bu çalışmada, gecikmenin gerekliliklerini karşılayabilen TTI süresi gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, TTI süresinin gecikme için önemli bir nokta olduğu görülmektedir. Bu yüzden, daha düşük gecikme için daha kısa TTI süresinin gerçekleştirilmesi 5G’den beklenmektedir.

2.1.5.3. Enerji ve Maliyet Verimliliği

5G teknolojisinin, yukarıda bahsedilen veri hızının artırılmasının ve gecikmenin iyileştirilmesinin/düşürülmesinin yanı sıra çözüm üretmesi gereken diğer bir konu enerji tüketiminin azaltılması ve maliyetin düşürülmesidir. Çünkü cep telefonu operatörlerinin

raporlarında, elektrik tüketiminin yaklaşık olarak %60 civarının baz istasyonları tarafından tüketilen enerji olduğu belirtilmektedir [29]. Dolayısıyla eğer enerji tüketimi azaltılırsa, maliyet de benzer oranda düşürülebilecektir. Ayrıca yapılacak olan iyileştirmeler ile haberleşme sistemlerindeki enerji tüketimi ile meydana gelen karbondioksit gibi çevreye zararlı gazların da dolaylı olarak azaltılması sağlanmış olacaktır. Böylece daha çevreci bir haberleşme teknolojisi kullanımda olmuş olacaktır. Fakat olay sadece baz istasyonlarının harcamış olduğu enerji tüketiminin azaltılması ve buna bağlı olarak maliyetin düşürülmesi ile sınırlı değildir. Çünkü bu noktada kablosuz haberleşme sistemini kullanan yeni akıllı cihazların donanımsal bileşenlerinin tükettiği enerji de söz konusudur. Nitekim [30]'deki çalışmada; bu donanımsal bileşenlerin enerji tüketimi dikkate alındığı takdirde, enerji verimliliğinin iyileştirilmesine, geliştirilmesine katkı yapılması söz konusu olduğu vurgulanmıştır. Bir işlem aynı güç kısıtlamaları altında daha iyi bir performans ile gerçekleştirilebilir. Baz istasyonları için de enerji tüketimi giderek artan bir endişe olduğu düşünüldüğünde bu noktada iletim gücü önemli bir rol oynamaktadır [31]. Enerji verimliliği, sinyalin dışarıda iletilmesi sırasında binaların, ağaçların, dağların, duvarların ve bunlar gibi yayılma kaybını tetikleyecek etkenlerin içerisinden geçerek belirli kayıplarla alıcıya ulaşması olarak tanımlanabilir. Bu tanımlama gerçek zamandaki kayıpları ifade etmektedir. Gerçek zamandaki bu kayıp ile teorik olarak herhangi bir yayılma kaybının olmadığı her iki durum için de joule başına iletilen toplam bitlerin sayısı elde edilebilmektedir. Bu sonuçların karşılaştırılması enerji verimliliğini en iyi şekilde anlamamıza yardımcı olacaktır. Enerji tüketiminin azaltılması ile maliyetin azaltılabileceği görülmüştür. Bunun yanında, karmaşık yapının azaltılması ile de maliyet düşürülmesi gerçekleştirilebilir. Genel anlamda yapılacak olan iyileştirmelerle birlikte mümkün olan en düşük maliyetli bileşenlerin kullanılması teşvik edilmelidir. Eğer bu bileşenler kullanılırsa makineler arasındaki iletişim, Nesnelerin İnterneti kullanımının yaygınlaşması ve geniş bir hedef kitleye ulaşılması kolay olacaktır. Kısaca özetlenecek olursa, hücrel sistemler geliştikçe daha düşük güçlü, daha ucuz baz istasyonları gerekmektedir. Ayrıca baz istasyonlarının sayısının kullanıcı cihazlarından daha fazla olacağı tahmin edilmektedir [32]. Enerji verimliliği açısından önemli bir konu PAPR (Peak to Average Power Ratio)'dır. PAPR problemi güç verimliliğini azaltan bir durumdur [33]. Böylece, güç verimliliğinin azalması enerji verimliliğini de doğrudan etkileyecektir. PAPR özellikle çok taşıyıcılı dalga şekillerinde önemli bir sorun oluşturur. Bu bakımdan, 5G teknolojisi için bir dalga şeklinin belirlenmesi sırasında, PAPR azaltılmasına katkı sağlayacak bir

dalga şeklinin üzerinde durulması gerekmektedir. [34]'deki çalışmada, MIMO sistemleri bakımından, 5G'de kullanılma potansiyeli olan dalga şekilleri için PAPR performansları analiz edilmiştir. Genel olarak, enerji verimliliği, daha düşük enerji tüketimi gibi çalışmaların yanı sıra daha düşük maliyet açısından da çalışmaların yapılması 5G teknolojisinden beklenmektedir.

2.1.5.4. *Spektrum Verimliliği*

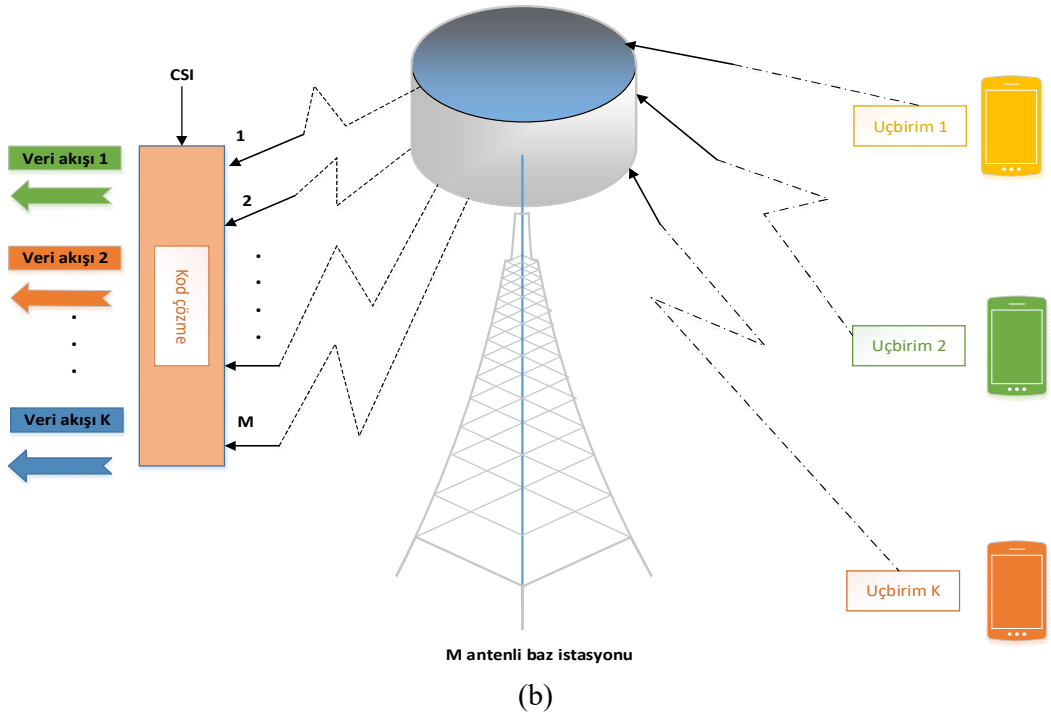
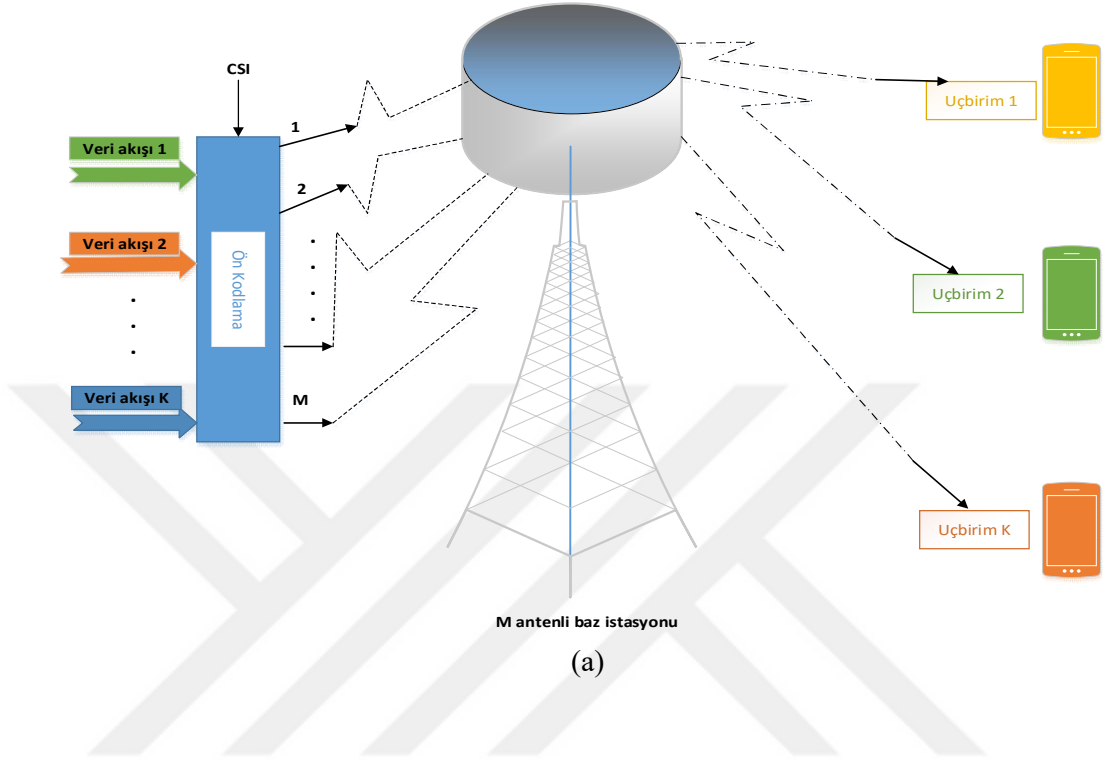
Kablosuz iletişim veri hacmi talebi sürekli olarak müthiş bir şekilde artarken, buna karşılık kullanılabilecek elektromanyetik spektrum asla artmayacaktır [2]. Üzerinde işlem yapılabilecek bant aralıkları belirli olup yeni spektrumlar üretmek yerine kullanılan spektrumda iyileştirmeler yapılması daha uygundur. Ayrıca birbiriyle bağlantılı cihazların sayısının artmasıyla birlikte spektrum kullanımının geliştirilmesi daha da bir önem kazanmaktadır [1]. Mobil sistemlerin erişim imkânına sahip olduğu tüm frekans bantları 6 Ghz'in altındadır ve tüm ilerlemeler bu bantlarda yapılmaktadır. Fakat diğer kablosuz teknolojilerin de kullanmış oldukları bu frekans bantları aşırı derecede dolmuş olduğundan dolayı 5G ve ötesi haberleşme için yeterli olmayacaktır [20]. Bu sebepten dolayı yeni spektrum tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Hatta 5G için spektrum paylaşımının gerçekleştirilmesi önemli bir konu olmuştur [24]. Bu noktada yüksek kaliteli multimedya için bant genişliği tahsisi açısından milimetre dalgaları 5G ve ötesi haberleşmede gelecek vadeden konudur [25]. Burada dikkat edilmesi gereken konu ise yüksek frekanslarda yani milimetre dalgalarında özellikle bina içi iletişim üzerinde durulacağıdır. Bina içindeki kullanıcılar bu frekanslarda doğrudan baz istasyonları ile iletişimde olmayacaklardır. Spektrum verimliliğinin artırılması 5G ve ötesi için zorunlu bir durum olduğundan bu amaca yönelik yeni bir tasarım sunulmuş olup bu yeni tasarımın 5G'de spektrum verimliliğini önemli ölçüde iyileştirmesi beklenildiği belirtilmektedir [35]. Çok yüksek çözünürlüklü mobil uygulamaların hızlı bir şekilde yaygınlaşması nedeniyle, 5G haberleşmesi için daha fazla spektral kaynaklara ihtiyaç olduğu ayrıca belirtilmiştir [36]. 5G'de spektral verimliliği artırmaya yönelik olarak bazı tekniklerin birleşimi ile oluşturulmuş sistem sunulmaktadır [37]. Ayrıca, yüksek spektrum verimliliğe sahip yeni bir dijital modülasyon şeması olan indeks modülasyonu üzerinde son yıllarda özellikle bir ilgi duyulmaktadır [38]. Bu ilgi duyulan modülasyon tekniği kullanılarak gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinde performans iyileştirilmesine katkı sunması beklenmemektedir. Genel olarak 5G ve ötesi için spektrum konusunda bir standart

oluşturmak için çalışmalar devam etmektedir ve gelecek çalışmalar için araştırmacıların bu konu üzerine çalışma yapmaları önem arz etmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kablosuz haberleşme teknolojilerinde son dönemlerde kullanımı artan Büyük Ölçek MIMO, alıcı ve verici kısımdaki çoklu antenler aracılığıyla iletişimin gerçekleştirildiği sistem olarak bilinmektedir. Birden çok anten kullanmanın başlıca faydaları arasında çeşitlilik ile elde edilen daha yüksek performans ve uzaysal çoğullama yoluyla daha fazla veri hızıdır. Antenlerin sayısı hakkında bir sınırlama söz konusu değildir. Hatta bu durum alıcı ve vericideki anten sayılarının farklılıklarındaki karşılaştırmalar konusunda çalışmaların yapılmasına da olanak sağlamıştır. Büyük Ölçek MIMO'nun tasarımı, analizi ve işlevi gibi konularda çeşitli araştırmaların hız kazandığı görülmektedir. Bu araştırmalardan biri olan [31]'de, Büyük Ölçek MIMO sistemi için ağ tasarımı ve sinyal işleme ve sinyal kodlama üzerine teorik çalışmalar sunulmuştur. Ayrıca bu sistemin zorluklarından, performans limitlerinden ve bu sistem için bazı algoritmalarından bahsedilmiştir. Diğer bir çalışmada, çoklu kullanıcı MIMO için yüksek hareketlilik ve düşük SNR şartlarındaki bazı eksikliklerin sebep olduğu kavramları gidermeye yönelik yöntem mevcuttur [39]. Bunun yanında, Büyük Ölçek MIMO'nun mm-Dalga ile birleştirilmesiyle oluşan bir HetNet sisteminin faydalarından da bahsedilmiştir [18]. Yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı hücresele ağlarda Büyük Ölçek MIMO için kaç adet antene ihtiyaç duyulduğunu belirleyebilmek adına çeşitli analizler yardımıyla bir çalışma yapılmıştır [40]. Ayrıca, haberleşme sistemlerinde kullanılan FDD ve TDD tekniklerinin Büyük Ölçek MIMO için karşılaştırılması da yapılmıştır [41]. FDD ve TDD sistemlerinin genel teknik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır [42]. Büyük Ölçek MIMO sisteminin aşağı ve yukarı bağlantı durumlarındaki genel olarak gösterimi [2]'deki çalışmada sırasıyla Şekil 3.1 (a) ve (b)'deki gibi belirtilmiştir. Ayrıca yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı hücresele sistemlerinde Büyük Ölçek MIMO için anten sayıları hakkındaki bir çalışma [40]'da bulunmaktadır. [39]'daki çalışmada, anten sayılarının fazla olduğu bir sistemin MIMO'suz sisteme göre verimli olduğu belirtilmektedir.

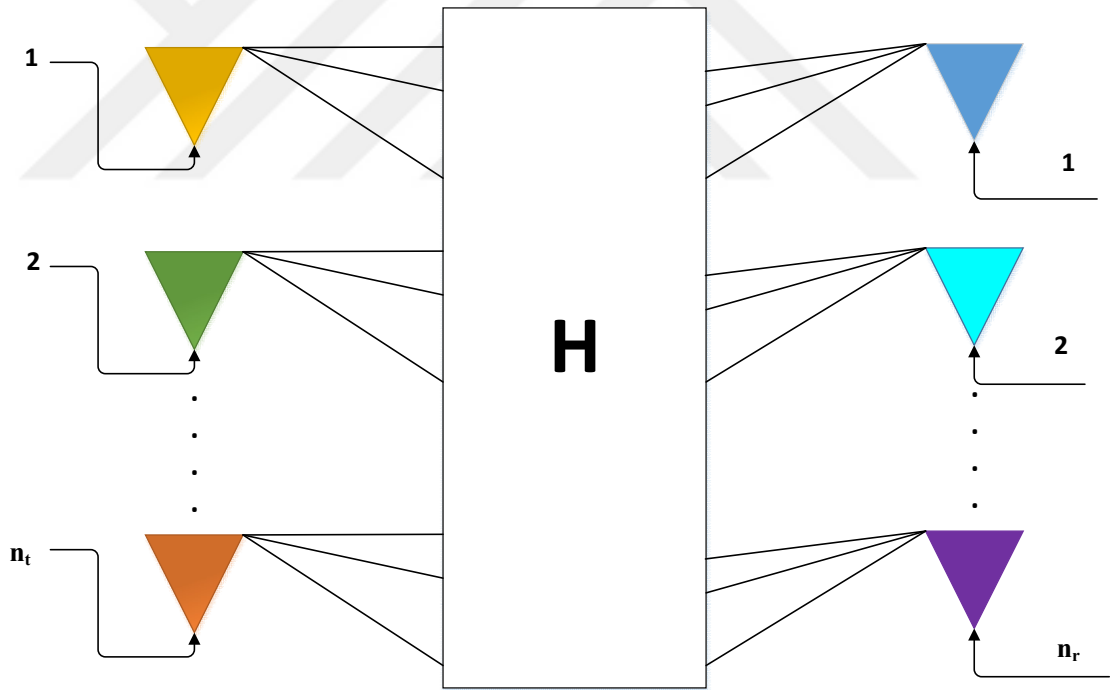


Şekil 3.1. Büyük Ölçek MIMO Aşağı Bağlantı (a) ve Yukarı Bağlantı (b) [2].

3.1. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO'NUN TEORİK YAKLAŞIMI

Çok büyük MIMO veya büyük ölçekli anten dizisi sistemi olarak da bilinen Büyük Ölçek MIMO, iletimde yüzlerce anten kullanabilir. Bu fikrin arkasındaki mantık, BS antenlerinin sayısı arttıkça, farklı UE (User Equipment-Kullanıcı Ekipmanı)'ler arasındaki mekânsal imza daha az korelasyona neden olur [31]. Rayleigh sönümleme durumunda [43], BS antenlerinin sayısı arttığında aynı hücrenin farklı kullanıcıları arasındaki kanal asimptotik olarak ortogonal hale gelecektir. Bunun nedeni, anten sayısı arttıkça rasgele matris teorisinin asimptotik oluşumuna başlamasıdır. Geleneksel olarak, BS'nin her kullanıcı ile ayrı zaman-frekans kaynakları arasında iletişim kurabilmesi, BS ve kullanıcılar arasındaki iletişim kanalın ortogonalleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir [44].

MIMO iletimine örnek olması için Şekil 3.2 verilmiştir.



Şekil 3.2. H Kanalında MIMO İletimi.

Sistemde n_t adet verici ve n_r adet alıcı anten varsa, alıcıdaki sinyaller

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir. Burada \mathbf{y} , alınan $n_r \times 1$ sinyal vektörünü; \mathbf{x} , iletilen $n_t \times 1$ sinyal

vektörünü; \mathbf{H} , $n_r \times n_t$ kanal matrisini, \mathbf{v} alıcıdaki $n_r \times 1$ gürültü vektörünü ifade etmektedir.

Denklem (3.1)'e atıfta bulunarak, her gönderici anten bağımsız bir veri akışı göndermektedir ve alıcının görevi tüm iletilen verileri kurtarmaktır. Her bir verici anteninden gelen veriler, bir vektörü alınan sinyal $\mathbf{w}^H \mathbf{y}$ [45] ile ilişkilendiren doğrusal bir birleştirici kullanarak alıcıda elde edilebilir.

Verilen veriyi n . verici anteninden (x veya x_n vektöründeki n . element) yeniden kazanmak için, $\frac{\mathbf{h}_n^H}{n_r} \mathbf{y}$ olan Eşleştirilmiş Filtre (MF) eşitlemesini kullanabiliriz. \mathbf{h}_n^H , \mathbf{H} 'nin n . sütun vektörüdür ve bu durumda kanalın alıcıda bilindiği varsayılmaktadır. Denklem (3.1) kullanarak, bu işlemi Denklem

(3.2) gibi genişletebiliriz,

$$\frac{\mathbf{h}_n^H \mathbf{y}}{n_r} = \underbrace{\frac{\mathbf{h}_n^H \mathbf{h}_n x_n}{n_r}}_{\text{İstenilen Sinyal}} + \underbrace{\sum_{i \neq n}^{n_t} \frac{\mathbf{h}_n^H \mathbf{h}_i x_i}{n_r}}_{\text{Girişim ve Gürültü}} + \frac{\mathbf{h}_n^H \mathbf{v}}{n_r} \quad (3.2)$$

bu denklemde \mathbf{h}_i , i . verici ve alıcı arasındaki kanal vektörüdür.

Antenler arasında bir korelasyon olmadığı varsayılırsa, n_r sonsuza yaklaştıkça $i \neq n$ için $\frac{\mathbf{h}_n^H \mathbf{h}_i}{n_r} \rightarrow 0$ olduğu gösterilebilir [44]. Bu, gürültü terimi \mathbf{v} için de geçerlidir. Girişimler çok sayıdaki yasalar nedeniyle kaybolduğundan, kanal olumlu bir yayılım halini almıştır [31].

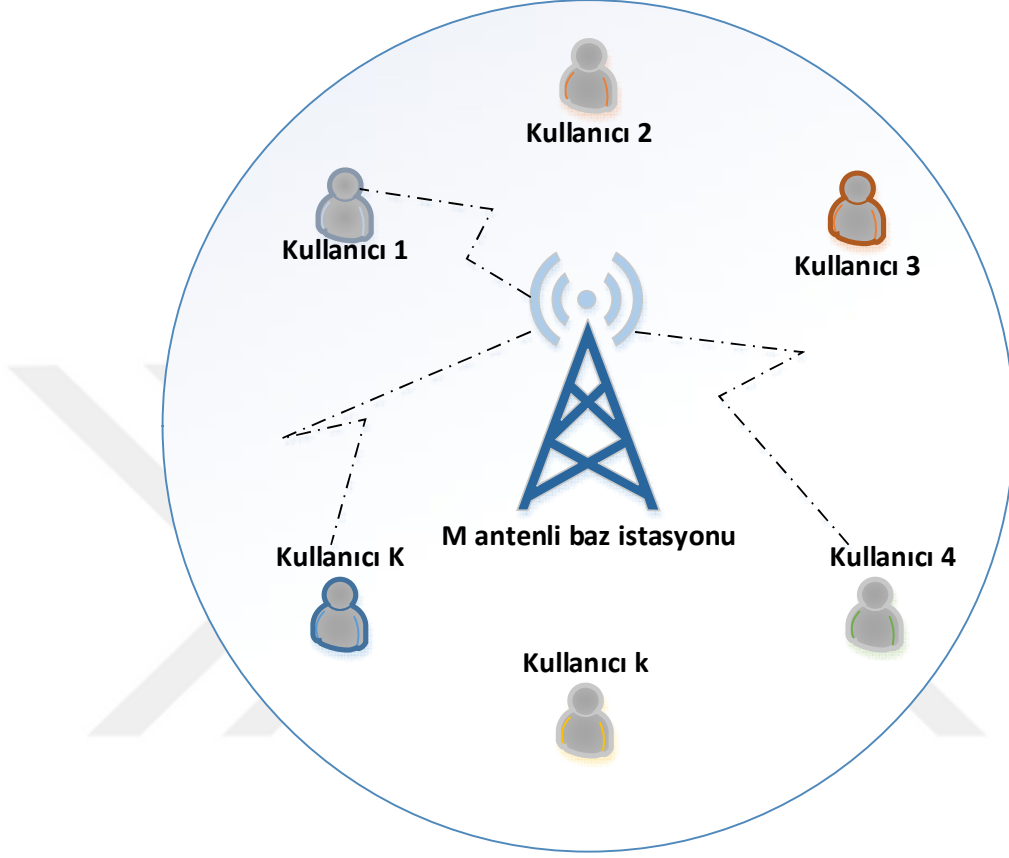
Sonuç olarak Denklem (3.2)'deki MF eşitlemesi

$$\lim_{n_r \rightarrow \infty} \frac{\mathbf{h}_n^H \mathbf{y}}{n_r} = x_n \quad (3.3)$$

gibi olur. x_n 'i elde etmek, gönderilen verilerin asimptotik durumda herhangi bir hata olmadan geri kazanılacağı anlamına gelir.

Bu bölümde ayrıca genel olarak Büyük Ölçek MIMO sistemleri teorik bakış açısı ile incelenmiştir. Birden fazla tek antenli kullanıcıların birçok antenle iletişim kurduğu MU-MIMO sistemlerin analizi gerçekleştirilmiştir. Büyük Ölçek MIMO, BS anten sayısı ve kullanıcı sayısı büyük olan bir MU-MIMO hücreli sistemdir. Şekil 3.3'te

MU-MIMO sisteminin genel bir hali gösterilmektedir.



Şekil 3.3. MU-MIMO Sistemi [46].

MU-MIMO sistemleri, olumsuz yayınlanma ortamlarına bağlı problemleri ortadan kaldırmasının yanında noktadan noktaya MIMO sistemlerinin çoklayıcı kazanımını elde edebilir. Aşağıda teorik yaklaşımların çoğu [31], [47], [48]'deki çalışmalar baz alınarak oluşturulmuştur.

3.1.1. Yukarı Bağlantı İletimi

Yukarı bağlantı iletimi, K kullanıcılarının BS'ye sinyal gönderdiği bir durumdur. $E\{|s_k|^2\} = 1$ olan s_k , k. kullanıcılarından iletilen sinyaldir. K kullanıcıları aynı zaman-frekans aralığını paylaştığından, BS'deki $M \times 1$ alınan sinyal vektörü tüm K kullanıcılarından iletilen tüm sinyallerden oluşan kombinasyondur [49]:

$$\mathbf{y}_{ul} = \sqrt{p_u} \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k s_k + \mathbf{n} = \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3.4)$$

burada p_u ortalama sinyal-gürültü oranı (SNR), $\mathbf{n} \in \mathcal{C}^{M \times 1}$ ek gürültü vektörü ve $\mathbf{s} \triangleq [s_1 \dots s_K]^T$ 'dir. \mathbf{n} elemanlarının sıfır ortalamalı ve birim varyansa sahip ve \mathbf{H} 'den bağımsız olan i.i.d. Gauss rastgele değişkenleri olduğu varsayılmaktadır.

Alınan sinyal vektörü \mathbf{y}_{ul} 'den CSI (Channel State Information) bilgisi ile birlikte BS, K kullanıcılarından iletilen sinyalleri tutarlı bir şekilde tespit edecektir. Kanal modeli Denklem (3.4)'ün toplam kapasitesi [50]'de aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$C_{ul,sum} = \log_2 \det(I_K + p_u \mathbf{H}^H \mathbf{H}) \quad (3.5)$$

3.1.2. Aşağı Bağlantı İletimi

Aşağı bağlantı, BS'nin tüm K kullanıcılarına sinyal gönderdiği durumu ifade etmektedir. BS anten dizisinden iletilen sinyal vektörü $E \{ \|\mathbf{x}\|^2 \} = 1$ olduğunda, $\mathbf{x} \in \mathcal{C}^{M \times 1}$ olsun. Daha sonra, k. kullanıcıdaki alınan sinyal Denklem (3.6) ile verilir [40];

$$\mathbf{y}_{dl,k} = \sqrt{p_d} \mathbf{h}_k^T \mathbf{x} + \mathbf{z}_k \quad (3.6)$$

burada p_d , ortalama SNR ve \mathbf{z}_k , k. kullanıcıdaki ek gürültüdür. \mathbf{z}_k 'nin sıfır ortalamalı ve birim varyanslı dağıtılan Gauss olduğunu varsayıyoruz. Toplu halde, K kullanıcısının alınan sinyal vektörü Denklem (3.7) olarak yazılabilir;

$$\mathbf{y}_{dl} = \sqrt{p_d} \mathbf{H}^T \mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (3.7)$$

burada $\mathbf{y}_{dl} \triangleq [y_{dl,1} \ y_{dl,2} \ \dots \ y_{dl,K}]^T$ ve $\mathbf{z} \triangleq [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_K]^T$ 'dir. Kanal modeli Denklem (3.7), toplam kapasitesi Denklem (3.8) olarak bilinen yaygın kanalıdır [51];

$$C_{sum} = \max_{\substack{\{q_k\} \\ q_k \geq 0, \sum_{k=1}^K q_k \leq 1}} \log_2 \det(I_M + p_d \mathbf{H}^* D_q \mathbf{H}^T) \quad (3.8)$$

burada D_q , k. diyagonal elemanı q_k olan diyagonal matristir.

Bir BS'li, L hücreli, her bir hücrenin K tekli anten kullanıcıları bir MU-MIMO sistemi için kanal katsayısı Denklem (3.9)'da gösterilmiştir.

$$h_{i,k,l,n} = g_{i,k,l,n} * \sqrt{d_{i,k,l,n}} \quad (3.9)$$

1. hücreden i. BS'ye kadar tüm K kullanıcılarının kanal matrisi;

$$\mathbf{H}_{i,l} = \begin{bmatrix} h_{i,1,l,1} & \cdots & h_{i,K,l,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,1,l,N} & \cdots & h_{i,K,l,N} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_{i,l} \sqrt{\mathbf{D}_{i,l}} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{G}_{i,l} = \begin{bmatrix} g_{i,1,l,1} & \cdots & g_{i,K,l,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{i,1,l,N} & \cdots & g_{i,K,l,N} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{D}_{i,l} = \begin{bmatrix} d_{i,1,l} & & \\ & \ddots & \\ & & d_{i,K,l} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

YUKARI BAĞLANTI sinyal iletimi için tek bir BS'deki alınan sinyal vektörü Denklem (3.13) 'te verilmiştir.

$$\mathbf{y}_u = \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{x}_u + \mathbf{n}_u \quad (3.13)$$

Toplam kanal kapasitesi Denklem (3.14)'te gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} C &= \log_2 \det(\mathbf{I} + p_u \mathbf{H}^H \mathbf{H}) \approx \log_2 \det(\mathbf{I} + N p_u \mathbf{D}) \\ &= \sum_{k=1}^K \log_2 \det(\mathbf{I} + N p_u d_k) \frac{\text{bits}}{s} / \text{Hz} \end{aligned} \quad (3.14)$$

AŞAĞI BAĞLANTI iletimi için tüm K kullanıcılardaki sinyal vektörü Denklem (3.15)'te verilmiştir.

$$\mathbf{y}_d = \sqrt{p_d} \mathbf{H}^T \mathbf{x}_d + \mathbf{n}_d \quad (3.15)$$

BS genelde tüm kullanıcılara yukarı bağlantı pilot iletimine dayanan CSI'ya sahip olduğundan dolayı [48]'de belirtildiği gibi toplam kapasite Denklem (3.16)'daki gibi olmaktadır.

$$C = \max_p \log_2 \det(\mathbf{I}_N + p_d \mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^H) \approx \max_p \log_2 \det(\mathbf{I}_K + p_d \mathbf{N} \mathbf{P} \mathbf{D}) \frac{\text{bits}}{s} / \text{Hz} \quad (3.16)$$

Yukarıda denklemleri verilen sembollerin karşılıkları Çizelge 3.1’de gösterilmiş olup Büyük Ölçek MIMO teknolojisinin kablosuz iletişim sistemine yönelik sunabildiği bazı özel avantajlar aşağıda incelenmiştir.

Çizelge 3.1. Teoriksel Yaklaşımda Kullanılan İfadelerin Karşılıkları [40], [49].

Sembollerin Gösterimi	Sembollerin Anlamı
$g_{i,k,l,n}$	Karmaşık Küçük Ölçekli Sönümlenme Katsayısı
$d_{i,k,l,n}$	Büyük Ölçekli Sönümlenme Katsayısı
K	Kullanıcı Sayısı
L	Hücre Sayısı
N	BS’deki Anten Sayısı
x_u	Tüm Kullanıcıların Sinyal Vektörü
H	Yukarı Bağlantı Kanal Matrisi
n_u	Sıfır Ortalamalı Bir Gürültü Vektörü
p_u	Yukarı Bağlantı İletim Gücü
x_d	BS Tarafından İletilen Sinyal Vektörü
n_d	Ek Gürültü
p_d	Aşağı Bağlantı İletim Gücü

3.2. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO’NUN AVANTAJLARI

3.2.1. Sistem Kapasitesinde, Spektrum ve Enerji Verimliliğinde Artış

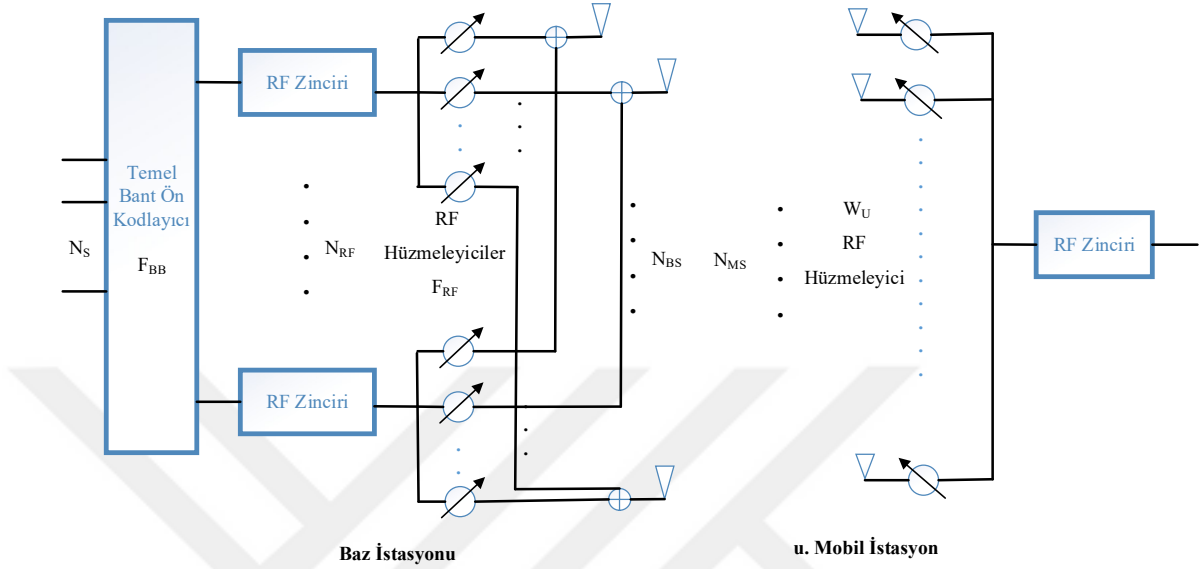
Büyük Ölçek MIMO kablosuz sistemi hücreli BS’lerde donatılmış 100 veya daha fazla sayıda antenle [52] hem aşağı bağlantı hem de yukarı bağlantı haberleşmesinde sistem kapasitesini, spektral ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Büyük Ölçek MIMO sistemlerdeki baz istasyonları, sistem kapasitesini artırmak için çok yüksek derecede uzaysal çoğullama kullanmaktadır. BS’ler çok sayıda anten dizisi ile konuşlandırıldığından, spektral ve enerji verimliliğini artırmak için basit doğrusal hüzme biçimlendirme/ön kodlama mümkündür. Çok sayıda benzetim çalışmasının, çok sayıda anten dizisinin spektral etkinlik üzerindeki etkisini analiz ettiği rapor edilmiştir.

Bu çalışmalardan 10 kullanıcı terminaline hizmet eden 400 anten elemanlı bir biçimli lineer dizi (ULA), 2.6GHz'de iki farklı ön-kodlama şeması olan hüzmeme (BF) ve sıfır zorlama (ZF) [40] kullanılarak simüle edilmiştir. Sırasıyla, ZF ve BF için yaklaşık olarak 58 bit/s/Hz ve 48 bit/s/Hz 'lik spektral verimlilik elde edilmiştir. Bir başka çalışma olan [44]'de, LTE standardına dayalı aynı anda 10 kullanıcıya hizmet veren 500 BS anteninden oluşan çok büyük MU-MIMO'nun spektral verimliliğini analiz ettikleri benzetimde, 42 bit/s/Hz (mükemmel kanal durum bilgisi, CSI) ve 28 bit/s/Hz 'lik spektral verimlilik sağlayan maksimum oran birleştirici (MRC), minimum ortalama karesel hata (MMSE) ve ZF gibi basit lineer ön kodlama teknikleri uygulamışlardır. Bu arada, Wi-Fi ve LTE bantları altında 10 kullanıcıya hizmet etmek için, anten sayısının 250 olduğu 2D dikdörtgen anten dizisi konfigürasyonunun benzetimi gerçekleştirilmiştir [53]. MRB ön kodlamalı 22 bit/s/Hz (LTE) ve 19 bit/s/Hz (Wi-Fi) iken ZF ön kodlama ile 130 bit/s/Hz (LTE) ve 110 bit/s/Hz (Wi-Fi) değerleri ölçülmüştür. Bunun yanı sıra, teorik bilgiyi gerçekleştirmek için Büyük Ölçek MIMO'da bazı yeni pratik çalışmalar yapılmıştır. Argos projesi [53], 2, 4 antenli ve 2.4 GHz bandında çalışan BS prototipini deneysel olarak göstermektedir. Sistem, spektral kapasiteyi artırmak için dağıtılmış birçok kullanıcıya hüzmeme şekillendirme (MUBF) teorisi ile tasarlanmıştır. Aynı anda 15 kullanıcıya hizmet edebilen 64 elemanlı Argos sistemi, 85 bit/s/Hz kapasitesine ulaşmıştır [53]. RUSK Lund test yatakları, silindirik bir dizi ve doğrusal dizi içeren Lund Üniversitesi'nde inşa edilmiştir [54]. Her bir anten dizisi, MRT ön kodlama / hüzmeme şekillendirme şemasını uygulayarak 2.6GHz'de 4 kullanıcıyla iletişim kuran 128 anten elemanı ile donatılmıştır. İlk sonuçlar doğrusal dizinin spektral verimliliğinin 48 bit/s/Hz ve silindirik dizi için 32 bit/s/Hz olduğunu göstermiştir. Ngarra sistemi Commonwealth Scientific tarafından geliştirilmiş olup Avustralya'daki Endüstriyel Araştırma Kurumu CSIRO [55] en az 12 eşzamanlı kullanıcıya hizmet verebilen 32 elemente kadar bir dizi uygulamayı gerçekleştirmiştir. VHF frekanslarında Ngarra, MU girişimini iptal etmek için basit ZF ön kodlama yöntemini kullanarak 67 bit/s/Hz 'e (18 eşzamanlı kullanıcı için) kadar bir spektral verimlilik elde edildiği gösterilmiştir.

3.2.2. Maliyet Etkin ve Enerji Verimli (Düşük Güç Tüketimli) Bileşenler

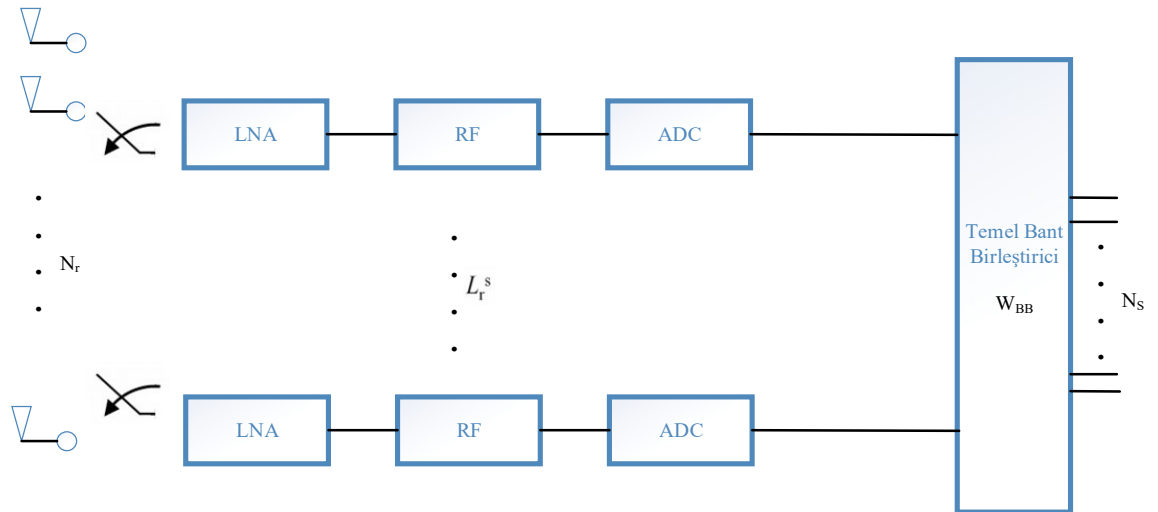
Büyük Ölçek MIMO'da güç tüketimini azaltmak için çeşitli hibrit analog/dijital ön kodlama mimarileri önerilmiştir. Hibrit ön kodlama, az sayıdaki RF zincirlerini kullanan ve ön kodlama işlemini RF ve temel bant alanları arasında bölen analog ve dijital işleme

kombinasyonunu içerir. [56]'daki çalışma, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, RF ön kodlama çözümünde uygulanacak değişken faz kaydırıcıların ağırlarını kullanmıştır.



Şekil 3.4. Hibrit Analog/Dijital Mimariye Sahip bir BS [56].

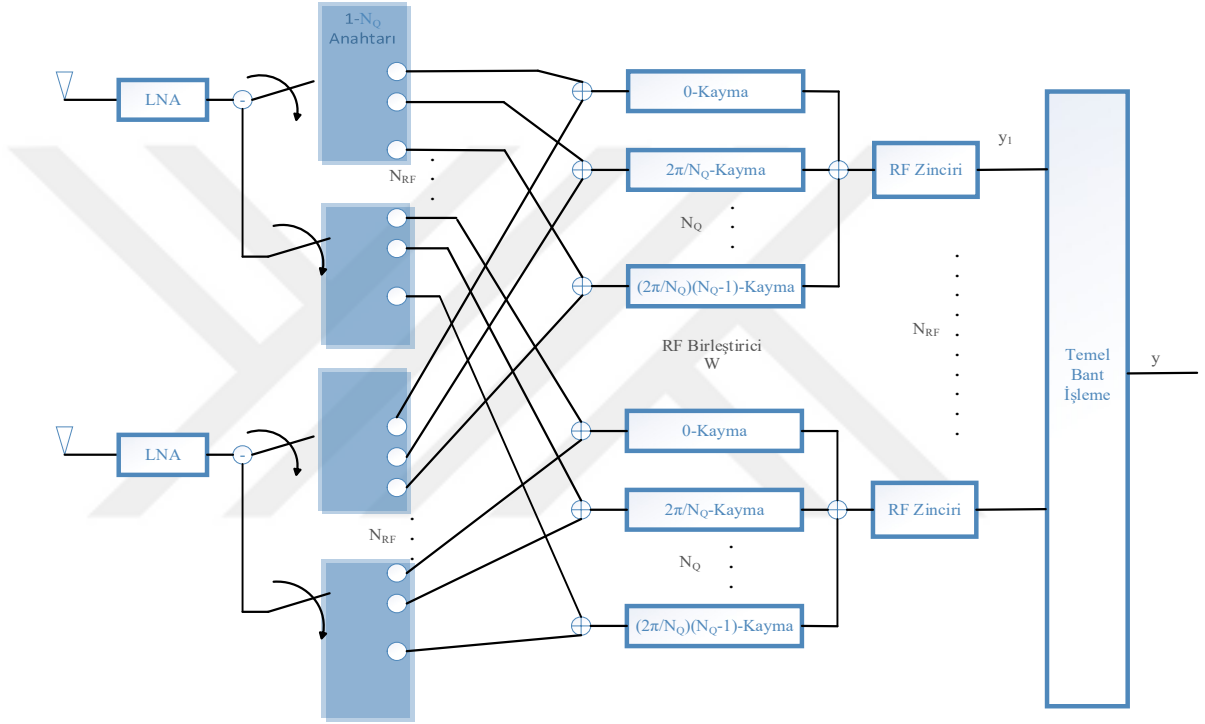
Şekil 3.5'te gösterildiği gibi [57], hibrit mimaride faz kaydırıcılar yerine anahtarlar kullanılarak güç tüketiminde daha fazla azalmanın sağlanmasının mümkün olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3.5. Anahtar Kullanılan Hibrit Mimarili Alıcı [57].

Bununla birlikte, bu mimari sadece her RF zincirinin tek bir antene bağlandığını varsayılmaktadır. Bu durumu dikkate alınarak daha az anten aktif olduğundan dolayı dizi kazancının azalabildiği vurgulanmıştır [58]. Bu nedenle, ön kodlama/birleştirme çözümü gerçekleştirmek için anahtarlar ve sabit faz kaydırıcıların bir kombinasyonu olarak

Şekil 3.6 önerilmektedir [58].



Şekil 3.6. Anahtar ve Faz Kaydırıcı Kombinasyonu Kullanılan Hibrit Mimari [58].

Bu çalışmalara ek olarak, [59]'deki çalışmada, Büyük Ölçek MIMO'da düşük maliyet ve güç tüketimi sağlamak için dizi mimarisi kullanılmıştır.

3.3. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO'NUN ZORLUKLARI

Büyük Ölçek MIMO bazı potansiyel fayda sağlıyor olsa da, ele alınması gereken bazı konu ve zorluklar vardır. Aşağıdaki başlıklar bu zorluklardan bazıları hakkında bilgiler vermektedir.

3.3.1. Karşılıklı Anten Bağlantısı ve Mekansal Korelasyon

Teorik olarak, Büyük Ölçek MIMO sistemlerinin BS anten sayısındaki artışla yüksek

sistem kapasitesi, spektrum ve enerji verimliliği sağladığı düşünülmektedir. Bu varsayım, devrenin güç tüketimiyle birlikte anten kuplajı düşünüldüğünde yanıtıcı olabilir. Antenleri anten dizilerine yerleştirirken alışılmış bir uygulama, bu antenleri gönderilen frekansın dalga boyuna eşit mesafede veya daha fazla uzaklıkta bırakmaktır [60]. Bu amaca yönelik olarak zorluklardan biri, baz istasyonunda çok sayıda antenin konuşlandırılması için fiziksel alan sınırlamasıdır. Sinyal kaynakları ve elektrik bileşenleri olarak anten elemanlarının yakınlığı, sırasıyla mekansal korelasyon ve anten karşılıklı bağlantısına neden olur [61]. Sınırlı bir alanda çok sayıda anteni verimli bir şekilde konuşlandırmak ve gerekli performansı sağlamak için, bu tür anten dizileri üzerine yapılan araştırmalar çeşitli benzetim ve deneyler ile araştırılmaktadır. BS kulesinin alan sınırlaması nedeniyle doğrusal bir dizi yapısı, çok sayıda anten elemanı ile kurulması pratik olarak zordur. Parabologram olarak adlandırılan yeni anten dizisi düzenlemesi, kare ve dairesel dizi ile sıklıkla karşılaşılan mekansal korelasyonun azaltılması amacıyla önerilmiştir [62]. Dört yayılan kare yamalı kompakt iki kutuplu antenden oluşan düşük karşılıklı kuplajlı anten dizisi ise [63]'de sunulmuştur.

3.3.2. Donanım Bozukluklarının Zorluğu

Donanımsal bozuklukların Büyük Ölçek MIMO sistemlerine etkisi, daha düşük seviyedeki nicemleme gürültüsü oluşturduğu için düşük maliyetli bileşenlerle daha da artmaktadır. [64]'teki çalışmada, BS'de konuşlandırılan çok sayıda antenle yüksek bir dizi kazanımı elde edilmiş olsa bile, donanım bozukluklarının kanal tahmin hatasına ve bir kapasite tavanına neden olabileceğini göstermiştir. Anten başına güç kısıtlarının etkisi [65]'de incelenmiş ve hibrit analog/dijital hüzme şekillendirme mimarileri [66], ancak gerçek alıcı-verici uygulamaları yerine yalnızca sinyal işleme modelleriyle sınırlı olduğu vurgulanmıştır. Pratik olarak, Büyük Ölçek MIMO sistemini gerçekleştirmek için temel bant işlemesi için donanım maliyeti de dâhil olmak üzere iç güç tüketimi araştırılmalıdır [67].

3.3.3. Düşük Karmaşıklık Doğru Kanal Tahmini

Etkin algılama ve ön kodlama yapmak için BS, kanal kestirimi yoluyla doğru kanal durumu bilgisini (CSI) elde etmelidir. Geleneksel bir MU-MIMO sisteminde, BS önce pilotları tüm UE'lere gönderir; UE'ler daha sonra kanalı tahmin eder ve CSI'yi BS'ye geri gönderir. Bununla birlikte, böyle bir işlem, Büyük Ölçek MIMO için mümkün olmayabilir çünkü pilot sembollerin iletilmesine ayrılan zaman BS antenlerinin sayısı ile

orantılıdır. Kanal tahmini için harcanan zaman oldukça uzun olabilir. Aşağı bağlantıda pilotların iletilmesini önlemek için, kanal karşılıklığını kullanan bir zaman-bölmeli çift yönlü (TDD) sistem, literatürün çoğunda ele alınmaktadır. Bununla birlikte, mevcut hücresel sistemlerin büyük bir kısmı frekans bölmeli çiftleme (FDD) işlemine dayanmaktadır. Dolayısıyla, FDD sistemlerinde kanal tahmini yükünü azaltmak için etkili çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır [68].

3.3.4. Sınırlı Geribildirimle Çalışma

Çok sayıda anten nedeniyle, BS'de anlık tam CSI elde etmek zordur. Sistem sınırlı CSI ile çalışabilmelidir. Sınırlı geribildirim sayesinde, kısmi CSI'ye dayalı etkili ön kodlama şemaları tasarlamak mümkündür. Diğer yol CSI sıkıştırmaaktır. BS, sıkıştırılmış geribildirimden tam CSI değerini tahmin edebilir. Bununla birlikte, kanal vektörlerinin geniş boyutundan dolayı bu yöntemleri büyük bir MIMO sistemine uygulamak için daha fazla gayret gerekmektedir [68].

3.4. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO'NUN 5G'DEKİ YERİ

5.Nesil(5G) teknolojisinden önceki bölümlerde bahsedilen beklenen gelişmeler arasında en önemli olarak gösterilebilecek iyileştirme hız, enerji verimliliği ve spektral verimlilik olacağı herkes tarafından yadsınamaz bir durumdur. [24]'te belirtildiği gibi, 5G teknolojisine büyük katkı sağlayabilecek teknolojiler Heterojen Ağlar, Milimetrik Dalgalar ve Büyük Ölçek MIMO sistemleri olabilecektir. Dolayısıyla, Büyük Ölçek MIMO, 5G teknolojisinde önemli bir rol oynayacaktır. Bu çıkarımı destekleyen gelişmeler aşağıda belirtilmiş olan Büyük Ölçek MIMO özellikleridir [54]:

- Büyük Ölçek MIMO kapasiteyi 10 veya daha fazla kez artırabilmesinin yanında enerji verimliliğini de 100 kata kadar iyileştirebilmektedir.
- Büyük Ölçek MIMO ile birlikte daha az güç tüketen ve daha az pahalı olan sistemler kurulabilir.
- Havada oluşan sinyal gecikmesi bu sistem ile azaltılabilir.
- Büyük Ölçek MIMO güvenlik açıklarına karşı sağlamlığı artırabilir.

Büyük Ölçek MIMO'nun belirtilen bu özellikleri sayesinde, 5G'de iyileştirme yapılması düşünülen alanlardaki Büyük Ölçek MIMO'nun katkısı analiz edildiğinde ortaya çıkan sonuç aşağıda sıralanmıştır:

3.4.1. 5G için Veri Hızı

Büyük Ölçek MIMO, alıcı ve verici kısımdaki antenler sayesinde oluşacak olan kanallar aracılığıyla iletimin yapılmasına imkân sağlayarak veri hızının artırılmasına katkı sunacaktır. Çok düğümlü/Çok antenli teknolojilerde yüksek veri hızlarını gerçekleştirebilmek için Büyük Ölçek MIMO çalışmalarına başlanmıştır [69]. Ayrıca Büyük Ölçek MIMO'nun 5G için yüksek bit hızlarına erişim imkânı sağlayabilmesinin sebebi yüksek bit hızını elde etmek için çok sayıdaki veri akışlarını uzaysal olarak çoklayabilmesidir [70]. Alıcı ve/veya verici taraftaki çok sayıdaki antenler istenilen yüksek veri hızı için imkân sağlayabilmektedir. Çünkü alıcı ve vericideki anten sayılarının oluşturmuş olduğu kanallar üzerinden veri hızının iyileştirilebilmesi gerçekleştirilmektedir [68]. [31]'de vurgulandığına göre, 4G (LTE)'de, baz istasyonlarında en fazla 8 anten kadar port kullanılabilir. Eğer bu anten sayısı artırılırsa, daha iyi veri hızı performansı sağlanabilir. Bu bilgi, Büyük Ölçek MIMO'nun bu konu için önemini vurgulamaktadır. Ayrıca yüksek frekans bantlarının kullanıldığı bir Büyük Ölçek MIMO sisteminde yüksek bit hızlarına ulaşılmıştır [71].

3.4.2. 5G için Gecikme

Gecikme çoğu gerçek zamanlı uygulamalar için önemli bir konudur. İletişimin kesintisiz bir şekilde bağlantı kopması olmadan yapılabilmesi için gecikmenin azaltılmasında Büyük Ölçek MIMO etkili bir yöntemdir. Çünkü Büyük Ölçek MIMO'da kullanılan çok sayıdaki antenden gelen sinyallerin birleştirilmesi ile birlikte sönümlenmeye karşı önemli bir dayanıklılık oluşturulur [1]. Böylece aynı yöntem sayesinde gecikme de azaltılmış olur.

3.4.3. 5G için Enerji ve Maliyet

Enerji ve maliyet gelişen teknolojiler için problem oluşturan en büyük zorlukların başında gelmektedir. Antenler tarafından gönderilen radyo dalgalarının kontrol edilebilmesi ile birlikte ışık hüzmelerinin enerjisi istenilen yerdeki uçbirimlerin bulunduğu küçük bölgelere odaklanabilir [68]. Büyük Ölçek MIMO ile birlikte şu anda kullanılan pahalı 50 W seviyelerindeki yükselteçler yerine daha düşük maliyetli, çıkış gücü mW seviyelerinde olan yükselteçler kullanılabilir [54]. İletim gücü bakımından, 256 verici antenli 20 GHz üstü büyük hüzmeli Büyük Ölçek MIMO toplam iletim gücünü 30 dB'den aşağıda tutabilmektedir [71]. Bu bilgiye göre enerji verimliliğinde ciddi bir iyileştirmenin mümkün olabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca

[72]'de, Elektromanyetik Lens Anten dizilerinin Büyük Ölçek MIMO ile birleştirildiği bir sistem sayesinde uygun enerji odaklanmasının ve maliyet azaltılmasının gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Büyük Ölçek MIMO'nun uygulanabilirliği açısından incelendiğinde [73]'teki çalışmada, her bir antenin yarı otonom işleyişi sayesinde daha düşük güç donanımlı, daha düşük maliyetli modüler bir sistemin gerçekleştirilebilme potansiyelinin olduğu vurgulanmıştır. Büyük Ölçek MIMO'da çeşitli algoritmalar ile birlikte kurulan sistemler aracılığıyla bit/J cinsinden 3 kata kadar bir enerji verimliliğinin mümkün olduğu görülmektedir [44]. Ayrıca Büyük Ölçek MIMO için büyük anten dizilerinin incelendiği ve bu dizilerin enerji ve maliyet açısından verimli bir tasarımın sunulduğu çalışmaya [74]'de ulaşılabilmektedir. Enerji verimliliğini etkileyebilecek bir durum olan PAPR, MIMO sistemleri için yüksek seviyelerdedir [75]. Çünkü PAPR, 5G kablosuz haberleşmede kullanılması muhtemel OFDM gibi çok taşıyıcılı sistemlerin sahip olduğu dezavantajlardan biridir [76]. Ayrıca OFDM, MIMO sistemlerinde kullanılan yaygın bir tekniktir. Bu açıdan, MIMO sistemlerinde PAPR seviyesini düşürecek çeşitli algoritmalar yapılmalıdır. Bu, 5G dalga şekli için de önemli bir konudur.

3.4.4. 5G için Spektrum Verimliliği

Frekans bantlarının kullanım verimliliğinin artırılması gerekliliği bu konuda yeni çalışmaların yapılmasını teşvik etmiştir. Büyük Ölçek MIMO, onlarca uç birimin aynı frekansı kullanarak hizmet vermesinden dolayı spektrum verimliliğine önemli bir katkı sağlamaktadır. 5G'nin, Büyük Ölçek MIMO kullanarak spektrumun verimli kullanılmasını sağlaması beklenmektedir [21]. Nitekim [31]'de yapılmış çalışmada, Büyük Ölçek MIMO'nun spektrum verimliliğini önemli ölçüde gerçekleştirebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca [54]'te, spektral verimliliğin 100 b/s/Hz gibi yüksek değerlere ulaşabildiği belirtilmektedir. Bit/s/Hz bakımından spektrum verimliliğinde 2 kata kadar bir iyileştirme Büyük Ölçek MIMO sistemi ile mümkün olabilmektedir [44]. Tam çift yönlü Büyük Ölçek MIMO hücreli sistemi kullanılarak gerçekleştirilen bir sistemde, aynı frekans bantlarının hem yukarı bağlantı hem de aşağı bağlantı tarafından tekrar kullanılabilmesi ile spektrumdan daha fazla yararlanma mümkün olmaktadır [68].

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Her yeni ağ geliştirilmesinde, artmakta olan kablosuz veri trafiğini yönetmek için alan veri akışında sıçrama yapılmalıdır. Büyük Ölçek MIMO teknolojisi, mevcut şebekelerde olduğu gibi aynı bant genişliği ve baz istasyon yoğunluğunu kullanırken, spektral verimliliği (*bit/s/Hz/Hücre*) artırarak, alan veriminde en az on kat iyileşme sağlayabilir. Bu olağandışı kazançlar, onlarca kullanıcı terminalinin mekansal çoğullamasını mümkün kılmak için baz istasyonlarını yüz antenli dizilerle donatarak elde edilir. Tezin bu bölümü, Büyük Ölçek MIMO teknolojisi kullanılarak gelecek nesil kablosuz iletişim teknolojileri için spektrum verimliliğinin iyileştirildiği çalışmayı ilgili benzetim kıyaslamaları ile birlikte içermektedir.

4.1. GİRİŞ

Gelecekteki hücresel şebekelerde, kablosuz veri trafiği için küresel talep sürekli olarak artıyor olduğundan, daha yüksek alan veri iletimi gereklidir. Bu hedef, spektral verimlilik (*bit/s/Hz/Hücre* cinsinden ölçülürse) daha fazla bant genişliği veya ek baz istasyonları gerekmeden başarılabilir. Bu bölümde, çok antenli baz istasyonlarının bir çok kullanıcı terminalini tüm bant genişliği boyunca uzaysal olarak birleştirdiği Büyük Ölçek MIMO bu amaç için çok uygundur. Büyük Ölçek MIMO'nun spektrum verimlilikte etkisinin temel noktaları Bölüm 4.2'de açıklanmıştır. Daha sonra, Bölüm 4.3'te Büyük Ölçek MIMO'nun performans analizi üzerinde durulmuş olup spektral verimlilik ifadeleri verilmiştir. Benzetim sonuçları bölümü, geliştirilen teoriye göre Büyük Ölçek MIMO'nun 5G şebekelerine sunabileceği spektrum verimliliği (SV) ile alakalı çalışmaların verildiği Bölüm 4.4 ile sonuçlandırılmıştır.

4.2. SPEKTRUM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNİN ÖNEMİ

90'lı yıllardan itibaren kullanılan kablosuz iletişim trafiği gün geçtikçe hızlı bir artış göstermektedir. Hızlı trafik artışı ile başa çıkabilmek için 5G teknolojisi gelecek nesil kablosuz iletişimde yerini alacaktır. 5G tasarım hedefleri arasında olan spektrum

verimliliği ile ilgili bilgilere tezin ilerleyen bölümlerinde yer verilmiştir.

Bir kablosuz ağın alan verimliliği, bit / s / km² cinsinden ölçülür ve şu şekilde modellenebilir:

$$\underbrace{\text{Alan verimliliği}}_{\text{bit/s/km}^2} = \underbrace{\text{Bantgenişliği}}_{\text{Hz}} \times \underbrace{\text{Hücre yoğunluğu}}_{\text{Hücre/km}^2} \times \underbrace{\text{Spektrum verimlilik}}_{\text{bit/s/Hz/ hücre}}$$

Önceki ağ nesillerindeki alan verimliliğindeki gelişmeler, hücre yoğunluğundan ve daha fazla bant genişliğinin tahsisinden büyük ölçüde kaynaklanmıştır. Günümüzde çağdaş şebekelerin en yoğun trafik talepleri ile karşı karşıya bulunduğu kentsel ortamlarda, hücresel şebekeler günümüzde birkaç yüz metre aralıklarla ve kablosuz yerel ağlar (WLAN'lar) ile hemen hemen her yerde kullanılmaktadır. Kesinlikle, daha fazla hücre yoğunlaşması mümkündür, ancak bir doyma noktasına ulaşıldığı görülmektedir. Önceki nesil ağ nesillerindeki spektrum verimlilik (SV) önemli gelişmeler göstermemiştir. Dolayısıyla, gelecekte büyük ölçüde iyileştirilebilen ve muhtemelen 5G şebekelerinde yüksek alan verimliliği elde etmenin birincil yolu haline gelen bir faktör olabilir. Bu kısımda, gelecek nesil kablosuz iletişimin SV'sini geliştirebilen MIMO etkisi incelenmektedir.

4.2.1. Çok Kullanıcılı MIMO İletişimi

Tekli anten vericisinden tekli anten alıcısına kadar tek girişli tek çıkışlı (SISO) iletişim kanalının SV değeri, $\log_2(1 + SNR)$ bit/s formunda olan Shannon kapasitesi ile sınırlandırılmıştır. SISO kapasitesi, SNR olarak gösterilen sinyal-gürültü oranının (SNR) logaritmik bir fonksiyonudur. SV'yi geliştirmek için, gönderilen sinyalin gücünün artırılmasına karşılık gelen SNR'yi arttırmamız gerekmektedir. Örneğin, 2 bit/s/Hz 'de çalışan bir sisteme sahip olduğumuzu ve SV'yi 4 bit/s/Hz olarak iki katına çıkarmak istediğimizi düşünürsek, bunun için SNR 'ı 3'den 15'e kadar çıkarmak gerekmektedir ki bu da 5 katına karşılık gelmektedir. SV'nin sonraki iki katına çıkarılması yani 4 katından 8 bit/s/Hz 'e çıkması için 17 kat daha fazla güç gerekmektedir. Başka bir deyişle, SV ifadesinin logaritması, SISO kanalının SV'sinde doğrusal bir artış elde etmek için iletim gücünü katlanarak hızlı bir şekilde arttırmaya zorlamaktadır. Bu nedenle, hücresel şebekelerin SV'sini iyileştirmenin başka bir yöntemi üzerinde durulmalıdır.

Bir hücresel şebekedeki her ana istasyon (BS) çok sayıda kullanıcı terminaline hizmet eder. Bu terminal daha sonra $\log_2(1 + SNR)$ olarak nicemlenmiş bir SV ile tek bir veri

akışı alabilir. Bir hücrenel şebekenin SV'sini arttırmanın etkili yolu, çoklu paralel iletimlere sahip olmaktır. G adet paralel ve bağımsız iletimler olduğu varsayılırsa, SV toplamı $G \log_2(1 + SNR)$ olur; burada G , çarpımsal ön-log faktörü olarak işlev görür. Bu paralel iletimler, çoklu verici antenleri ve çoklu alıcı antenleri ile gerçekleştirilebilir. Bunun için de iki farklı durum üzerinde durulabilir:

1. Noktadan noktaya MIMO [77], burada çok antenli bir BS, çoklu antenlere sahip tek bir kullanıcı terminaliyle iletişim kurar.
2. Birden fazla anten bulunan bir BS'nin birden fazla kullanıcı terminali ile iletişim kurduğu, her biri bir veya birden fazla anten bulunan çok kullanıcı MIMO [43].

Çok kullanıcı MIMO'nun en ölçeklenebilir ve cazip çözüm olmasının birçok nedeni vardır [78]. İlk olarak, dalga boyu hücrenel iletişim frekans aralığında (1-6 GHz) 5-30 cm'dir. Bu, noktadan noktaya MIMO için kompakt bir kullanıcı terminalinde konuşlandırılabilen anten sayısını sınırlarken, çok kullanıcı MIMO'da hemen hemen her sayıda uzamsal olarak ayrılmış tek anten terminaline sahip olabilir. MIMO işlemi ile ayrılabilen eşzamanlı veri akışlarının sayısı, gönderim ve alımı antenlerinin sayısının asgari sayısına eşit olduğu için, bu önemli bir ayrımdır. İkincisi, bir kullanıcı terminaline giden kablosuz iletişim kanalı, muhtemelen çok sayıda paralel veri akışını noktadan noktaya MIMO'daki bir terminale taşıma kabiliyetini sınırlayan yalnızca birkaç hâkim yola sahip olacaktır. Çok kullanıcı MIMO'ya karşılık gelen kısıtlama, kullanıcıların, çoğu pratik senaryoda geçerli olan çok gevşek bir kısıtlama olan yeterince farklı kanal özelliklerine sahip olmak için birkaç metre dışında olması gerektiğidir. Üçüncü olarak, çoklu veri akışlarını saptamak için noktadan noktaya MIMO terminallerinde ileri sinyal işleme gereklidir; ancak çoklu kullanıcı MIMO'daki her terminal sadece tek bir veri akışını algılamak zorundadır.

Bölüm 3 Şekil 3.1'de verilmiş olan MIMO sisteminde BS, kullanıcı başına bir veri akışını aşağı bağlantıda çoğaltır ve yukarı bağlantıda kullanıcı başına bir akış alır. Yani BS antenleri, her bir sinyali aşağı bağlantıda istenen alıcıya yönlendirmek ve yukarı bağlantıda alınan çoklu sinyalleri ayırmak için kullanır. Terminal birden fazla antenle donatılmışsa, parazitleri azaltmak ve birden çok veri akışı göndermek yerine SNR'yi arttırmak için bu fazladan antenleri kullanmanın faydalı olduğuna değinilmiştir [79].

4.2.2. Büyük Ölçek MIMO Kavramı

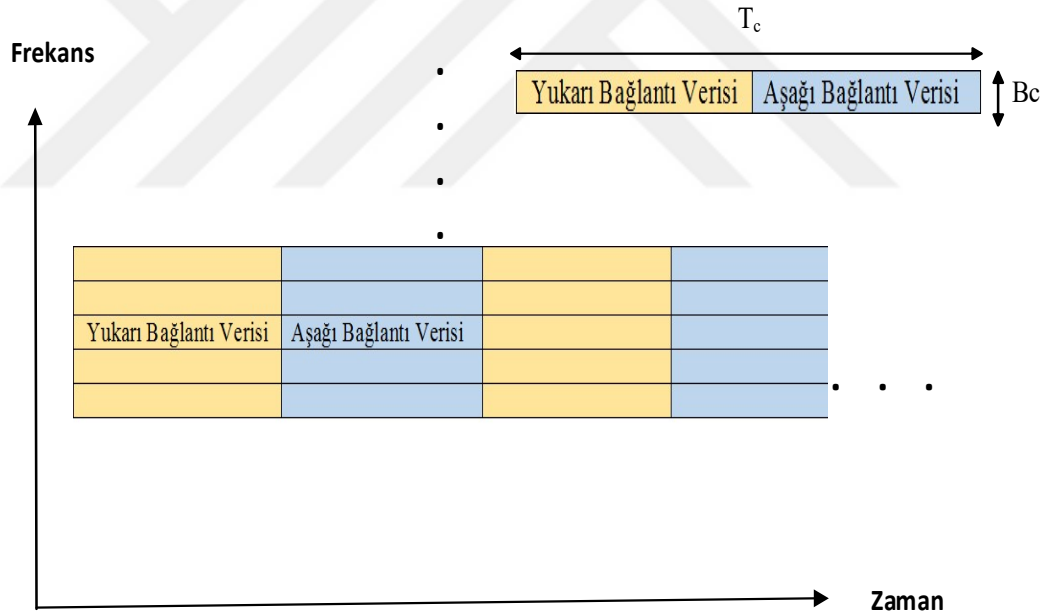
Büyük Ölçek MIMO, BS başına M antenli ve K kullanıcı, çok kullanıcı bir MIMO

sistemidir. Sistem $M \gg K$ ile karakterize edilir ve doğrusal yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı işleme alınarak TDD modunda çalışır.

BS anten dizisi tipik olarak M dipol antenlerden oluşur ve her biri $\lambda/2 \times \lambda/2$ efektif boyutuna sahiptir, burada λ dalga boyudur. Her bir anten, ayrı bir alıcı-verici zincirine bağlıdır, böylece sistem, her bir antendeki tek tek alınan sinyallere erişebilir ve her antenden iletilecek olan ayrı sinyalleri seçebilir. Dizinin herhangi bir geometrisi olabilir; doğrusal, dikdörtgen, silindirik ve dağıtılmış diziler [54]'de belirtilmiştir. Dizilim geometrisinin herhangi bir modelinin Büyük Ölçek MIMO işleminde kullanılması gerekmediğine dikkat etmek önemlidir, bu nedenle antenler herhangi bir geometrik dizi kalibrasyonu yapılmaksızın keyfi olarak konuşlandırılabilir.

Temel Büyük Ölçek MIMO iletim protokolü

Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Büyük Ölçek MIMO İletim Protokolünün Gösterimi [28].

Zaman frekansı kaynakları, her bir kullanıcı kanalını bir blok içinde yaklaşık frekansla düz ve statik hale getirmek amacıyla B_c Hz ve T_c s boyutlarındaki bloklara ayrılmıştır. Dolayısıyla, bant genişliği B_c , kullanıcılar arasındaki beklenen kanal tutarlılık bant genişliğinden daha küçük veya eşit olacak şekilde seçilirken, T_c kullanıcıların beklenen kanal tutarlılık süresinden daha küçük veya eşittir. Bu özel nedenden ötürü, her bloğa bir tutarlılık aralığı denir. Bir tutarlılık aralığına uyan iletim simgeleri sayısı, Nyquist-

Shannon örnekleme teoreminden dolayı tutarlılık aralığı (coherence time) olarak ifade edilen $\tau_c = B_c T_c$ ile verilmiştir. Tutarlılık aralığının boyutu, öngörülen sistem uygulamasına büyük ölçüde bağlıdır. Örneğin, 2GHz taşıyıcı frekansta kentsel çevrede otoyol kullanıcı hızlarını destekleyen $B_c = 200$ kHz ve $T_c = 1$ ms ile $\tau_c = 200$ simgelerden oluşan bir tutarlılık aralığı elde edilebilir.

Her tutarlılık aralığı TDD modunda çalışır ve hem aşağı bağlantı hem de yukarı bağlantı yükü iletimlerini içerebilir. BS'deki kanal tahminini etkinleştirmek için, her tutarlılık aralığındaki sembollerin τ_p (CSI uzunluğu)'si pilot dizilerin yukarı bağlantı iletiminde tahsis edilirken (burada $\tau_p \gg K$), geri kalan $\tau_c - \tau_p$ sembolleri ise, yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı yükü arasında keyfi olarak tahsis edilebilir.

Sırasıyla, yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı yük iletiminin kesirlerini γ^{UL} ve γ^{DL} belirtelim. Bu, yukarı bağlantının $\gamma^{UL} (\tau_c - \tau_p)$ veri sembollerini içerdiği ve aşağı bağlantıda, tutarlılık aralığı başına $\gamma^{DL} (\tau_c - \tau_p)$ veri sembolleri bulunduğu anlamına gelir. Doğal olarak bu kesirler $\gamma^{UL} + \gamma^{DL} = 1$ 'i ve $\gamma^{UL}, \gamma^{DL} \geq 0$ 'i karşılar [64].

4.3. BÜYÜK ÖLÇEK MIMO İÇİN TEORİKSEL ANALİZ

Bu bölümde, bir Büyük Ölçek MIMO ağının yukarı bağlantı algılama ve aşağı bağlantı ön kodlamasını ve erişilebilir sistem performansları analiz edilmiştir. Her biri, M antenli ve K tek antenli kullanıcı terminallerine sahip bir BS'den oluşan L hücreleri içeren bir Büyük Ölçek MIMO ağında işlemler gerçekleştirilmiştir.

i. hücredeki l. BS ile k. kullanıcı arasındaki kanal tepkisi, $\mathbf{h}_{i,k}^l = [h_{i,k,1}^l \dots h_{i,k,M}^l]^T \in C^M$ ile gösterilir; burada $(.)^T$ transpozeyi ifade etmektedir. Her kanal katsayısının ortalama değeri ve varyansı $h_{i,k,m}^l$ (m; l. BS 'deki m. anteni ifade eder, $m = 1, \dots, M$ için).

$h_{i,k}^l$ 'in m. katsayısının varyansı,

$$\beta_{i,k}^l = \mathbb{V}\{h_{i,k,m}^l\} \quad (4.1)$$

ile gösterilir. Bu kanal özelliklerini kullanarak, yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı analizi aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir.

4.3.1. Doğrusal Algılama İle Yukarı Bağlantı

Her yukarı bağlantı simgesi için, l. BS'deki alınan temel bant sinyali $\mathbf{y}_l \in C^M$ [80]'deki

denklemlerden yararlanılarak

$$\mathbf{y}_l = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{i,k}^l \sqrt{P_{i,k}} x_{i,k} + \mathbf{n}_l \quad (4.2)$$

olarak modellenmiştir, burada $x_{i,k}$ normalleştirilmiş iletim simgesidir ($\mathbb{E}\{|x_{i,k}|^2\} = 1$) ve $P_{i,k}$ hücre i 'deki k kullanıcısının gönderim gücünü ifade etmektedir. $\mathbf{H}_i^l = [\mathbf{h}_{i,1}^l \dots \mathbf{h}_{i,K}^l] \in \mathbb{C}^{M \times K}$, $\mathbf{P}_i = \text{diag}(P_{i,1}, \dots, P_{i,K}) \in \mathbb{C}^{K \times K}$ ve $\mathbf{x}_i = [x_{i,1} \dots x_{i,K}]^T \in \mathbb{C}^K$ matris gösterimleri, çok hücreli çok kullanıcı MIMO sistem modeli Denklem (4.2)'den kompakt bir matris formu olan Denklem (4.3)'i oluşturmak için kullanılabilir:

$$\mathbf{y}_l = \sum_{i=1}^L \mathbf{H}_i^l \mathbf{P}_i^{1/2} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_l \quad (4.3)$$

$\mathbf{h}_{i,k}^l$ kanalları iyi algılama gerçekleştirmek için BS l 'de tahmin edilmelidir ve bu her kullanıcının bir dizi τ_p pilot simgesi göndermesine izin vererek yukarı bağlantıda yapılır. Pilot yeniden kullanım faktörü olarak adlandırılan bazı pozitif tam sayı f (örneğin 1, 2,...) için $\tau_p = fK$ eşitliği kabul edilmektedir [81].

Pilot iletimi sırasında l . BS'de yukarı bağlantıda alınan sinyal $\mathbf{Y}_l^{\text{pilot}} \in \mathbb{C}^{M \times \tau_p}$ [40]'daki ifadelerle benzer şekilde Denklem (4.4) gibi olmaktadır.

$$\mathbf{Y}_l^{\text{pilot}} = \sum_{i=1}^L \mathbf{H}_i^l \mathbf{P}_i^{1/2} \boldsymbol{\Phi}_i^H + \mathbf{N}_l \quad (4.4)$$

Burada, $\boldsymbol{\Phi}_i = [\boldsymbol{\phi}_{i,1} \dots \boldsymbol{\phi}_{i,K}] \in \mathbb{C}^{\tau_p \times K}$, i hücresindeki K kullanıcısı tarafından kullanılan pilot matrisini belirtir; burada $\boldsymbol{\phi}_{i,k} \in \mathbb{C}^{\tau_p}$, o hücredeki k . kullanıcısı tarafından kullanılan pilot dizidir. Pilot matrisi $\boldsymbol{\Phi}_i^H \boldsymbol{\Phi}_i = \tau_p \mathbf{I}_K$ eşitliğini karşılar. Eğer hücre i ve hücre j aynı hücre grubuna aitse yani, aynı pilot setini kullanırsa $\boldsymbol{\Phi}_i^H \boldsymbol{\Phi}_j = \tau_p \mathbf{I}_K$ iken; iki hücre farklı hücre gruplarına aitse $\boldsymbol{\Phi}_i^H \boldsymbol{\Phi}_j = \mathbf{0}$ 'dır.

Bölüm 4.3'ün başında tanımlanan kanal ortalaması ve varyanslarını kullanarak doğrusal minimum ortalama karesel hata (LMMSE) tahminicisini pilot sinyali Denklem (4.4)'ten alınan $\mathbf{h}_{i,k}^l$ 'nin her elemanını ayrı olarak elde etmek için kullanılabilir.

Gerçek kanal tepkisi $\mathbf{h}_{i,k}^l$ ile ilgili $\hat{\mathbf{h}}_{i,k}^l$ kanalı tahmini aşağıdaki Literatür çıkarımı 1 yardımıyla türetilmektedir.

4.3.1.1. Literatür çıkarımı 1

$\boldsymbol{\phi}_{j,k} \in C^{\tau_p}$ k kullanıcısı tarafından j. hücrede kullanılan pilot dizisidir, burada $\boldsymbol{\Phi}_i = [\boldsymbol{\phi}_{j,1} \dots \boldsymbol{\phi}_{j,K}]$ 'dir. İstenilen kanal $h_{j,k}^l$ Denklem (4.4)'te $\mathbf{h}_{j,k}^l \boldsymbol{\phi}_{j,k}^H$ olarak görüldüğünden, bu kanalı tahmin etmek için yeterli istatistik [49]'daki ifadeler yardımıyla Denklem (4.5) ile verilmiştir.

$$\mathbf{Y}_l^{pilot} \boldsymbol{\phi}_{j,k} = \sum_{i=1}^L \mathbf{H}_i^l \mathbf{P}_i^{1/2} \boldsymbol{\Phi}_i^H \boldsymbol{\phi}_{j,k} + \mathbf{N}_l \boldsymbol{\phi}_{j,k} = \sum_{i \in \mathbb{P}_j} \sqrt{P_{i,k}} \tau_p \mathbf{h}_{i,k}^l + \tilde{\mathbf{n}}_{i,j,k} \quad (4.5)$$

bu denklemde \mathbb{P}_j ile hücre j ile aynı hücre grubuna ait hücre indeksleri kümesini ifade etmektedir. Ayrıca, $\tilde{\mathbf{n}}_{i,j,k} = \mathbf{N}_l \boldsymbol{\phi}_{j,K} = [\tilde{n}_{l,j,k,1} \dots \tilde{n}_{l,j,k,M}]^T$ 'dir. Denklemdeki ikinci eşitliği ise pilot dizilerinin kabul edilen ortogonal özelliğinden yararlanılarak oluşturulmuştur.

Denklem (4.5) kullanılarak, $\mathbf{h}_{j,k}^l$ 'nin her bir öğesinin LMMSE tahmini hesaplanmaktadır. $y_{l,j,k,m}$ Denklem (4.5)'teki vektörün m. sırasını gösterdiğini varsayarak Denklem (4.6)'ı [49]'daki gibi oluşturulur.

$$y_{l,j,k,m} = \sum_{i \in \mathbb{P}_j} \sqrt{P_{i,k}} \tau_p h_{i,k,m}^l + \tilde{n}_{l,j,k,m} \quad (4.6)$$

[82]'deki LMMSE tahmini tanımı kullanılarak, $h_{j,k,m}^l$ için LMMSE tahmini

$$\hat{h}_{j,k,m}^l = \mathbb{E}\{h_{j,k,m}^l\} + \frac{\text{Cov}\{h_{j,k,m}^l, y_{l,j,k,m}\}}{\mathbb{V}\{y_{l,j,k,m}\}} (y_{l,j,k,m} - \mathbb{E}\{y_{l,j,k,m}\}) \quad (4.7)$$

ile verilmiştir. Bu denklemde $\mathbb{E}\{h_{j,k,m}^l\} = \bar{h}_{j,k,m}^l$ olarak verilir, bu da ortalama değer vektörünü ifade eder. Ayrıca, $\text{Cov}\{\dots\}$ kovaryans anlamına gelmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki gibi yazılabilir [49].

$$\mathbb{E}\{y_{l,j,k,m}\} = \sum_{i \in \mathbb{P}_j} \sqrt{P_{i,k}} \tau_p \bar{h}_{i,k,m}^l \quad (4.8)$$

$$\text{Cov}\{h_{j,k,m}^l, y_{l,j,k,m}\} = \sqrt{P_{j,k}} \tau_p \beta_{j,k}^l \quad (4.9)$$

$$\mathbb{V}\{y_{l,j,k,m}\} = \sum_{i \in \mathbb{P}_j} P_{j,k} \tau_p^2 \beta_{i,k}^l + \tau_p \sigma_{UL}^2 \quad (4.10)$$

Denklem (4.8) ve Denklem 4.10 Denklem (4.7)'de yerine yazılarak Denklem (4.11) aşağıdaki gibi türetilir. Burada $\beta_{j,k}$ ifadesi kanal varyansını temsil etmektedir.

$$\hat{h}_{j,k}^l = \bar{h}_{j,k}^l + \frac{\sqrt{P_{j,k}} \beta_{j,k}^l}{\sum_{i \in \mathbb{P}_j} P_{j,k} \tau_p \beta_{i,k}^l + \sigma_{UL}^2} \left(Y_l^{pilot} \boldsymbol{\phi}_{j,k} - \sum_{i \in \mathbb{P}_j} \sqrt{P_{i,k}} \tau_p \bar{h}_{i,k}^l \right) \quad (4.11)$$

MMSE tahmini ve hatası birbiriyle ilişkisiz olduğu [39]'da verildiğinden dolayı, tahminin varyansı

$$\mathbb{V}\{\hat{h}_{j,k,m}^l\} = \frac{|\text{Cov}\{h_{j,k,m}^l, y_{l,j,k,m}\}|^2}{\mathbb{V}\{y_{l,j,k,m}\}} = \frac{P_{j,k} \tau_p^2 (\beta_{j,k}^l)^2}{\sum_{i \in \mathbb{P}_j} P_{j,k} \tau_p \beta_{i,k}^l + \sigma_{UL}^2} \quad (4.12)$$

ile verilmektedir.

Yukarı bağlantı yükü veri iletimi, 1. hücredeki BS'nin, yalnızca Denklem (4.2)'deki alınan sinyal olan y_l 'yi kullanması ve yalnızca kendi K kullanıcıları tarafından gönderilen sinyalleri saptamayı hedeflemesi durumudur. Diğer hücrelerdeki kullanıcılardan gelen sinyaller hücre içi girişim olarak algılanır ve sonunda ek gürültü olarak değerlendirilir. 1 hücredeki BS, Denklem (4.2)'den alınan sinyali bir doğrusal algılama vektörü $\mathbf{v}_{l,k} \in \mathbb{C}^M$ ile çarparak kendi k. kullanıcısı tarafından iletilen sinyali parazitten ayırt etmektedir. Bu ifade ise [3] ve [83]'teki denklemler aracılığıyla aşağıdaki gibi türetilmektedir:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{y}_l &= \sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K \mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{i,t}^l \sqrt{P_{i,t}} x_{i,t} + \mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{n}_l \\ &= \underbrace{\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{l,k}^l \sqrt{P_{l,k}} x_{l,k}}_{\text{İstenilen Sinyal}} \\ &\quad + \underbrace{\sum_{\substack{t=1 \\ t \neq 1}}^K \mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{l,t}^l \sqrt{P_{l,t}} x_{l,t}}_{\text{Hücre içi girişim}} + \underbrace{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 1}}^L \sum_{t=1}^K \mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{i,t}^l \sqrt{P_{i,t}} x_{i,t}}_{\text{Hücrelerarası girişim}} + \underbrace{\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{n}_l}_{\text{Kalan gürültü}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

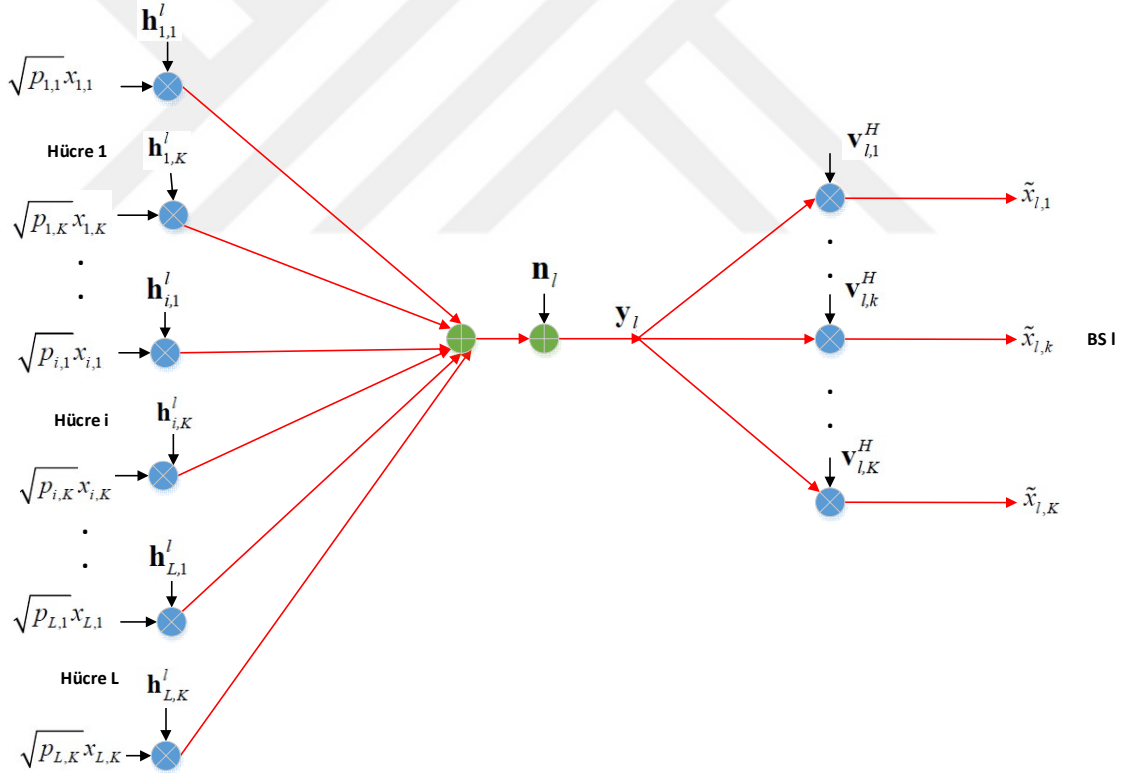
burada $x_{i,t}$ hücre i 'deki t kullanıcısı tarafından iletilen veri simgesidir. Denklem (4.13)'de görüldüğü gibi işlem görmüş alınan sinyal dört parçanın üst üste yerleşimidir. Bunlar; istenilen sinyal, hücre içi girişim, hücrelerarası girişim ve kalan gürültüdür.

Doğrusal algılama vektörü $\mathbf{v}_{l,t}$ tüm bu terimlerle ortaya çıktığı için, arzu edilen sinyali yükseltmek, paraziti bastırmak ve/veya gürültüyü bastırmak için kullanılabilir. Daha doğrusu, BS l'deki saptama vektörleri $\mathbf{V}_l = [\mathbf{v}_{l,1} \dots \mathbf{v}_{l,K}] \in \mathbb{C}^{M \times K}$ matris formunda toplanarak, Büyük Ölçek MIMO literatüründeki maksimum oran (MR) ve sıfır- zorlama (ZF) ana şemaları göz önüne alınmıştır. Bunlar

$$\mathbf{V}_l = \begin{cases} \hat{\mathbf{H}}_l^l & MR \text{ için} \\ \hat{\mathbf{H}}_l^l [(\hat{\mathbf{H}}_l^l)^H \hat{\mathbf{H}}_l^l]^{-1} & ZF \text{ için} \end{cases} \quad (4.14)$$

ile verilir.

Doğrusal algılama ile yukarı bağlantı iletiminin bir blok diyagramı Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Bir MIMO Sisteminde Doğrusal Algılama ile Yukarı Bağlantı İletiminin Blok Diyagramı.

Bu diyagramda gerçekleştirilen olay BS l'de tespit edilen $\tilde{x}_{l,k}$ sinyalini gerçek sinyal olan $x_{l,k}$ 'ye eşitlemeye çalışmaktır. Gürültü ve tahmin hatalarından dolayı, sinyaller arasında uyumsuzluk mevcuttur. Bu nedenle iletişim bağlantısının sınırlı bir kapasitesi

vardır. Gerçek sinyal $x_{l,k}$ bir karesel genlik modülasyonu (QAM) kümesi olan \mathfrak{X} 'den kaynaklandığı varsayılırsa; $\tilde{x}_{l,k}$ $\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{y}_l$ 'ye dayanılarak, tüm adaylar için minimum mesafenin bulunmasıyla seçilir:

$$\tilde{x}_{l,k} = \min_{x \in \mathfrak{X}} |\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{y}_l - \mathbf{v}_{l,k}^H \hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l \sqrt{P_{l,k}} x|^2 \quad (4.15)$$

bu ifade, bit hata oranlarını hesaplamak için kullanılabilir. Günümüzdeki modern iletişim sistemleri kanal kodlamayı nispeten uzun veri bloklarına uyguladığından hatalara karşı korumak için ergodik kanal kapasitesi 5G kablosuz teknolojisinde daha uygun bir performans metriğidir. Aşağıda türetilmiş olan Literatür çıkarımı 2 ile hesaplanabilir olan alt sınırlar elde edilmiştir.

4.3.1.2. Literatür çıkarımı 2

Yukarı bağlantıda, 1 hücredeki keyfi bir k kullanıcısının ergodik kapasitesi üzerinde bir alt sınırı Denklem (4.16) ile verilmektedir [49].

$$R_{l,k}^{UL} = \gamma^{UL} \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) \log_2(1 + SNR_{l,k}^{UL}) \quad (4.16)$$

buradaki SNR ifadesi [49]'daki işlemler göz önüne alınarak Denklem (4.17) ile ifade edilmiştir.

$$SNR_{l,k}^{UL} = \frac{p_{l,k} |\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{l,k}^l\}|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K p_{i,t} \mathbb{E}\{|\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{i,t}^l|^2\} - p_{l,k} |\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{l,k}^l\}|^2 + \sigma_{UL}^2 \mathbb{E}\{\|\mathbf{v}_{l,k}\|^2\}} \quad (4.17)$$

Literatür çıkarımı 2, bir Büyük Ölçek MIMO ağında bulunan 1 hücredeki k keyfi kullanıcının erişilebilir SV'sinin, küçük ölçekli kanal sönümlenmesi ile ilgili beklentileri içeren $SNR_{l,k}^{UL}$ tarafından bir SNR terimi tanımlanabileceğini göstermektedir. Pay, istenilen sinyalin kazancını içerirken payda üç farklı terim içerir. Birinci terim, hem çoklu kullanıcı karışımı hem de istenilen sinyal de dâhil olmak üzere tüm sinyallere ait ortalama güce karşılık gelir; ikinci terim, şifre çözme için kullanılabilen istenilen sinyal gücünün bir kısmını çıkarır. Üçüncü terim ise efektif gürültü gücüdür. SV, aynı zamanda yukarı bağlantı verilerinin kesir olarak tanımlanan γ^{UL} ile çarpılır. Açıkçası MR algılama, $SNR_{l,k}^{UL}$ payını maksimize etmeyi amaçlarken, ZF algılama hücre içi girişimi en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Literatür çıkarımı 2'deki beklentiler, herhangi bir kanal dağılımı ve herhangi bir algılama şeması için sayısal olarak hesaplanabilir. MR algılaması durumunda istenen sinyal kazancı $|\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{l,k}^H \mathbf{h}_{l,k}^l\}|^2$, çoğu kanal dağılımı için M^2 olarak büyür, fakat gürültü terimi $\sigma_{UL}^2 \mathbb{E}\{\|\mathbf{v}_{l,k}\|^2\}$ yalnızca M olarak büyür ve daha çok anten BS'de konuşlandırıldıkça daha az önem kazanır. Bu özellik dizi kazancı olarak bilinir. Çoklu kullanıcılı karışımları içeren terimlerin davranışı kanal dağılımına büyük ölçüde bağlıdır, fakat tipik olarak bu terimler, pilot iletim sırasında birbirine müdahale eden kullanıcılar hariç M 'nin yavaş ölçeklendirilmesine de sahip olacaklardır [84].

Hücre i 'deki BS l ile kullanıcı k arasındaki kanalın ilişkisiz Rayleigh sönümlemesi [44] durumunda, Literatür çıkarımı 1'deki LMMSE tahmini Denklem (4.18)'deki gibi basitleştirilir.

$$\hat{\mathbf{h}}_{j,k}^l = \frac{\sqrt{P_{j,k}} \beta_{j,k}^l}{\sum_{i \in \mathbb{P}_j} P_{j,k} \tau_p \beta_{i,k}^l + \sigma_{UL}^2} (\mathbf{Y}_l^{pilot} \boldsymbol{\phi}_{j,k}) \quad (4.18)$$

Denklem (4.17)'deki LMMSE tahmini, kanallar Gauss dağılımlı olduğu için [82], Rayleigh sönümleme durumunda da geçerlidir. Bu temel özellikleri kullanarak, Literatür çıkarımı 2'deki SV durumları aşağıdaki çıkarımlarda belirtildiği gibi MR ve ZF algılaması için hesaplanabilir.

4.3.1.3. Literatür çıkarımı 3

Rayleigh sönümleme kanalları [49], [65] için hücre i ($i = 1 \dots L$) ve BS l 'deki rastgele bir t kullanıcısı arasındaki kanal için [85]'teki çalışmalar baz alınarak oluşturulmuş olan aşağıdaki denklemler daha önceki bölümlerde belirtilmiştir.

$$\mathbb{V}\{h_{j,k,m}^l\} = \beta_{i,t}^l \quad (4.19)$$

$$\mathbb{V}\{\hat{h}_{j,k,m}^l\} = \frac{P_{i,t} \tau_p (\beta_{i,t}^l)^2}{\sum_{i \in \mathbb{P}_l} P_{i,t} \tau_p \beta_{i,t}^l + \sigma_{UL}^2} \quad (4.20)$$

$$MSE_{i,t}^l = \beta_{i,t}^l \left(1 - \frac{P_{i,t} \tau_p \beta_{i,t}^l}{\sum_{i \in \mathbb{P}_l} P_{i,t} \tau_p \beta_{i,t}^l + \sigma_{UL}^2} \right) \quad (4.21)$$

İlk olarak MR algılaması durumunda $\mathbf{v}_{l,k} = \hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l$ olduğu zaman, Literatür çıkarımı 2'deki $SNR_{l,k}^{UL}$ Denklem (4.22)'deki gibi olur [85].

$$\begin{aligned}
& SNR_{l,k}^{MR,UL} \\
&= \frac{p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l)^H \mathbf{h}_{l,k}^l \right\} \right|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K p_{i,t} \mathbb{E} \left\{ \left| (\hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l)^H \mathbf{h}_{i,t}^l \right|^2 \right\} - p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l)^H \mathbf{h}_{l,k}^l \right\} \right|^2 + \sigma_{UL}^2 \mathbb{E} \left\{ \left\| \hat{\mathbf{h}}_{l,k}^l \right\|^2 \right\}} \quad (4.22)
\end{aligned}$$

daha sonra ZF algılaması durumunda, $\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{l,k}^l\} = 1$ 'dir. Buna ek olarak, Denklem (4.17)'deki gürültü terimi $(\hat{\mathbf{H}}_l^l)^H \hat{\mathbf{H}}_l^l$ 'nin M serbestlik derecesine sahip bir $K \times K$ merkez kompleks Wishart matrisi [77]'de Denklem (4.23) olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{UL}^2 \mathbb{E} \left\{ \left\| \mathbf{v}_{l,k}^l \right\|^2 \right\} = \sigma_{UL}^2 \mathbb{E} \left\{ \text{tr} \left[(\hat{\mathbf{H}}_l^l)^H \hat{\mathbf{H}}_l^{l-1} \right]_{k,k} \right\} = \frac{\sigma_{UL}^2}{(M-K) \mathbb{V} \{ \hat{h}_{l,k,m}^l \}} \quad (4.23)$$

burada $[\dots]_{k,k}$ bir matrisin k. diyagonal elemanını belirtmek için kullanılmaktadır. Denklem (4.17)'de $\mathbb{E}\{\mathbf{v}_{l,k}^l\} = 1$ ifadesi ve Denklem (4.23) ifadeleri yerlerine yazıldığında Denklem (4.24) [85]'teki gibi elde edilmektedir.

$$SNR_{l,k}^{ZF,UL} = \frac{p_{l,k}}{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K p_{i,t} \mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{v}_{l,k}^l \mathbf{h}_{i,t}^l \right|^2 \right\} - p_{l,k} + \frac{\sigma_{UL}^2}{(M-K) \mathbb{V} \{ \hat{h}_{l,k,m}^l \}}} \quad (4.24)$$

Özetlemek gerekirse, Büyük Ölçek MIMO ağları için, Literatür çıkarımı 1'de bit hata oranlarının hesabı için ifadelerle birlikte kanal tahmini için uygulanabilecek denklemler gösterilmiştir. Yukarıda belirtilen yayılım varsayımlarına dayanarak ön kodlama ile birlikte BS'deki anten sayısı ile alakalı Büyük Ölçek MIMO sisteminin kapasitesinin elde edilebildiği gösterilmiştir. Literatür çıkarımı 2'deki ifadeler genel kanal dağılımlarının yanında Büyük Ölçek MIMO ağında bulunan l hücresindeki k keyfi kullanıcının erişilebilir SV'sinin, küçük ölçekli kanal sönümlenmesi ile ilgili beklentileri içeren $SNR_{l,k}^{UL}$ tarafından bir SNR teriminin tanımını göstermektedir. Literatür çıkarımı 3'teki ifadeler Rayleigh sönümlenmesi için yukarı bağlantı SV ifadelerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Bu ifadeler, Büyük Ölçek MIMO sistemiyle performans verimliliğini göstermek için Bölüm 4.4'te kullanılmıştır.

4.3.2. Doğrusal Ön Kodlama ile Aşağı Bağlantı

BS'lerin kullanıcılarına sinyal gönderdikleri bir Büyük Ölçek MIMO sisteminde aşağı bağlantı durumunda rastgele bir BS l'de K kullanıcısı için gönderilen sinyal vektörü

Denklem (4.25) ile belirtilmektedir [80].

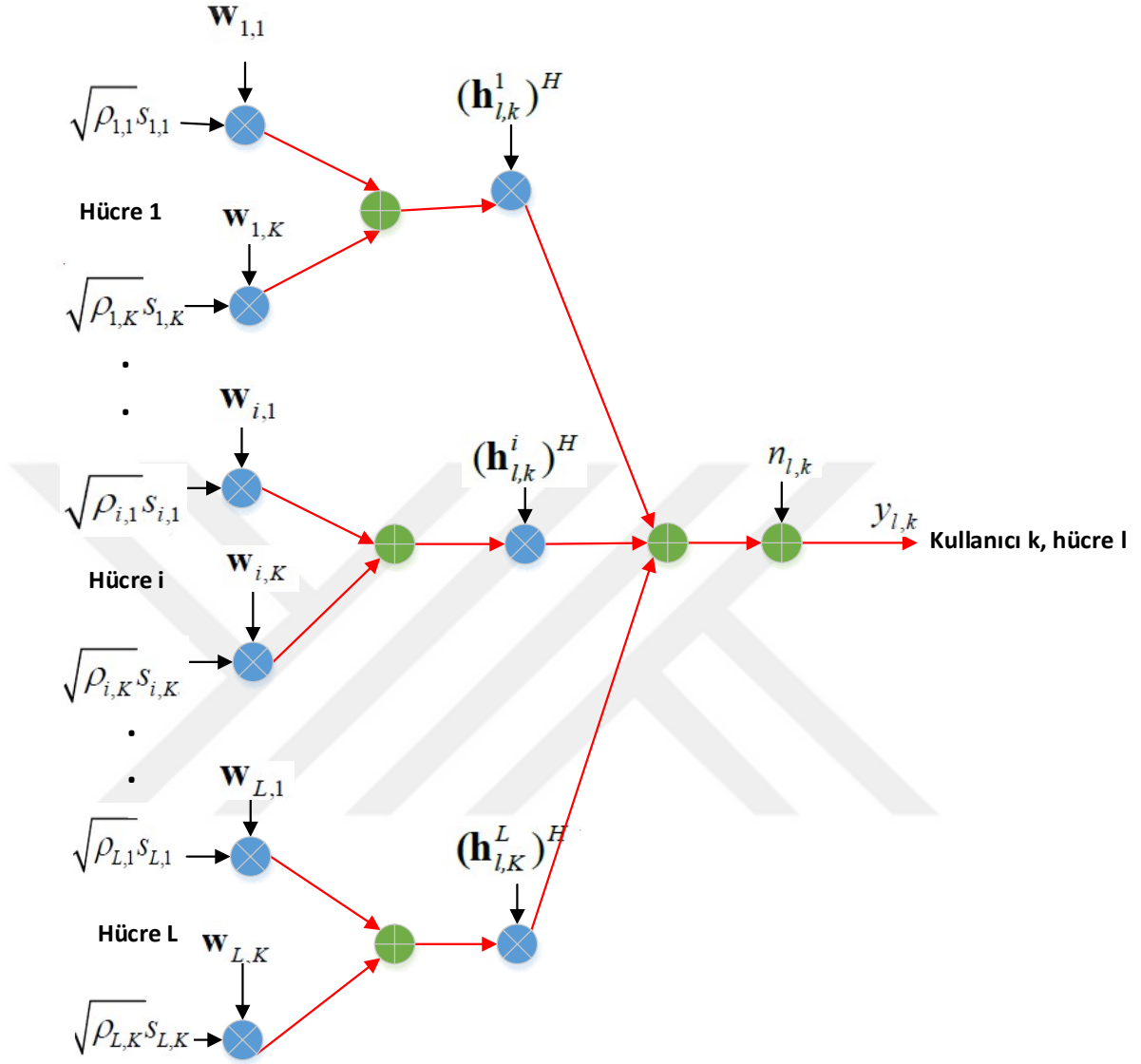
$$\mathbf{x}_l = \sum_{t=1}^K \sqrt{\mathbf{P}_{l,t}} \mathbf{w}_{l,t} s_{l,t} \quad (4.25)$$

Bu denklemde, hücre l'deki t kullanıcısı için tasarlanan yük sembolü $s_{l,t}$ 'nin birim gönderme gücü $\mathbb{E}\{|s_{l,t}|^2\} = 1$ olduğu ve $\mathbf{P}_{l,t}$ 'nin bu kullanıcıya ait iletim gücünü temsil etmektedir. $t = 1 \dots K$ için $\mathbf{w}_{l,t}$ her bir kullanıcıya gönderilen sinyalin mekansal yönlendirmesini belirleyen doğrusal ön kodlama vektörleridir.

l hücresinin k kullanıcısındaki alınan sinyal Denklem (4.26) olarak türetilir.

$$y_{l,k} = \sum_{i=1}^L (\mathbf{h}_{l,k}^i)^H \mathbf{x}_i + n_{l,k} \quad (4.26)$$

Aşağı bağlantı iletiminin bir blok diyagramı Şekil 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3. Çok Hücreli MIMO Sisteminde Doğrusal Ön Kodlama İle Aşağı Bağlantı İletiminin Blok Diyagramı.

Daha önce açıklandığı üzere, Büyük Ölçek MIMO protokolünde aşağı bağlantı pilotu olmadığından, kullanıcıların yalnızca kanal istatistiklerini bildikleri varsayılmaktadır. Anlık CSI eksikliği, küçük MIMO sistemlerinin performansını büyük ölçüde düşürebilir, ancak Büyük Ölçek MIMO, bununla birlikte iyi çalışmaktadır; çünkü önceden kodlanmış kanallar, daha fazla anten eklendiğinden kendi ortalamalarına hızla yaklaşmaktadır. Dolayısıyla, yalnızca istatistiksel CSI kullanılarak uyumlu aşağı bağlantı alımı mümkündür. Bu, tüm durumların BS'de var olduğu düşük karmaşıklıkta bir iletişim çözümüne yol açar. Ergodik kapasite bu durumda karakterize edilmesi zor

olduğundan, aşağıdaki teorem, hücre l'deki kullanıcı k ile hizmet veren BS arasındaki kapasite üzerinde bir alt sınır türetmektedir.

4.3.2.1. Literatür çıkarımı 4

Aşağı bağlantıda, hücre l'deki rastgele bir k kullanıcısı için ergodik hızın alt sınırı, Denklem (4.27) ile verilmektedir [49].

$$R_{l,k}^{DL} = \gamma^{DL} \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}\right) \log_2(1 + SNR_{l,k}^{DL}) \quad (4.27)$$

buradaki SNR ifadesi Denklem (4.28) ile ifade edilmiştir.

$$SNR_{l,k}^{DL} = \frac{p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{l,k} \right\} \right|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K p_{i,t} \mathbb{E} \left\{ \left| (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{i,t} \right|^2 \right\} - p_{l,k} \left| \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{h}_{l,k}^l)^H \mathbf{w}_{l,k} \right\} \right|^2 + \sigma_{UL}^2} \quad (4.28)$$

Aşağıdaki ifadeler [85] ve [86]'deki çalışmalardan türetilmiştir.

4.3.2.2. Literatür çıkarımı 5

Aşağı bağlantı ön kodlama vektörleri, tüm l ve k için yukarı bağlantı tespit vektörleri $\mathbf{v}_{l,k}$ temel alınarak Denklem (4.29)'daki gibi belirtilir.

$$\mathbf{w}_{l,t} = \frac{\mathbf{v}_{l,k}}{\sqrt{\mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{v}_{l,k}\|^2 \right\}}} \quad (4.29)$$

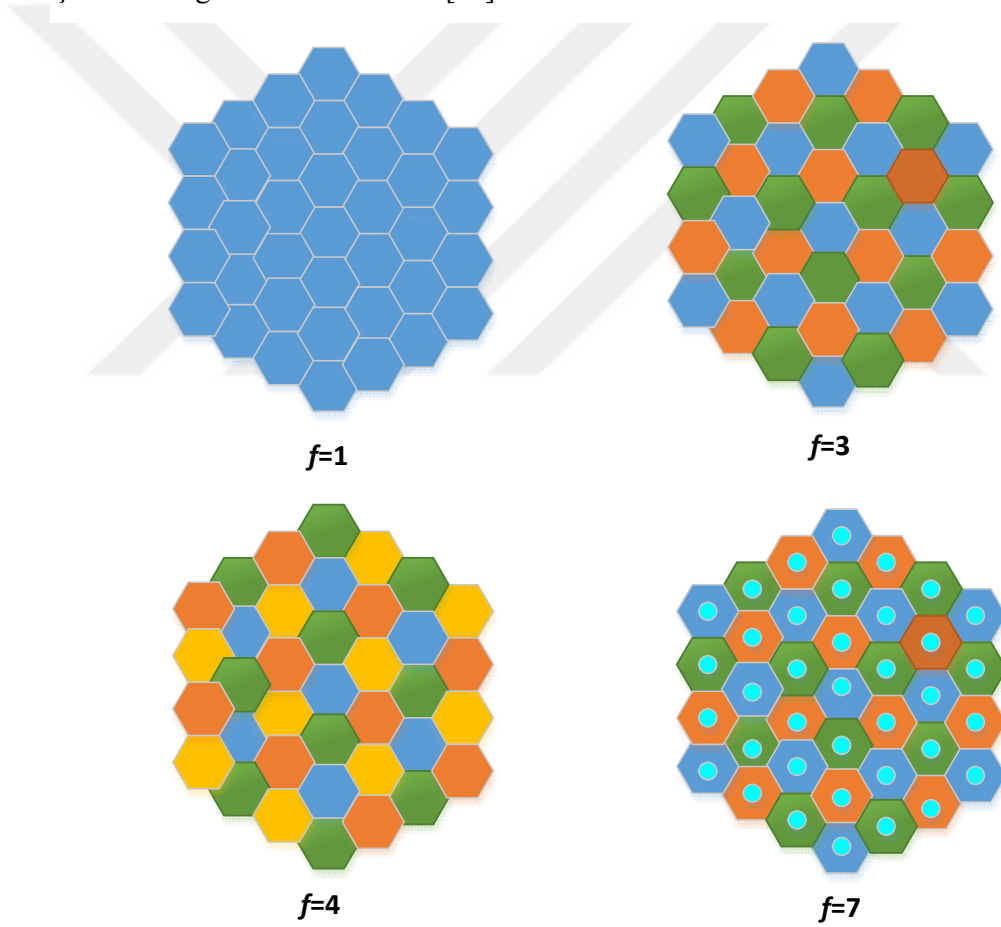
Herhangi bir yukarı bağlantı gücü $P_{i,t}$ ($i = 1 \dots L$ ve $t = 1 \dots K$) için bir aşağı bağlantı gücü $P_{i,t}$ ($i = 1 \dots L$ ve $t = 1 \dots K$) mevcuttur. Bu durumda, $SNR_{l,k}^{UL} = SNR_{l,k}^{DL}$ olup tüm l ve k için ifade $\frac{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K P_{i,t}}{\sigma_{UL}^2} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^K P_{i,t}}{\sigma_{DL}^2}$ şeklinde türetilir.

Özetlemek gerekirse, yukarı bağlantı için alınan kanal tahminleri aşağı bağlantı doğrusal ön kodlama için de kullanılmaktadır. Burada M kanal girişleri her veri sinyalini istenilen kullanıcı donanımına tutarlı bir şekilde iletmektedir. Literatür çıkarımı 4 ve Literatür çıkarımı 5'te herhangi bir kanal dağılımı için Büyük Ölçek MIMO ile yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı spektral verimliliklerinde kullanılacak olan denklemler Literatür çıkarımı 2'deki ifadeler de kullanılarak elde edilmektedir. Bu ifadeler, Büyük Ölçek MIMO hücreli sistemler için aşağı bağlantı güç tahsisi ve BS kullanıcılarını optimize etmektedir. Temel olarak, sinyallerin birbirini izlediği genel

ergodik SV ifadesinin belirtilmesi gösterilmektedir.

4.4. ELDE EDİLEN SPEKTRUM VERİMLİLİĞİ KAZANÇLARI

Bu kısımda, Büyük Ölçek MIMO sistemleri kullanılarak geliştirilmiş olan tekniklere göre 5G şebekelerindeki spektrum verimlilik (SV) kazançları gösterilmiştir. Burada, altıgen hücrelerle klasik bir hücresel ağ topolojisi düşünülerek işlemler yapılmıştır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi BS, hücrenin ortasına yerleştirilirken, K kullanıcıları hücre bölgesi üzerine dağıtılır. Bu tipteki birçok hücre birbirinin yanına yerleştirildiğinde Şekil 4.4'te gösterilen halini alır [85].



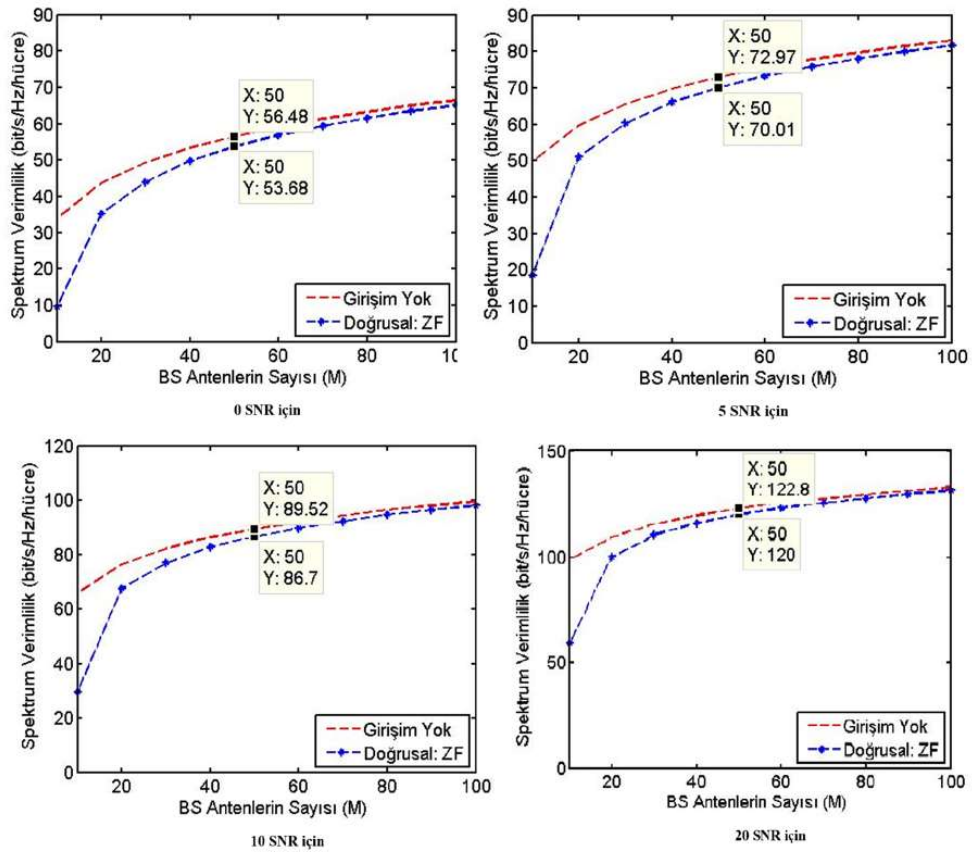
Şekil 4.4. Altıgen Hücreli Hücresel Modellerin Gösterimi [85].

Geleneksel hücresel şebekelerden farklı olarak Büyük Ölçek MIMO'da BS'de mekansal alıcı-verici işlemi, temel olarak mevcut kullanıcı kümesinin pozisyonlarına dinamik olarak uyarlanmış K sanal sektörler oluşturur. Şekil 4.4, farklı renklere sahip hücrelerin pilot dizilerinin farklı alt gruplarını kullandıklarını göstermektedir. Aynı renkteki

hücreler tamamen aynı pilotların alt kümesini kullanmaktadırlar ve bu nedenle farklı renklerdeki hücreler arasında pilot kirliliği yoktur. Pilot yeniden kullanım faktörünü artırarak, her bir grupta daha fazla renk oluşturulur ve böylece her grupta daha az girişim olmaktadır.

4.4.1. Sabit Kullanıcı, Değişen BS Anten Sayılı Büyük Ölçek MIMO Sisteminde Spektrum Verimliliği

Şekil 4.5'te yapılmış olan benzetimde her bir kullanıcı terminalinin ayrı olarak ele alındığı sistemlerdeki kazançlar görülmektedir.



Şekil 4.5. Sabit Kullanıcı, Değişen BS Anten Sayılı Büyük Ölçek MIMO Sisteminde Spektrum Verimliliği.

Bu gösterimde, M antenli bir BS'de $K = 10$ kullanıcı terminalinin aynı anda hizmet verdiği düşünülmüştür. Ayrıca basitlik amacıyla, her kullanıcının ortalama 0, 5, 10 ve 20 dB'lik bir SNR'ye sahip olduğu ve her yerde mükemmel CSI mevcut olduğu ve kanalların ilintisiz Rayleigh sönümlenmesi ile modellendiği varsayılmıştır. Burada gerçekleştirilen işlemlerdeki yukarı bağlantı-aşağı bağlantı dualitesi için güç tahsisi

hesabında [46]'daki denklemler temel alınmıştır. Farklı SNR değerleri için grafiklerin bulunduğu Şekil 4.5, toplam kapasiteyi elde eden doğrusal olmayan işleme ve sıfır zorlama (ZF) adı verilen ve tüm parazitleri bastırmaya çalışan basitleştirilmiş bir doğrusal işleme şeması ile elde edilen, M 'nin bir fonksiyonu olarak ortalama toplam SV'yi göstermektedir. Sonuçlar, hem yukarı hem de aşağı doğru iletimler için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca benzetimin gerçekleştirilmesinde Monte Carlo benzetiminden yararlanılmıştır.

Bu benzetimde, $M > K$ olduğu zaman kapasitenin arttığı ve doğrusal ZF işleme performansı teorik olarak düşünülen (herhangi bir girişimin olmadığı) kapasiteye yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca burada, sabit kullanıcı ve artan bir BS'li Büyük Ölçek MIMO sisteminde ZF işleme ile spektrum verimlilik hesabı gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda $M \gg K$ olduğu durumlarda teorik olarak hesaplanan spektrum verimliliğe yakın bir kazanç sağlanabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, baz istasyonundaki anten sayısının artmasıyla bit/kullanılan kanal başına spektrum verimliliğinin arttığının gözlemlendiği [64]'deki çalışma, yapılan bu nümerik analiz sonuçlarıyla benzer özellikler göstermektedir.

4.4.2. TDD ve FDD Modunda Farklı İşleme Şemaları ve Farklı CSI ile Spektrum Verimliliği

BS, farklı kullanıcıların sinyallerini ayırmak için Büyük Ölçek MIMO sistemlerinde CSI'ye ihtiyaç duymaktadır. Kanal tahmini, kanalların zamanla ve frekansla değişmesinden dolayı sınırlı kaynaklar kullanılarak tahmin edilmelidir çünkü mükemmel CSI pratikte elde edilemez. Bir frekans seçici kanalın kanal tahmini, frekans kaynaklarını ayrı olarak tahmin edilebilen çok sayıda bağımsız frekans-düz alt-kanallara bölmek suretiyle işlenebilir. Bilinen bir pilot dizisi her bir alt kanal üzerinde iletilir ve alınan sinyal kanal cevabını tahmin etmek için kullanılır. Tüm uzaysal kanal boyutlarını belirlemek için, bu dizi en azından verici antenlerin sayısı ile aynı uzunluğa sahip olmalıdır [87]. Alıcının matris kanalını öğrenmesi için, vericinin kanal üzerinden bilinen pilotları göndermesi zorunludur [2]. Bu pilotlar yani eğitim sinyalleri güç kısıtlamalarına tabi tutulduğunda karşılıklı olarak ortogonaldır [88]. Genel olarak, pilot dizilerin örnek süresi, en azından gönderilen antenlerin sayısına eşit olmalıdır [2]. Bu, BS tarafından gönderilen bir pilot dizisinin en az M uzunluğuna sahip olması gerektiği,

tek anten kullanıcı terminalleri tarafından gönderilen pilot dizisinin ise en az K uzunluğuna sahip olması gerektiği anlamına gelmektedir.

Verilen bir frekans bandında aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı iletimini gerçekleştirmenin iki yolu vardır. Frekans Bölmeli Çiftleme (FDD) modunda bant genişliği iki ayrı bölüme ayrılır. Birincisi yukarı bağlantı için, diğeri de aşağı bağlantı içindir. Pilot dizileri hem frekans seçici sönmüleme nedeniyle, hem aşağı hem de yukarı bağlantıda gerekli olup, toplam pilot uzunluğunun en az $M + K$ olacağı anlaşılmaktadır [2].

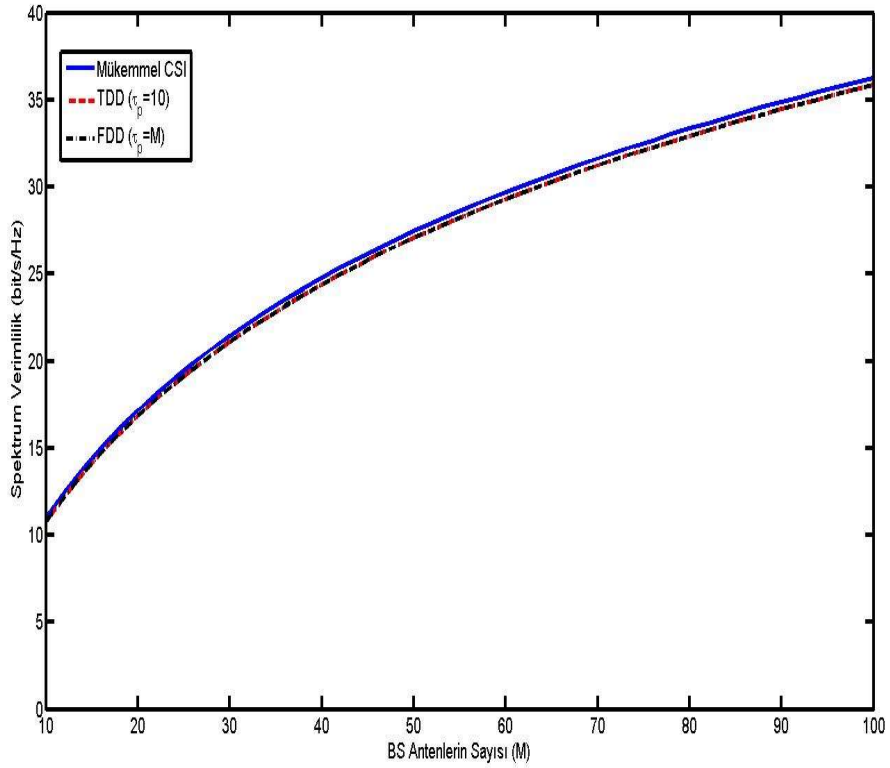
Tüm bant genişliğinin hem aşağı bağlantı hem de yukarı bağlantı iletimi için kullanıldığı, ancak zamanla ayrılmış alternatif bir Zaman Bölmeli Çiftleme (TDD) modu da mevcuttur. Sistem, aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı arasında, kanallar değıştikçe daha hızlı geçiyorsa, kanalları yalnızca bir yönde öğrenmek yeterlidir. Pilotları yalnızca en etkin yönde gönderdiğimiz durumda, mümkün olduğunca en az eğitim sinyalleri olan pilot dizisi kullanmak için [44] $M \gg K$ çalışma şartlarında, TDD sisteminin sadece yukarı bağlantıda pilotlar göndermesi gerekmektedir ve böylece pilot uzunluğu en az K kullanıcı sayısı kadar olmaktadır. Uygulamada Büyük Ölçek MIMO'nun faydalarını elde etmek için, her BS geribildirim veya kanal karşılıklılık şemaları yoluyla kanal durum bilgisinin (CSI) doğru bir şekilde tahmin edilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, literatürde frekans bölmeli çiftleme (FDD) veya zaman bölmeli çiftleme (TDD) düşünülmüştür. TDD, bir yönde yapılabilen ve her iki yönde de kullanılabilen, tahmin gerektiren ve kablosuz sistemlerin CSI'sini daha iyi elde edebilen bir mod olarak kabul edilmektedir; FDD ise aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı için tahmin ve geri bildirim gerektirmektedir [3], [31] ve [54]. Özetlemek gerekirse, FDD'den daha kısa pilotlar gerektirmesinin yanında aynı zamanda ölçeklenebilir bir mod olduğu için TDD tercih edilen moddur [89].

Mükemmel CSI ve τ_p uzunluğundaki pilot diziler ile tahmin edilen mükemmel olmayan CSI durumları şu şekilde açıklanmaktadır:

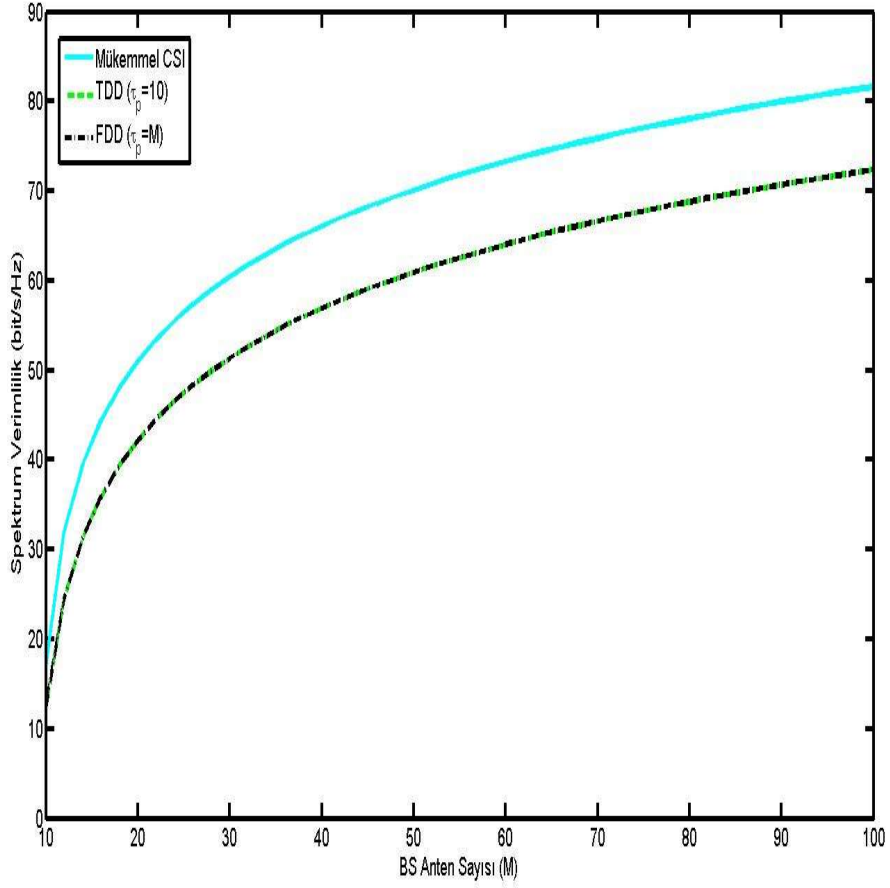
Mükemmel CSI durumunda; verici, anlık kanal bilgilerini ve muhtemelen alıcıdaki parazit istatistiklerini tam olarak bilmektedir. Böylece, tam bilgi mevcut olduğundan, alıcıyı algılama yöntemine veya performans metriğine bağlı olarak tasarımı gerçekleştirmek için birçok olası strateji ve optimizasyon ölçütü kullanılabilir [90].

Mükemmel olmayan CSI durumunda ise; verici, kanalı açıklayan parametreler hakkında eksik bilgiye sahiptir. Örneğin, verici, hatalı bir kanal matrisi $\tilde{H} \neq H$ 'den haberdar edilebilir. Bu CSI durumunda, iki ana nokta düşünülebilir: Birincisi, verici CSI ile uyumlu olanlar arasında kanalın en kötü olası durumu için maksimum performans seviyesine ulaşmak üzere tasarlanabilir. İkincisi, verici CSI'nın bilinmeyen parametreleri (istatistiksel veya Bayesian yaklaşımı) üzerinde ortalama en iyi performansa sahip olacak şekilde tasarlanabilir [90].

Şekil 4.6'da ve Şekil 4.7'de, 5 dB'lik bir SNR ve Rayleigh sönmleme kanalları için $K = 10$ kullanıcıli aşağı bağlantı iletimindeki spektrum verimliliği gösterilmiştir.



Şekil 4.6. MR Şeması Kullanılarak TDD ve FDD Modunda Farklı CSI İle Spektrum Verimliliği.



Şekil 4.7. ZF Şeması Kullanılarak TDD ve FDD Modunda Farklı CSI İle Spektrum Verimliliği.

Bu nümerik analiz sonucunda Şekil 4.6'da Maksimum Oran (MR) ve Şekil 4.7'de Sıfır Zorlama (ZF) doğrusal ön kodlama şemaları kullanılmıştır. Yapılmış olan nümerik analiz çalışmasında, mükemmel CSI'ya sahipken elde edilen SV performansı ile CSI'nın τ_p uzunluğundaki pilot dizileri ile tahmin edildiğinde elde edilen SV performansı karşılaştırılmaktadır. Burada mükemmel CSI bilinen kanal matrisleri kullanılarak oluşturulmuş olup mükemmel olmayan CSI durumu ise tahmini kanal matrislerin kullanılmasıyla birlikte işleme tabi tutulmuştur. SV, BS antenlerinin sayısının M fonksiyonu olarak ifade edilmekte olup $\tau_p = M$ kullanılarak FDD modunda; $\tau_p = K = 10$ kullanılarak TDD modunda karşılaştırılmaktadır. TDD modunda, pilotların BS anten sayılarından farklı olarak sadece K kullanıcı sayısı kadar uzunluğa ihtiyaç duyduğu [91]'deki çalışmada belirtilmektedir. Başka bir çalışma olan [51]'de ise FDD modunda optimum pilot dizilerinin sayısının BS anten sayısına eşit olmasının kanal matrislerinin

anamlı tahminlerini oluşturabilecek olan en küçük aralık olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, BS anten boyutu ile orantılı olan pilot dizilerinin miktarının fazlalığı FDD modunda Büyük Ölçek MIMO'nun uygulanmasını zorlaştırdığı bilinmektedir [92].

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 incelendiği zaman, TDD modunda, mükemmel CSI'ye kıyasla görünür bir performans kaybı vardır. MR ön kodlaması ile olan kayıp çok küçüktür. Dolayısıyla bu şema tahmin hataları için sağlam bir tekniktir. Performans kaybı, ZF ön kodlaması için daha büyüktür, çünkü tahmin hataları parazitleri bastırmayı zorlaştırmaktadır [85], [93]. Ancak benzetimlerden de görüleceği üzere ZF'nin tüm M durumları için MR'den daha yüksek bir performans sağladığı anlaşılmaktadır ki bu ifadenin doğruluğu [94]'den de görülecektir. Ayrıca [81]'deki çalışmadan çıkarılabilecek yorumların benzetimi yapılan sistemin doğruluğunu ortaya koyacaktır. Genel olarak, TDD sistemleri her zaman daha fazla anten eklenmesinden kazançlı çıkmaktadır. Buna karşılık FDD sistemleri, pilot dizilerinin $\tau_p = M$ 'de olduğu gibi daha uzun seçilmesi durumlarında daha fazla anten eklenmesinden fayda sağlamaktadır.

Özetlemek gerekirse, yapılmış olan bu benzetim, literatürde FDD ve TDD için bahsedilen durumları sağlamakta olup TDD modunda daha az uzunlukta pilot dizisi ile FDD modunda anten sayısı uzunluğundaki pilot dizisi işlemlerinin benzer sonuçlar gösterdiğini göstermektedir. Fakat FDD modunda ise anten sayısı kadar pilot dizisi uzunluğuna ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmesinden dolayı anten sayısını arttırmanın faydası görülmemektedir.

Kısaca, TDD işlemi, BS antenlerinin sayısına göre tamamen ölçeklendirilebilirken, FDD işlemi sadece pilot yükünü arttırarak daha fazla anten işleyebilir. Birçok antenle FDD sistemlerini gerçekleştirmek pratik olarak mümkün gözükmemektedir fakat yukarıdaki bahsedilen durumlardan dolayı TDD bu konuda daha iyi bir seçim olarak düşünülebilir. Ayrıca kanal tahmini TDD modunda iken daha basit bir hal almaktadır. Çünkü pilot dizileri, M antenli BS sayısından bağımsız olarak K uzunluğuna ihtiyaç duymaktadır

4.4.3. Pilot Yeniden Kullanım Faktörleri Kullanılarak Sabit BS Anten Sayılı, Değişen Kullanıcı Sayılı Büyük Ölçek MIMO Sisteminde Spektrum Verimliliği

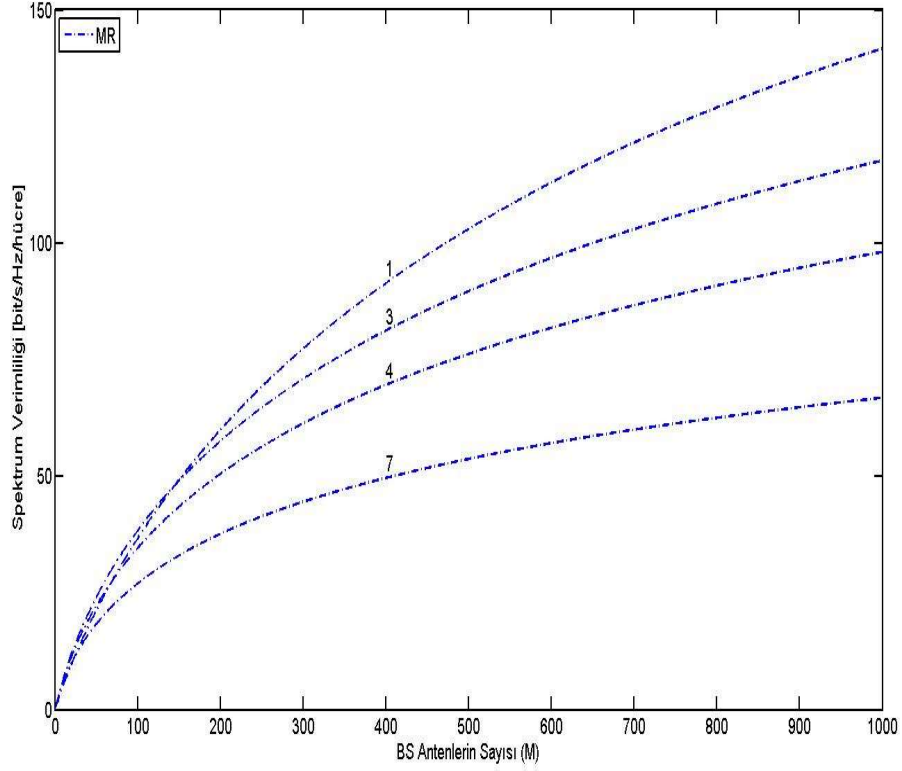
Pilot yeniden kullanım faktörü $f = \tau_p/K$ 'nin Bölüm 4.3'te bir tam sayı olduğu belirtilmiştir. Burada K hücre başına kullanıcı sayısını ifade etmektedir. Pilot yeniden kullanım faktörü, L adet hücrenin birbirine bitişik hücre gruplarına bölünmesine neden

olmaktadır. $f = 1$ durumu evrensel pilot yeniden kullanımı olarak bilinir ve $f > 1$, evrensel olmayan pilot yeniden kullanımı olarak adlandırılır [95]. Hekzagonal hücre topolojisinde simetrik pilot yeniden kullanım desenlerine neden olan en küçük pilot yeniden kullanım faktörleri $f = 1$, $f = 3$ ve $f = 4$ 'tür [96]. Bu tür yeniden kullanma modellerine ait örnekler Şekil 4.4'te verilmektedir. Burada farklı renklere sahip hücreler pilot dizilerin farklı alt gruplarına karşılık gelmektedir. Aynı renkteki hücreler, pilotların tamamen aynı alt kümesini kullanmaktadırlar. Pilot yeniden kullanım faktörünü arttırarak, her grupta daha fazla renk meydana getirilebilir ama böylece birbirlerine yönelik pilot kirliliği neden olurlar. $f = 4$ yeniden kullanım faktörü ile, hücreleri dört farklı bölünmüş gruba (Şekil 4.4'teki sol alt örnekte olduğu gibi) ayırabilir veya her hücreyi hücre kenarı ve hücre merkezi olarak iki alt hücreye bölebilir (Şekil 4.4'te sağ alttaki örnekte olduğu gibi). Şekil 4.4'teki son gösterimdeki durum fraksiyonel pilot yeniden kullanım faktörünü içerir ve hücre kenarlarında daha az sıklıkla pilot yeniden kullanım faktörü kullanılabilir [81]. Çünkü, baz istasyonundaki anten sayısı arttıkça, sistem pilot kirliliği olarak bilinen, komşu hücrelerdeki pilotların yeniden kullanılması neredeyse tamamen kısıtlanmaktadır [31]. Ayrıca pilot dalga formlarının optimize edilebilmesi olasılıklarından birinin daha az pilot yeniden kullanım faktörü kullanmak olduğu belirtilmiştir [54]. Kablosuz iletişimdeki sistemin verimliliğini arttırmak için uygun pilot yeniden kullanım faktörlerinin hesaplanmasıyla alakalı çalışma [80]'de belirtilmektedir. Evrensel pilot kullanımı yani $f = 1$ durumu kanal tahmini sırasında hücreler arası parazit oluşturmaktadır ve bu durum farklı pilot yeniden kullanım faktörleri kullanılarak giderilebilmektedir [94]. Büyük Ölçek MIMO kapsamında farklı pilot yeniden kullanım şemaları üzerinde durulmaktadır. Nitekim [97]'deki çalışmada, $M = 100$ antenli bir sistem için, sistem verimi pilot yeniden kullanım 2 ile elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın neticesinde, pilot yeniden kullanım faktörünün birden büyük olması ve pilot yeniden kullanım faktörünün 1 olmasıyla birlikte kullanıcıların kendi merkez hücrelerine yakın konumda olması durumunda pilot kirliliğinin, yüzlerce baz istasyonu antenine sahip Büyük Ölçek MIMO hücresel sistemini sınırlandırmadığı gösterilmiştir.

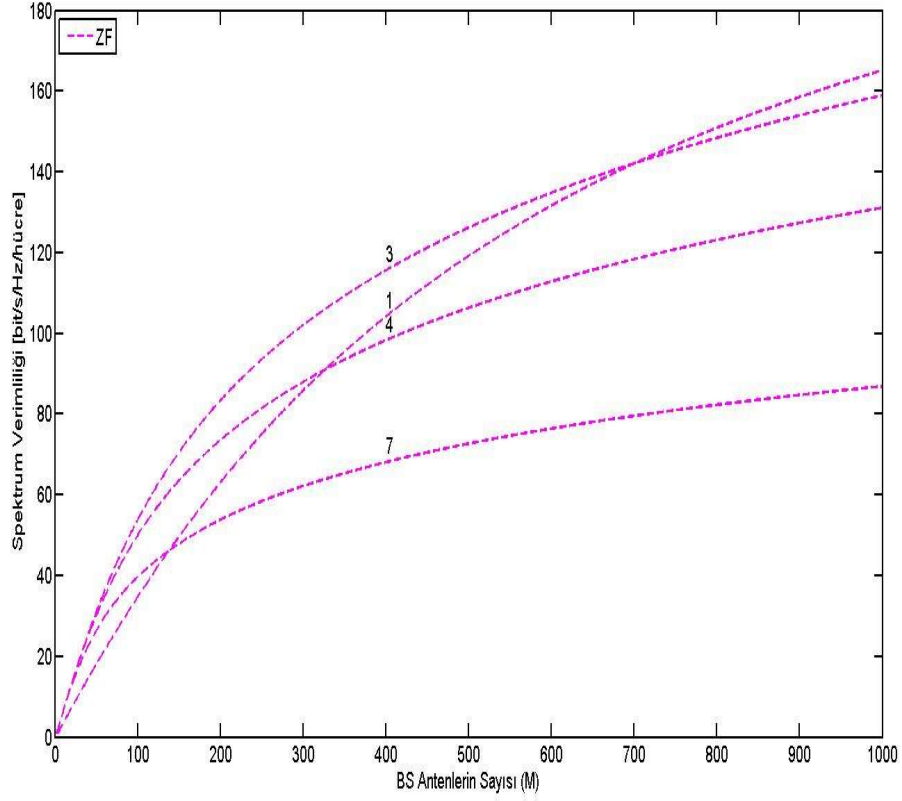
Nümerik analizi gerçekleştirilmiş olan sistemde, $M = 1000$ BS antenleri ve $\tau_c = 400$ sembol arasında bir tutarlılık aralığında, kullanıcıların homojen bir şekilde dağıtıldığı varsayımı altında ve kanalların Rayleigh sönümlenmeli olarak düşünülen bir Büyük Ölçek MIMO sisteminde pilot yeniden kullanım faktörleri $f \in \{1, 3, 4, 7\}$ olarak

kabul edilmiştir.

Şekil 4.8, değişen kullanıcı sayısında verilmiş olan pilot yeniden kullanım faktörlerini kullanarak MR algılaması için; Şekil 4.9 ise değişen kullanıcı sayısında verilmiş olan pilot yeniden kullanım faktörlerini kullanarak ZF algılaması için ortalama SV'yi göstermektedir.



Şekil 4.8. MR Algılaması İçin Farklı Pilot Yeniden Kullanım Faktörlerindeki Spektrum Verimliliği.



Şekil 4.9. ZF Algılaması İçin Farklı Pilot Yeniden Kullanım Faktörlerindeki Spektrum Verimliliği.

Nümerik analiz sonuçları 5 dB SNR seviyesinin olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı kullanıcı durumlarında (yani K kullanıcılarda) farklı pilot yeniden kullanım faktörlerinin düşünülmesi gerektiği de saptanmış olmaktadır. Düşük yükte yani kullanıcı sayısının çok fazla olmadığı durumda $f = 3$ pilot tekrar kullanımının daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. f uygun bir şekilde seçildiğinde Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki üst eğri üzerinde her zaman çalışabilir ve böylece Büyük Ölçek MIMO, farklı sayıda kullanıcı arasında yüksek bir SV sağlayabilir. Sistemin benzetiminde fark edilen diğer bir durum da $K > 10$ durumunda, sistemin nispeten verimli bir SV sağladığı görülmektedir.

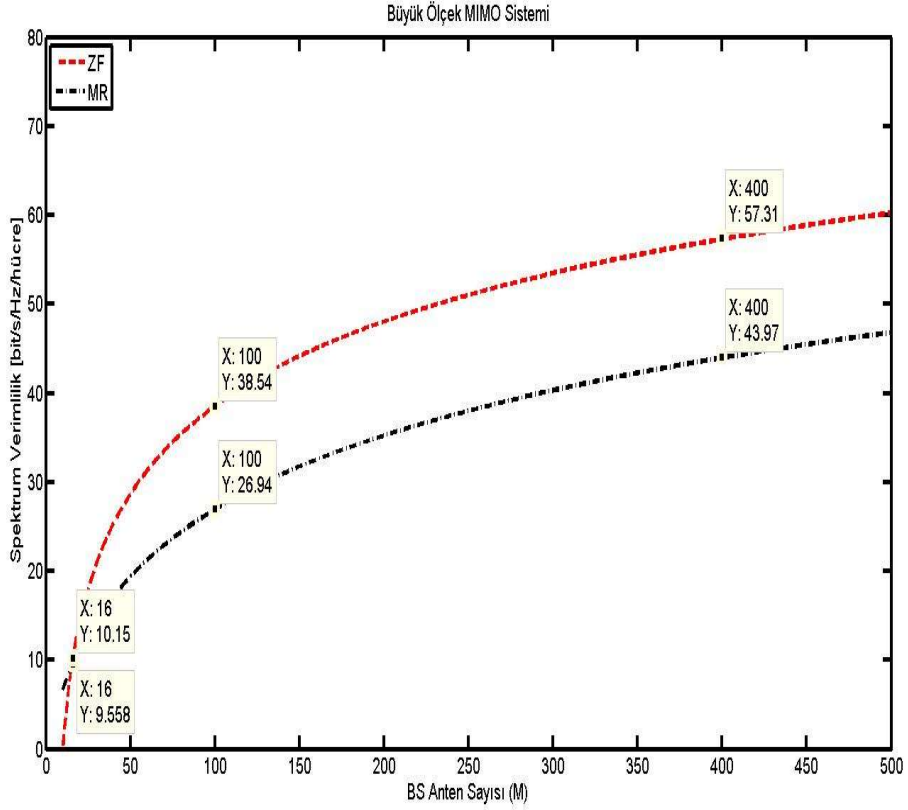
Nümerik analiz sonucundan elde edilecek olan bir başka gözlem, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki ZF ve MR arasındaki SV oranlarının farklılığıdır. Bu sonuçlar ZF'nin MR'ye göre daha iyi kazanç elde edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca bu benzetim, [94]'teki yapılan çalışmalardaki sonuçlarla bir uyum içerisindedir. Kısaca,

pilot yeniden kullanım faktörü Büyük Ölçek MIMO sistemlerinde önemli bir parametredir ve en iyi seçim kullanıcı durumuna göre değişiklik göstermektedir.

4.4.4. 5G Teknolojisinde Büyük Ölçek MIMO ile Artan Spektrum Verimliliği

Büyük Ölçek MIMO sistemlerinin spektrum verimlilikte sağladığı katkılar daha önceki analizlerde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu kısımda ise, Büyük Ölçek MIMO teknolojisi ile 5G şebekelerinin yukarı bağlantı ve aşağı bağlantılarında elde edilebilecek SV başarımları gösterilmiştir. Burada yapılmış olan işlemler, pilot yeniden kullanım faktörü $f = 3$ olan ZF algılama ve her kullanıcıya 5 dB bir SNR veren bir güç tahsisi durumlarında gerçekleştirilmiştir. Burada yeniden kullanım faktörünün 3 olarak belirlenmesinde yukarıdaki benzetim sonuçlarından ortalama bir kullanıcı yoğunluğunda $f = 3$ 'ün yeteri kadar iyileştirme sağlamış olmasının yanında, komşu hücrelerde ortogonal pilotlar sağlayan en küçük yeniden kullanım faktörü olarak 3'ü belirlemiş olan altıgen ağ düzenini el alan [94]'teki çalışma da göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışmada, pilot yeniden kullanım faktörü 3'ün kullanılmasıyla evrensel pilot yeniden kullanım faktörü olan $f = 1$ 'e göre tahmin hatasının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan işlemlerin performans temeli, 4G şebekeleri için [98]'de belirtilen IMT-Advanced şartlarıdır. Karşılaştırılma yapıldığında, Şekil 4.10'da ele alınan Büyük Ölçek MIMO sistemi, $M = 100$ anten sayısında $39 \text{ bit/s/Hz/hücre}$ elde eder ve IMT-Advanced'e kıyasla 15 ile 25 arasında iyileşme sağladığı gözlenmektedir. $M = 400$ antenli Büyük Ölçek MIMO sistemi ise $57 \text{ bit/s/Hz/hücre}$ 'ye ulaşmaktadır. Bu iyileştirme ise IMT-Advanced'den 35 ile 50 kat arasında daha fazla kazanç sağlamaktadır.

Şekil 4.10, BS anten sayısı M 'nin bir fonksiyonu olarak SV'yi göstermektedir. Ayrıca burada hücre başına maksimum kullanıcı sayısı 10 olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.10. ZF ve MR Algılamalı, Pilot Yeniden Kullanım Faktörü $f = 3$ ve 5 dB SNR'a Sahip BS Anten Sayısına Bağlı Olarak Spektrum Verimliliği.

BS anten sayısının artmasıyla birlikte spektrum verimliliğinde hem ZF için hem de MR için bir artış gözlemlenmektedir. Fakat Şekil 4.10'dan da görüleceği üzere ZF MR'ye göre daha iyi bir şema olarak karşımıza çıkmaktadır. Nitekim [81] ve [94]'teki çalışmalar da bunu doğrulamaktadır. Bu tür spektral verimlilikler, pratikte uygun kanal kodlamalı QAM gibi geleneksel modülasyon şemaları kullanılarak elde edilebilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mobil veri hizmetleri için trafik taleplerinde görülen büyük artış, Büyük Ölçek MIMO'nun beşinci nesil (5G) temel teknolojilerde kullanılacak olmasını sağlamaktadır. Büyük Ölçek MIMO, alınan sinyal gücünü büyük ölçüde artırabilen, veri hızlarını iyileştirebilen ve çok sayıda anten yuvasına sahip bir sisteme dayanmaktadır. Büyüklük sırası, örneğin 100 veya daha fazla olan antenlerin sayısı, MR/ZF gibi basit doğrusal hüzmeye biçimlendirme/ön kodlama tekniklerini gerçekleştirerek sistem kapasitesini, spektral ve enerji verimliliğini artırabilir. Büyük Ölçek MIMO, radyo spektrumunun daha verimli kullanılmasıyla, iletilen gücü, donanımın karmaşıklığını ve sinyal işleminin enerji tüketimini azaltabilir. Bununla birlikte, Büyük Ölçek MIMO'nun potansiyel faydalarını elde etmek için Uzaysal korelasyon ve anten karşılıklı birleştirilmesi gibi donanımsal bozulmalar gibi zorluklar, daha ileri araştırma çalışmalarında ele alınmalıdır.

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, 5G ve Büyük Ölçek MIMO hakkında çalışmalar incelenmiştir. 5G haberleşmesi için veri hızı, gecikme, enerji ve maliyet ve spektrum verimliliğinin önemi hakkında çalışmaların ön planda olduğu anlaşılmıştır. Bu konular üzerinde 5G'nin iyileştirme yapması zorunluluklarının nedenleri belirtilmiştir. Bu iyileştirmelerde Büyük Ölçek MIMO'nun katkısı, çalışmada görülecek olan diğer bir konu başlığıdır. 5G açısından hayati öneme sahip konular arasında olan veri hızı, daha düşük gecikme, enerji ve maliyet ve spektrum verimliliğinin Büyük Ölçek MIMO ile gerçekleştirilebildiği anlaşıldığından Büyük Ölçek MIMO'nun bu alanların iyileştirilmesine katkısının potansiyeli hakkında çalışmalardan da bahsedilmiştir. Bu potansiyelin gerçek zamanlı bir uygulamada gerçekleştirilmesi açık noktalar arasındadır. Dolayısıyla, bu konular hakkında Büyük Ölçek MIMO ile yapılmış çalışmalar olmasına rağmen bu çalışmaların genişletilmesi gerekmektedir.

Bunun yanı sıra, Büyük Ölçek MIMO ile ilişkili olabilecek 5G üzerinde çalışılabilecek konular kısaca aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- 5G için dalga şekli
- Milimetrik dalgalar
- Heterojen ağlar

- Hüzme oluşturma (Beamforming)
- Pilot kirliliği (Pilot contamination)
- Gerçek zamanlı 5G uygulamaları için performans iyileştirme
- Cihazdan Cihaza Haberleşme (Device2Device/D2D)

Sonuç olarak, Büyük Ölçek MIMO, teorik olarak IMT-Advanced'den on kat veya hatta üstünde iyileştirmeler sağlayabilir. Bu muazzam iyileştirmelere ağırlıklı olarak birçok kullanıcıya aynı anda hizmet vererek ulaşılırken kullanıcı başına SV küçük bir aralıkta gözlemlenmektedir. Fakat daha büyük kazançlar daha fazla BS anten şartlarında elde edilmektedir. Bunlar gerçekten Büyük Ölçek MIMO teknolojisinin sadece SV iyileştirmesine yönelik olmadığını, aynı zamanda 5G teknolojilerinde daha büyük alan emisyonu elde etmeye yönelik önemli bir teknoloji olabileceğini gösteren sonuçlardır.

6. KAYNAKLAR

- [1] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [2] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 20, pp. 11–22, 2015.
- [3] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An overview of massive MIMO: Benefits and challenges," *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742–758, 2014.
- [4] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, "A General MIMO Framework for NOMA Downlink and Uplink Transmission Based on Signal Alignment," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 4438–4454, 2016.
- [5] Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, "The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 537–552, 2016.
- [6] N. Panwar, S. Sharma, and A. K. Singh, "A survey on 5G: The next generation of mobile communication," *Phys. Commun.*, vol. 18, pp. 64–84, 2016.
- [7] H.-H. Chen, M. Guizani, and W. Mohr, "Evolution toward 4G wireless networking [Guest Editorial]," *IEEE Netw.*, vol. 21, no. 1, pp. 4–5, 2007.
- [8] P. Gupta, "Evolvement of Mobile Generations : 1G to 5G," *Int. J. Technol. Res. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 152–157, 2013.
- [9] X. Li, A. Gani, R. Salleh, and O. Zakaria, "The Future of Mobile Wireless Communication Networks," *2009 Int. Conf. Commun. Softw. Networks*, no. February 2016, pp. 554–557, 2009.
- [10] C. X. Wang, F. Haider, X. Gao, X. H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, 2014.
- [11] GSMA, G. Intelligence, GSMA, and G. Intelligence, "Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile," *GSMA Intell. Underst. 5G*, no. December, pp. 3–15, 2014.
- [12] H. Tullberg, P. Popovski, D. Gozalvez-serrano, P. Fertl, A. Höglund, M. a Uusitalo, H. Droste, Ö. Bulakci, and K. Pawlak, "METIS System Concept : The Shape of 5G to Come," <https://www.metis2020.com/Documents/Publications>, 2014.
- [13] G. Wunder, P. Jung, M. Kasparick, T. Wild, F. Schaich, Y. Chen, S. Ten Brink, I. Gaspar, N. Michailow, A. Festag, L. Mendes, N. Cassiau, D. Ktésas, M. Dryjanski, S. Pietrzyk, B. Eged, P. Vago, and F. Wiedmann, "5GNOW: Non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 97–105, 2014.

- [14] G. Auer and O. Blume. (2012). EARTH Project D2.3 - *Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown*. Energy Aware Radio Netw. Technol. (EARTH), INFSO-ICT-247733, ver. 2.0. [Online]. Available <http://www.ict-earth.eu>
- [15] H. Woesner and S. Azodolmolky, "Openflow extensions towards multi-layer and multi-domain networks: OFELIA," *2011 37th Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun.*, pp. 1–1, 2011.
- [16] M. A. M. Albreem, "5G wireless communication systems: Vision and challenges," in *I4CT 2015 - 2015 2nd International Conference on Computer, Communications, and Control Technology, Art Proceeding*, 2015, pp. 493–497.
- [17] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, 2014.
- [18] T. E. Bogale and L. B. Le, "Massive MIMO and mmWave for 5G Wireless HetNet: Potential Benefits and Challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 64–75, 2016.
- [19] F. Haider, C.-X. Wang, H. Haas, D. Yuan, H. Wang, X. Gao, X.-H. You, and E. Hepsaydir, "Spectral efficiency analysis of mobile Femtocell based cellular systems," *2011 IEEE 13th Int. Conf. Commun. Technol.*, pp. 347–351, 2011.
- [20] D. Choudhury, I. Labs, and I. Corporation, "5G Wireless and Millimeter Wave Technology Evolution : An Overview," pp. 0–3, 2015.
- [21] W. Paper, "Date : February 2015 Dawn of the 5G Era Internet of Things 5G Service Vision," no. February, pp. 1–16, 2015.
- [22] Y. Wang, J. Li, L. Huang, Y. Jing, A. Georgakopoulos, and P. Demestichas, "5G mobile: Spectrum broadening to higher-frequency bands to support high data rates," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 39–46, 2014.
- [23] P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess, and A. Benjebbour, "Design considerations for a 5G network architecture," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp. 65–75, 2014.
- [24] J. G. J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. A. C. K. Soong, and J. C. J. C. Zhang, "What will 5G be?," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [25] A. Abrol and R. K. Jha, "Power Optimization in 5G Networks: A Step Towards GrEEen Communication," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1355–1374, 2016.
- [26] E. Lahetkangas, K. Pajukoski, J. Vihriala, G. Berardinelli, M. Lauridsen, E. Tiirola, and P. Mogensen, "Achieving low latency and energy consumption by 5G TDD mode optimization," in *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC 2014*, 2014, pp. 1–6.
- [27] F. Schaich, T. Wild, and Y. Chen, "Waveform contenders for 5G - Suitability for short packet and low latency transmissions," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2015, vol. 2015–Janua, no. January.
- [28] P. Mogensen, K. Pajukoski, E. Tiirola, E. Lahetkangas, J. Vihriälä, S. Vesterinen,

- M. Laitila, G. Berardinelli, G. W. O. Da Costa, L. G. U. Garcia, F. M. L. Tavares, and A. F. Cattoni, "5G small cell optimized radio design," in *2013 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2013*, 2013, pp. 111–116.
- [29] C. Han, T. Harrold, S. Armour, I. Krikidis, S. Videv, P. M. Grant, H. Haas, J. S. Thompson, I. Ku, C. X. Wang, T. A. Le, M. R. Nakhai, J. Zhang, and L. Hanzo, "Green radio: Radio techniques to enable energy-efficient wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 46–54, 2011.
- [30] D. Zhang, K. Yu, Z. Zhou, and T. Sato, "Energy Efficiency Scheme with Cellular Partition Zooming for Massive MIMO Systems," *2015 IEEE Twelfth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*. pp. 266–271, 2015.
- [31] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 2013.
- [32] J. G. Andrews, "Seven ways that hetnets are a cellular paradigm shift," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 3, pp. 136–144, 2013.
- [33] S. Afrasiabi-gorgani and G. Wunder, "A Versatile PAPR Reduction Algorithm for 5G Waveforms with Guaranteed Performance," pp. 217–223, 2016.
- [34] N. E. Tunali, M. Wu, C. Dick, and C. Studer, "Linear large-scale MIMO data detection for 5G multi-carrier waveform candidates," in *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2016, vol. 2016–Febru, pp. 1149–1153.
- [35] R. Q. Hu and Y. Qian, "An energy efficient and spectrum efficient wireless heterogeneous network framework for 5G systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 94–101, 2014.
- [36] M. ElKashlan, T. Q. Duong, and H. H. Chen, "Millimeter-wave communications for 5G: Fundamentals: Part i [Guest Editorial]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 52–54, 2014.
- [37] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sternad, R. Apelfr??jd, and T. Svensson, "The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 44–51, 2014.
- [38] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, pp. 168–175, 2016.
- [39] T. L. Marzetta, "How much training is required for multiuser MIMO?," in *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2006, pp. 359–363.
- [40] S. ten B. Jakob Hoydis Merouane Debbah, "Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need?," *Ieee J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 160–171, 2013.
- [41] Z. Jiang, A. F. Molisch, G. Caire, and Z. Niu, "Achievable rates of FDD massive MIMO systems with spatial channel correlation," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 5, pp. 2868–2882, 2015.
- [42] S. Chen, S. Sun, Y. Wang, G. Xiao, and R. Tamrakar, "A comprehensive survey

- of TDD-based mobile communication systems from TD-SCDMA 3G to TD-LTE(A) 4G and 5G directions,” *China Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 40–60, 2015.
- [43] A. J. Paulraj and C. B. Papadias, “Space-time processing for wireless communications,” *Signal Process. Mag. IEEE*, vol. 14, no. 6, pp. 49–83, 1997.
- [44] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 1436–1449, 2013.
- [45] A. F. Molisch, M. Z. Win, and J. H. Winters, “Performance of reduced-complexity transmit/receive-diversity systems,” in *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, 2002, vol. 2, pp. 738–742.
- [46] E. Björnson and E. Jorswieck, “Optimal Resource Allocation in Coordinated Multi-Cell Systems,” *Found. Trends® Commun. Inf. Theory*, vol. 9, no. 2–3, pp. 113–381, 2013.
- [47] M. Matthaiou, M. R. McKay, P. J. Smith, and J. A. Nossek, “On the condition number distribution of complex wishart matrices,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 6, pp. 1705–1717, 2010.
- [48] S. Vishwanath, N. Jindal, and A. Goldsmith, “Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2658–2668, 2003.
- [49] T. Van Chien, E. Bjornson, and E. G. Larsson, “Downlink power control for massive MIMO cellular systems with optimal user association,” *2016 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2016*, 2016.
- [50] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, “Capacity limits of MIMO channels,” *Sel. Areas Commun. IEEE J.*, vol. 21, no. 5, pp. 684–702, 2003.
- [51] B. Hassibi and B. M. Hochwald, “How much training is needed in multiple-antenna wireless links?,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 4, pp. 951–963, 2003.
- [52] T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, 2010.
- [53] C. Shepard, H. Yu, N. Anand, E. Li, T. L. Marzetta, R. Yang, and L. Zhong, “Argos: practical many-antenna base stations,” *Proc. 18th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw. - Mobicom '12*, no. i, p. 53, 2012.
- [54] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, 2014.
- [55] H. Suzuki, R. Kendall, K. Anderson, A. Grancea, D. Humphrey, J. Pathikulangara, K. Bengston, J. Matthews, and C. Russell, “Highly spectrally efficient Ngara Rural Wireless Broadband Access Demonstrator,” in *2012 International Symposium on Communications and Information Technologies, ISCIT 2012*, 2012, pp. 914–919.

- [56] A. Alkhateeb, G. Leus, and R. W. Heath, "Limited Feedback Hybrid Precoding for Multi-User Millimeter Wave Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 11, pp. 6481–6494, 2015.
- [57] R. Mendez-Rial, C. Rusu, A. Alkhateeb, N. Gonzalez-Prelcic, and R. W. Heath, "Channel estimation and hybrid combining for mmWave: Phase shifters or switches?," in *2015 Information Theory and Applications Workshop, ITA 2015 - Conference Proceedings*, 2015, pp. 90–97.
- [58] A. Alkhateeb, Y. H. Nam, J. C. Zhang, and R. W. Heath, "Massive MIMO Combining with Switches," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 232–235, 2016.
- [59] A. Puglielli, N. Narevsky, P. Lu, T. Courtade, G. Wright, B. Nikolic, and E. Alon, "A scalable massive MIMO array architecture based on common modules," in *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop, ICCW 2015*, 2015, pp. 1310–1315.
- [60] D. C. Araújo, T. Maksymyuk, A. L. F. de Almeida, T. Maciel, J. C. M. Mota, and M. Jo, "Massive MIMO: Survey and Future Research Topics," *IET Commun.*, vol. 10, no. 15, pp. 1938–1946, 2016.
- [61] C. Masouros, M. Sellathurai, and T. Ratnarajah, "Large-scale MIMO transmitters in fixed physical spaces: The effect of transmit correlation and mutual coupling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 7, pp. 2794–2804, 2013.
- [62] T. Arai, A. Ohta, S. Kurosaki, K. Maruta, T. Iwakuni, and M. Iizuka, "A New Antenna Arrangement Design of Massive MIMO in LOS Environment for Further Capacity Enhancement," *2015 9th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 1–5, 2015.
- [63] Y. Gao, C. Parini, and L. Cuthbert, "Dual-polarized Turning Torso Antenna Array for Massive MIMO Systems," *EuCAP*, pp. 3–4, 2015.
- [64] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, "Massive MIMO systems with non-ideal hardware: Energy efficiency, estimation, and capacity limits," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 11, pp. 7112–7139, 2014.
- [65] S. K. Mohammed and E. G. Larsson, "Single-user beamforming in large-scale MISO systems with per-antenna constant-envelope constraints: The doughnut channel," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 11, pp. 3992–4005, 2012.
- [66] O. N. Alrabadi, E. Tsakalaki, H. Huang, and G. F. Pedersen, "Beamforming via large and dense antenna arrays above a clutter," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 314–325, 2013.
- [67] N. H. M. Adnan, I. M. Rafiqul, and A. H. M. Z. Alam, "Massive MIMO for Fifth Generation (5G): Opportunities and Challenges," *Proc. - 6th Int. Conf. Comput. Commun. Eng. Innov. Technol. to Serve Humanit. ICCCE 2016*, pp. 47–52, 2016.
- [68] M. Feng and S. Mao, "Harvest the potential of massive MIMO with multi-layer techniques," *IEEE Netw.*, vol. 30, no. 5, pp. 40–45, 2016.
- [69] O. Elijah, C. Y. Leow, T. A. Rahman, S. Nunoo, and S. Z. Iliya, "A Comprehensive Survey of Pilot Contamination in Massive MIMO-5G System," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 905–923, 2016.
- [70] J. Shen, S. Suyama, T. Obara, and Y. Okumura, "Requirements of Power

- Amplifier on Super High Bit Rate Massive MIMO OFDM Transmission Using Higher Frequency Bands,” pp. 433–437, 2014.
- [71] S. Suyama, J. Shen, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and Y. Okumura, “Super high bit rate radio access technologies for small cells using higher frequency bands,” pp. 1–4, 2014.
- [72] Y. Zeng, R. Zhang, and Z. N. Chen, “Electromagnetic lens-focusing antenna enabled massive MIMO: Performance improvement and cost reduction,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1194–1206, 2014.
- [73] F. Boccardi, R. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, “Five disruptive technology directions for 5G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, 2014.
- [74] A. Puglielli, A. Townley, G. Lacaille, V. Milovanovic, P. Lu, K. Trotskovsky, A. Whitcombe, N. Narevsky, G. Wright, T. Courtade, E. Alon, B. Nikolic, and A. M. Niknejad, “Design of Energy- and Cost-Efficient Massive MIMO Arrays,” *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 586–606, 2016.
- [75] B. Somasekhar and A. Mallikarjunaprasad, “Modified SLM and PTS approach to reduce PAPR in MIMO OFDM,” *2014 Int. Conf. Electron. Commun. Comput. Eng. ICECCE 2014*, pp. 245–253, 2014.
- [76] P. Wei, L. Dan, C. Zhou, Y. Xiao, G. Wu, and S. Li, “Joint optimization of peak-to-average power ratio and spectral leakage in 5G multicarrier waveforms,” *China Commun.*, vol. 12, no. Supplement, pp. 83–92, 2015.
- [77] E. Telatar, “Capacity of multi-antenna Gaussian channels,” *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585–595, 1999.
- [78] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath, C. B. Chae, and T. Sälzer, “Shifting the MIMO Paradigm,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 36–46, 2007.
- [79] E. Björnson, M. Kountouris, M. Bengtsson, and B. Ottersten, “Receive combining vs. multi-stream multiplexing in downlink systems with multi-antenna users,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 13, pp. 3431–3446, 2013.
- [80] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, “Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2640–2651, 2011.
- [81] I. Atzeni, J. Arnau, and M. Debbah, “Fractional Pilot Reuse in Massive MIMO Systems,” 2015.
- [82] S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory*, vol. 1, Prentice Hall, 1993, pp. 625.
- [83] S. Biswas, C. Masouros, and T. Ratnarajah, “Performance analysis of large multiuser MIMO systems with space-constrained 2-D antenna arrays,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 5, pp. 3492–3505, 2016.
- [84] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Aspects of favorable propagation in Massive MIMO,” in *European Signal Processing Conference*, 2014, pp. 76–80.
- [85] E. Björnson, E. G. Larsson, and M. Debbah, “Massive MIMO for Maximal Spectral Efficiency: How Many Users and Pilots Should Be Allocated?,” in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 1293–1308.

- [86] H. Boche and M. Schubert, "A general duality theory for uplink and downlink beamforming," *Proc. IEEE 56th Veh. Technol. Conf.*, vol. 1, no. 2, pp. 87–91, 2002.
- [87] E. Björnson and B. Ottersten, "A framework for training-based estimation in arbitrarily correlated Rician MIMO channels with Rician disturbance," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 3 PART 2, pp. 1807–1820, 2010.
- [88] T. L. Marzetta, "BLAST training: Estimating channel characteristics for high capacity space-time wireless," *Proc. Annu. Allert. Conf. Commun. Control Comput.*, vol. 37, pp. 958–966, 1999.
- [89] T. L. Marzetta, G. Caire, M. Debbah, I. Chih-Lin, and S. K. Mohammed, "Special issue on massive MIMO," *Journal of Communications and Networks*, vol. 15, no. 4, pp. 333–337, 2013.
- [90] M. Payaró i Llisterri, "Impact of channel state information on the analysis and design of multi-antenna communication systems," Ph.D dissertation, Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya, Catalunya, Spain, 2006.
- [91] F. Fernandes, A. Ashikhmin, and T. L. Marzetta, "Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 192–201, 2013.
- [92] J. C. Shen, J. Zhang, E. Alsusa, and K. B. Letaief, "Compressed CSI Acquisition in FDD Massive MIMO: How Much Training is Needed?," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, vol. 15, no. 6, pp. 4145–4156.
- [93] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Massive MU-MIMO downlink TDD systems with linear precoding and downlink pilots," in *2013 51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Allerton 2013*, 2013, pp. 293–298.
- [94] V. Saxena, G. Fodor, and E. Karipidis, "Mitigating pilot contamination by pilot reuse and power control schemes for massive MIMO systems," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2015, vol. 2015.
- [95] T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice," *Prosltdcom Prosltdcom*, vol. 207, pp. 1–707, 2002.
- [96] D. C. Cox, "Cochannel Interference Considerations in Frequency Reuse Small-Coverage-Area Radio Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, no. 1, pp. 135–142, 1982.
- [97] Y. Li, Y. H. Nam, B. L. Ng, and J. Zhang, "A non-asymptotic throughput for massive MIMO cellular uplink with pilot reuse," in *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, 2012, pp. 4500–4504.
- [98] ITU, "Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interfaces," p. 8, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Osman DİKMEN
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.12.1989-YOZGAT
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : osmandikmen@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2017
Lisans	Elektronik Müh.	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü	2013
Lise		Yozgat Anadolu Lisesi	2007